Improvement of Northern Italy Waterway System

365 PO RIVER SYSTEM

"PROGETTO PRELIMINARE PER IL POTENZIAMENTO DELLA NAVIGABILITÀ DEL FIUME PO DAL PORTO DI CREMONA AL MARE ADRIATICO" - 2012-IT-91076-S (TEN-T)

Report generale

Cofinanziato dall'Unione europea
Rete transeuropea di trasporto (TEN-T)

Improvement of Northern Italy
Waterway System

365 PO RIVER SYSTEM

"PROGETTO PRELIMINARE PER IL POTENZIAMENTO DELLA NAVIGABILITÀ DEL FIUME PO DAL PORTO DI CREMONA AL MARE ADRIATICO" - 2012-IT-91076-S (TEN-T)

Report generale

I RESPONSABILI
Dott. Ing. Bruno Mioni
Dott. Ing. Ivano Galvani
Dott. Ing. Luigi Mille
Dott. Ing. Marcello Moretti

Cofinanziato dall'Unione europea
Rete transeuropea di trasporto (TEN-T)

GRUPPO DI LAVORO AIPO
Dott. Ing. Bruno Mioni
Dott. Ing. Ivano Galvani
Dott. Ing. Luigi Mille
Dott. Ing. Marcello Moretti

GRUPPO DI LAVORO ESPERTI

Attività n.2 – servizio 1

ETATEC STUDIO PAOLETTI S.r.l.
Prof. Ing. Alessandro Paoletti
Dott. Ing. Stefano Croci
Dott. Ing. Omar Cella
Dott. Geol. Giovanni Savazzi

BETA STUDIO S.r.l.
Prof. Ing. Sergio Fattorelli
Dott. Ing. Massimo Coccato
Dott. Ing. Francesca Ramazzina

BININI PARTNERS S.r.l.
Dott. Ing. Tiziano Binini
Dott. Ing. Gianluca Lombardi
Dott. Ing. Simone Pioli

RPA S.r.l.
Dott. Ing. Dino Bonadies
Dott. Ing. Marco Rasimelli
Dott. Ing. Leonardo Schippa

STUDIO PAOLETTI INGEGNERI ASSOCIATI
Prof. Ing. Alessandro Paoletti
Dott. Ing. Stefano Croci

Attività n.3 – servizio 2

IDROESSE ENGINEERING S.r.l.
Dott. Ing. Luca Tesser

HYDRODATA S.p.a.
Dott. Ing. Luca Dutto
Dott. Ing. Mauro Cargnelutti
Dott. Ing. Michele Buffo
Dott. Geol. Eugenio Cavallero
Dott. Geol. Marco Bersano Begey
Arch. Laura Mazzariol

ART AMBIENTE RISORSE E TERRITORIO S.r.l.
Dott. Ing. Ivo Fresia
Dott. Ing. Marco Andreoli
Dott. Ing. Roberto Malcotti
Dott. Ing. Andrea Alberini
Dott. Ing. Fabio Ferrari
Dott. Geol. Giancarlo Villa
Dott. Geol. Giovanni Carra
Dott. Geol. Emilia Mitidieri

POLARIS STUDIO ASSOCIATO S.r.l.
Dott. Ing. Ugo Bernini
Dott. Ing. Luciano Corradini
Dott. Ing. Marco Spezia

Attività n. 1 e n.4

EUROSPORTELLO VENETO
Dott. Francesco Pareti
Dott. Urb. Lorenzo Carapellese
Ing. Marco Pascucci
Dott. Luca Pavanato

Improvement of Northern Italy
Waterway System

365 PO RIVER SYSTEM

ATTIVITÀ N. 2: STUDIO PRELIMINARE DI FATTIBILITÀ PER IL POTENZIAMENTO DELLA NAVIGABILITÀ DEL FIUME PO

I RESPONSABILI
Dott. Ing. Bruno Mioni
Dott. Ing. Ivano Galvani
Dott. Ing. Luigi Mille
Dott. Ing. Marcello Moretti

I CONSULENTI
Etatec Studio Paoletti s.r.l.
Beta Studio s.r.l.
Binini Partners s.r.l.
RPA s.r.l.
Studio Paoletti Ingegneri Associati

Cofinanziato dall'Unione europea
Rete transeuropea di trasporto (TEN-T)

INDICE

ATTIVITÀ N. 2: STUDIO PRELIMINARE DI FATTIBILITÀ PER IL POTENZIAMENTO DELLA NAVIGABILITÀ DEL FIUME PO

1 PREMESSA 14

2 DOCUMENTAZIONE CONSULTATA 17

3 CARATTERISTICHE PECULIARI DEL SISTEMA FLUVIALE DEL FIUME PO 18

3.1 CONDIZIONI IDRAULICO-MORFOLOGICHE DEL FIUME PO DESUNTE DAGLI STUDI DELL'AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO .....
18*3.1.1 Cenni preliminari relativi alla trasformazione del Po da alveo naturale ad alveo navigabile: "come era il Po" e "come è oggi il Po" 18*

3.1.2 Caratteristiche idrologico-idrauliche del tratto in studio 19

3.1.3 Caratteristiche geomorfologiche del tratto in studio e tendenze evolutive in atto relativamente alle forme di fondo (barre e sponde).....23

3.1.4 Analisi delle tendenze evolutive del fondo alveo 27

4 APPROFONDIMENTI DELLE ATTUALI CONDIZIONI IDRAULICO-MORFOLOGICHE DEL FIUME PO 30

4.1 PREMESSA 30

4.2 ANALISI CONDOTTE DALL'AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO 31

4.3 INDAGINI DI CAMPO E ANALISI GRANULOMETRICHE 34

4.3.1 Inquadramento 34

4.3.2 Programma di campionamento 34

4.3.3 Metodologia di campionamento 35

4.3.3.1 Campioni con abbondante frazione ghiaiosa 36

4.3.3.2 Campioni sabbiosi 37

4.3.4 Metodologia di analisi 37

4.3.5 Analisi granulometriche 37

4.3.6 Punti di troncatura 38

4.3.7 Trend del quarzo monominerale 40

4.3.8 Risultati delle analisi granulometriche e sedimentologiche 40

4.3.8.1 Trend granulometrico lungo la progressiva 40

4.3.8.2 Punti di troncatura: modalità di trasporto e deposito dei sedimenti 42

4.3.8.3 Trend del Quarzo monocristallino 44

4.4 MONITORAGGIO SPERIMENTALE DELLA TORBIDITÀ DELLE ACQUE DEL PO FINALIZZATA ALLA MISURA DEL TRASPORTO SOLIDO IN SOSPENSIONE.....45

4.4.1 Premessa 45

4.4.2 Torbidità 46

4.4.3 Solidi Totali 46

4.4.4 Campionamenti condotti 46

4.4.5 Risultati delle attività di monitoraggio 49

4.4.5.1 Valutazione delle concentrazioni di SST e relazione con la torbidità monitorata 49

4.4.5.2 Andamento della torbidità lungo le sezioni monitorate 53

4.4.6 Confronto tra i dati di torbidità riportati negli

annali idrologici e il monitoraggio effettuato 58

4.4.7 Conclusioni 58

4.5 AGGIORNAMENTO DELLE ANALISI DEL BILANCIO DEL TRASPORTO SOLIDO DI FONDO DEL FIUME PO CONDOTTO NEL PROGRAMMA GENERALE DI GESTIONE DEI SEDIMENTI DEL FIUME PO 58

4.5.1 Analisi delle tendenze evolutive delle forme emerse – metodologia 63

4.5.2 Analisi delle tendenze evolutive delle forme emerse – risultati ottenuti 64

4.5.3 Analisi delle tendenze evolutive del fondo alveo - metodologia 70

4.5.4 Analisi delle tendenze evolutive del fondo alveo – risultati ottenuti tra le sezioni 26 e 44 71

4.5.5 Confronti multitemporali fra le sezioni trasversali 26 e 44 75

4.5.6 Andamento delle altezze idrometriche degli eventi di magra 95

4.5.7 Analisi delle tendenze evolutive del fondo alveo dalla sezione 44 (progr. km 482) al Po di Goro (progr. Km 603) 97

4.5.8 Bilancio del trasporto solido di fondo 100

4.5.8.1 Erosioni di barra 101

4.5.8.2 Depositi di barra 101

4.5.8.3 Erosioni di sponda 102

4.5.8.4 Depositi di sponda 103

4.5.8.5 Erosioni di fondo alveo 103

4.5.8.6 Depositi di fondo alveo 103

4.5.8.7 Apporti dagli affluenti 103

4.5.8.8 Apporto da sospensione 104

4.5.8.9 Calcolo del bilancio del trasporto solido 106

5 IL FIUME PO IN RAPPORTO AI REQUISITI DI SICUREZZA IDRAULICA. MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE IN PRESENZA DELLA PIENA DI RIFERIMENTO PAI T = 200 ANNI 108

5.1 MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO DEL PO DA CREMONA AL PO DI GORO 112

5.2 CONDIZIONI AL CONTORNO 119

5.3 LA PIENA DEL NOVEMBRE 2000. CALIBRAZIONE DEL MODELLO 2D A FONDO FISSO 121

5.4 SIMULAZIONE DELLA PIENA DI RIFERIMENTO PAI T200 NELLO STATO ATTUALE DEL FIUME....138

5.5 SICUREZZA IDRAULICA NELLO STATO ATTUALE DEL FIUME. VALORI DEI FRANCHI DEGLI ARGINI MAESTRI 145

6 ESTENSIONE DEL PROGETTO DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA NEL TRATTO COMPRESO TRA FOCE MINCIO E L'INCILE PO DI GORO 156

6.1 PREMESSA 156

6.2 I PRECEDENTI PROGETTI DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA DEL FIUME PO NEL TRATTO DA CREMONA A FOCE MINCIO 156

6.3 TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO. ANALISI NAVIGABILITÀ ATTUALE E INDIVIDUAZIONE DEI PUNTI CRITICI 159

6.4 CRITERI DI INDIVIDUAZIONE DEGLI INTERVENTI DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA NEL TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO 159

6.5 TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO. ANALISI DEI BASSI FONDALI ALLO STATO ATTUALE 162

6.6 TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO. ANALISI MODELLISTICA BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO DEI BASSI FONDALI ALLO STATO ATTUALE 168

6.6.1 Principali caratteristiche del modello bidimensionale a fondo fisso 168

6.6.2 Condizioni al contorno del modello bidimensionale a fondo fisso 170

6.6.3 Taratura del modello 2D a fondo fisso 171
6.6.4 Risultati del modello 2D a fondo fisso 173
6.6.5 Punti critici con riferimento al fondale minimo di 2.2 m con portata di 530 m3/s (durata 340 gg/anno) 175
6.6.6 Punti critici con riferimento al fondale minimo di 2.2 m con portata di 350 m3/s (portata obiettivo a Pontelagoscuro) 176
6.6.7 Conclusioni 178
6.7 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI E DELL'ASSETTO DI PROGETTO DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA ...178
6.8 APPROFONDIMENTI PROGETTUALI RELATIVI ALLE OPERE DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA 182
6.9 COSTI DELLE OPERE DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA 186

7 PROGETTO DI REGIMAZIONE DEL FIUME PO TRAMITE TRAVERSE DI SOSTEGNO DEI LIVELLI IDRICI DI MAGRA E CORRISPONDENTI CONDIZIONI DI SICUREZZA IDRAULICA DEL FIUME PO 187

7.1 IL PROGETTO DI REGIMAZIONE DEL FIUME PO IN BASE ALLO STUDIO DI FATTIBILITÀ DEL 2009 187
7.2 NUOVA CONFIGURAZIONE DELLE OPERE DI REGIMAZIONE 200
7.2.1 Ubicazione ottimale delle traverse di sostegno 200
7.2.2 Campi di regolazione delle traverse e relativi profili di rigurgito 210
7.3 INGEGNERIA DI MASSIMA DELLE OPERE DI REGIMAZIONE 212
7.3.1 Tipologie alternative di configurazione degli sbarramenti 213
7.3.2 Stima della produzione energetica 218
7.3.2.1 Produzione energetica nella configurazione 1 "allargata" 219
7.3.2.2 Produzione energetica nella configurazione 2 "ristretta" priva di centrale idroelettrica....222
7.3.2.3 Produzione energetica nella configurazione 3 "ristretta" con centrale idroelettrica inserita nelle luci dello sbarramento 222
7.3.3 Opere provvisionali e fasi di cantiere 226
7.3.3.1 Ipotesi e criteri generali 226
7.3.3.2 Realizzazione centrale e traversa 227
7.3.4 Costi di costruzione e costi di gestione 230
7.3.4.1 Costi di costruzione 230
7.3.4.2 Costi di gestione 232
7.4 RENDER E FOTOINSERIMENTI DELLE TRAVERSE DI SOSTEGNO 234
7.5 IL PROGETTO DI REGIMAZIONE DEL FIUME PO IN RAPPORTO AI REQUISITI DI SICUREZZA IDRAULICA 240
7.5.1 Risultati del modello 2D a fondo fisso per la Traversa n. 1 242
7.5.2 Risultati del modello 2D a fondo fisso per la Traversa n. 2 245
7.5.3 Risultati del modello 2D a fondo fisso per la Traversa n. 3 248
7.5.4 Risultati del modello 2D a fondo fisso per la Traversa n. 4 252
7.5.5 Risultati del modello 2D a fondo fisso per la Traversa n. 5 256
7.5.6 Sintesi dei risultati del modello 2D a fondo fisso delle traverse 256

8 POSSIBILE COMPLEMENTARIETÀ DELLE OPERE DI REGIMAZIONE E DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA...260

8.1 INGEGNERIA DI MASSIMA DELLE OPERE NELLA SOLUZIONE INTEGRATA 261
8.1.1 Stima della produzione energetica 261
8.1.1.1 Produzione energetica complessiva delle traverse 1, 2, 4 nella configurazione 1 "allargata" 261
8.1.1.2 Produzione energetica complessiva delle traverse 1, 2, 4 nella configurazione 3 "ristretta" 262

8.2 COSTI DI COSTRUZIONE E COSTI DI GESTIONE DELLA SOLUZIONE INTEGRATA 262

9 APPROFONDIMENTI MODELLISTICI SUL TRASPORTO SOLIDO 264

9.1 PREMESSA 264

9.2 STUDI PRECEDENTI 264

9.3 OBIETTIVI DELLA MODELLAZIONE 266

9.4 IL MODELLO BIDIMENSIONALE 266

9.4.1 Il codice di calcolo MIKE 21C 266

9.4.1.1 Discretizzazione spaziale 267

9.4.1.2 Discretizzazione temporale 267

9.4.2 La griglia curvilinea e la batimetria 268

9.5 DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO 271

9.5.1 Condizioni al contorno 271

9.5.2 Condizioni al contorno in riferimento ai contributi in portata solida degli affluenti 273

9.5.2.1 Studi di riferimento 273

9.5.2.2 Premessa 274

9.5.2.3 Metodologia adottata per la ricostruzione dei contributi solidi medi giornalieri degli affluenti nel periodo 2005-2014 277

9.5.2.4 Ricostruzione della curva di durata delle portate degli affluenti e taratura della formula di trasporto 277

9.5.2.5 Analisi idrologica del decennio 2005-2014 288

9.5.2.6 Ricostruzione del contributo solido degli affluenti nel periodo 2005-2014 292

9.5.3 Caratteristiche granulometriche 294

9.5.4 Scabrezze 295

9.5.5 Opzioni di calcolo utilizzate e formule di trasporto solido 295

9.6 CALIBRAZIONE DEL MODULO MORFODINAMICO 296

9.7 RISULTATI 301

9.7.1 Premessa....301

9.7.1.1 Progetto di regimazione. Regolazione delle traverse 301

9.7.1.2 Progetto di sistemazione a corrente libera....302

9.7.1.3 Simulazioni effettuate 302

9.7.2 Bilanci volumetrici 303

9.7.2.1 Risultati delle simulazioni di breve periodo (2 anni) 303

9.7.2.2 Risultati delle simulazioni su medio periodo (10 anni) 304

9.7.3 Evoluzione del fondo alveo 310

9.7.3.1 Scenario di regimazione....311

9.7.3.2 Scenario di sistemazione a corrente libera 318

9.8 SIMULAZIONI DI DETTAGLIO DELLE TRAVERSE DI SOSTEGNO NEL PROGETTO DI REGIMAZIONE 326

10 ANALISI CONDIZIONI DI NAVIGABILITÀ DEL FIUME PO 334

10.1 PREMESSA 334

10.2 PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO 334

10.3 RISULTATI DEL MODELLO 2D A FONDO FISSO 335

10.3.1 Condizioni di navigabilità con riferimento all'assetto attuale 336

10.3.2 Condizioni di navigabilità con riferimento all'assetto di progetto

con interventi di regimazione 337
10.3.3 Condizioni di navigabilità con riferimento all'assetto di progetto con interventi di sistemazione a corrente libera 338
10.3.4 Dinamica del talweg nelle sezioni con tiranti di navigazione critici 340
10.3.5 Conclusioni 343

11 SPECIFICHE MODELLI FISICI DEL FIUME PO IN RELAZIONE AI PROGETTI DI REGIMAZIONE E DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA 345

11.1 PREMESSA 345
11.2 PROBLEMATICHE E CARATTERISTICHE GENERALI DELLE SPECIFICHE PER LA MODELLAZIONE FISICA NEL CONTESTO 347
11.3 LE PROVE PRELIMINARI E LE MISURE 348
11.3.1 Prove preliminari 348
11.3.2 Misure di livello 348
11.3.3 Misure di portata liquida e di concentrazione dei sedimenti trasportati 348
11.3.4 Misure di velocità 348
11.3.5 Rilievo batimetrico 349
11.4 TRAVERSA 1. ROCCABIANCA - MOTTA BALUFFI 349
11.4.1 Il contesto e l'opera 349
11.4.2 I rilievi 352
11.4.3 Le condizioni idrometriche e la scelta delle portate di prova 355
11.4.4 Il modello numerico 2-D 356
11.4.5 Criteri di similitudine ed effetti di scala 358
11.5 SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA IN CORRISPONDENZA PONTE DI REVERE-OSTIGLIA (INTERVENTO 7V1) ..365
11.5.1 Il contesto e le opere 368
11.5.2 I rilievi 373
11.5.3 Le condizioni idrometriche e la scelta delle portate di prova 373
11.5.4 Il modello numerico 2-D 377
11.5.5 Criteri di similitudine ed effetti di scala 384

12 BARRIERA ANTISALE 384

13 CONCLUSIONI 388

13.1 BREVE PANORAMA DEL TRASPORTO IDROVIARIO EUROPEO 389
13.2 CRITERI GENERALI DI ANALISI COMPARATIVA MULTI-OBIETTIVO 391
13.3 ANALISI COMPARATIVA DEI TRE SCENARI PROGETTUALI 394
13.4 BREVI CONSIDERAZIONI ATTINENTI IL PROGRAMMA DI SVILUPPO PER IL PO 395

14 BIBLIOGRAFIA 397

15 ALLEGATI 397

15.1 ALLEGATO 1 - RISULTATI DELLE INDAGINI GRANULOMETRICHE 397
15.2 ALLEGATO 2 - CARTOGRAFIA DELLE TENDENZE EVOLUTIVE IN ATTO NEL PERIODO 2005-2015 397
15.3 ALLEGATO 3 - ANALISI MODELLISTICA BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO DEI BASSI FONDALI ALLO STATO ATTUALE. TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO 397
15.4 ALLEGATO 4 - INDIVIDUAZIONE DEI BASSI FONDALI (TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO) 397

15.5 ALLEGATO 5 - IPOTESI DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA (TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO) ...397
15.6 ALLEGATO 6 - APPROFONDIMENTO PROGETTUALE DELLE OPERE RELATIVE ALLA SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA DELL'ASTA DEL FIUME PO (TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO) ...397
15.7 ALLEGATO 7 - PROGETTO DI REGIMAZIONE MEDIANTE TRAVERSE DI SOSTEGNO. RISULTATI DEL MODELLO BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO PER LE TRAVERSE N. 1, 2, 3, 4, 5 NELLE DIVERSE SOLUZIONI PROPOSTE ...398
15.8 ALLEGATO 8 - INGEGNERIA DI MASSIMA DELLE OPERE DI REGIMAZIONE ...398
15.9 ALLEGATO 9 - RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DEL MODELLO 2D A FONDO MOBILE ...398
15.10 ALLEGATO 10 - ANALISI CONDIZIONI DI NAVIGABILITÀ CON MODELLO 2D A FONDO FISSO ...398
15.11 ALLEGATO 11 - RISULTATI DEL MODELLO IDRAULICO 2D A FONDO FISSO DELLO STATO ATTUALE CON RIFERIMENTO ALLA PIENA PAI ...398
15.12 ALLEGATO 12 - RENDERING DELLE OPERE DI REGIMAZIONE ...398
15.13 ALLEGATO 13 - INGEGNERIA DI MASSIMA DELLA BARRIERA ANTISALE ...398

ATTIVITÀ N. 3: VALUTAZIONE AMBIENTALE DELLA SITUAZIONE ATTUALE DEL FIUME PO E STUDIO DEGLI IMPATTI AMBIENTALI DELLE SOLUZIONI PROPOSTE DEL MEDIO E LUNGO TERMINE (CORRENTE LIBERA E REGIMAZIONE)

16 PREMESSA ...400

16 CARATTERISTICHE ATTUALI DELL'ALVEO DEL PO NEL TRATTO DI INTERESSE ...401

16.1 CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DELL'ALVEO ...402
16.2 SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA REALIZZATA NEL TRATTO FOCE ADDA – FOCE MINCIO ...403
16.3 REGIME IDROLOGICO ...406
16.4 TRASPORTO SOLIDO ...407
16.5 TENDENZE EVOLUTIVE DEL FONDO ALVEO ...409
16.6 CARATTERISTICHE DELLA FALDA FREATICA SUPERFICIALE ...409
16.6.1 Settore idrogeologico a nord del Po ...411
16.6.2 Settore idrogeologico a sud del Po ...413
16.6.3 Settore idrogeologico del Delta del Po ...417
16.7 QUALITÀ DELL'ACQUA ...418
16.7.1 Reti di monitoraggio ...421
16.7.2 Stato ecologico ...426
16.7.3 Stato chimico ...430
16.7.4 Stato ambientale ...430
16.7.5 Obiettivo di stato ecologico e chimico del PdG Po 2015 ...431
16.8 CUNEO SALINO ...431
16.8.1 Barriere antisale ...434
16.8.2 Bacini di accumulo in aree golenali fluviali - Area dell'ex ansa di Volta Vaccari ...436
16.9 UTILIZZAZIONI IDRICHE IN ATTO ...437
16.10 RETICOLO IDROGRAFICO MINORE ...440

17 OPZIONI DI INTERVENTO IN PROGETTO PER LA SISTEMAZIONE DELL'ALVEO DEL FIUME PO ...444

17.1 PROGETTO DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA ...444

17.2 PROGETTO DI SISTEMAZIONE CON REGOLAZIONE 447

18 IMPOSTAZIONE METODOLOGICA GENERALE 451

19 CARATTERISTICHE IDRODINAMICHE DELL'ALVEO ATTIVO IN CONDIZIONI DI MAGRA E ORDINARIE SIMULAZIONI IDRAULICHE DELL'ASSETTO ATTUALE E DI PROGETTO 453

19.1 MESSA A PUNTO DEL MODELLO DI SIMULAZIONE (IMPLEMENTAZIONE E TARATURA) 455

19.2 PROFILI IDRICI PER LE PORTATE CARATTERISTICHE (STATO ATTUALE E DI PROGETTO).....456

19.3 SIMULAZIONI DELLE MODALITÀ DI REGOLAZIONE IN FUNZIONE DEL CUNEO SALINO.....460

20 APPROFONDIMENTO DELLE INTERAZIONI CON LA FALDA FREATICA, IL RETICOLO IDRICO SUPERFICIALE E LE AREE GOLENALI ED EXTRA-GOLENALI; INTERAZIONE DELLE PROPOSTE PROGETTUALI NEI CONFRONTI DELLE RETI DEL CONSORZI DI BONIFICA; ANALISI DELLE INTERAZIONE CON GLI AMBIENTI RIPARIALI 462

20.1 APPROFONDIMENTO DELLE INTERAZIONI CON LA FALDA FREATICA, IL RETICOLO IDRICO SUPERFICIALE E LE AREE GOLENALI ED EXTRA-GOLENALI 462

20.1.1 Impostazione metodologica 462

20.1.2 Caratterizzazione della rete di scolo e di derivazione nelle aree golenali e extra-golenali dei consorzi di bonifica rivieraschi al fiume Po 463

20.1.3 Caratterizzazione dell'interazione della falda freatica con il sistema del fiume Po allo stato attuale 501

20.1.4 Modello di simulazione del comportamento del sistema falda freatica - fiume Po allo stato attuale 502

20.2 INTERAZIONI DEGLI SCENARI PROGETTUALI CON IL FLUSSO SOTTERRANEO E LA RETE SUPERFICIALE DI DRENAGGIO 504

20.2.1 Impostazione metodologica 504

20.2.2 Modello di simulazione del comportamento del sistema falda freatica - fiume Po per gli scenari di progetto 506

20.3 APPROFONDIMENTI DI DETTAGLIO CON MODELLAZIONE NUMERICA [FEFLOW] DI SIMULAZIONE DELLA FALDA FREATICA PER IL SISTEMA DI REGOLAZIONE CON TRAVERSE.....508

20.3.1 Impostazione metodologica della modellazione numerica 508

20.3.2 Caratteristiche del codice di calcolo utilizzato 509

20.3.3 Dati di input e modello concettuale di riferimento 510

20.3.4 Implementazione dei modelli numerici di flusso 511

20.3.5 Risultati delle simulazioni nello scenario di progetto 518

20.3.6 Simulazione di interventi per la mitigazione degli effetti sulla quota falda nello scenario di progetto 533

20.4 VALUTAZIONI DELLE INTERAZIONI FALDA SUPERFICIALE E RETE SUPERFICIALE DI DRENAGGIO PER GLI SCENARI DI PROGETTO 537

20.5 ANALISI DELLE INTERAZIONI CON GLI AMBIENTI RIPARIALI 538

20.5.1 Il sistema delle aree protette e della rete natura 2000 538

20.5.2 Caratterizzazione degli ambienti ripariali del fiume Po allo stato attuale 544

20.5.3 Interferenza dell'assetto vegetazionale ripariale con l'innalzamento del livello idrico del fiume Po e del livello freatico per gli scenari di progetto 547

20.6 DEFINIZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE A SEGUITO DELLE INTERAZIONI CON LA FALDA FREATICA, CON LA RETE E OPERE GESTITE DAI CONSORZI DI BONIFICA, IL RETICOLO IDRICO SUPERFICIALE, LE AREE GOLENALI ED EXTRA-GOLENALI E GLI AMBIENTI RIPARIALI 549

21 APPROFONDIMENTO DELLE INTERAZIONI CON LA RISALITA DEL CUNEO SALINO 556

21.1 PREMESSA 556

21.2 CARATTERISTICHE GENERALI DEL DELTA 556

21.2.1 Caratteristiche idrografiche 556
21.2.2 Caratteristiche geologiche e geomorfologiche 557
21.2.3 Evoluzione storica 559
21.2.4 Clima e maree 565
21.2.5 Batimetria 566
21.2.6 Caratteristiche idrologiche 572
21.2.7 Caratteristiche attuali del fenomeno di risalita del cuneo salino 576
21.3 MODELLI DI SIMULAZIONE DEL FENOMENO DI RISALITA DEL CUNEO SALINO 582
21.3.1 Portate di magra ordinaria 585
21.3.2 Portata di minima magra 585
21.4 EFFETTI ATTESI A SEGUITO DELLA REALIZZAZIONE DELLE OPZIONI DI INTERVENTO 586
21.4.1 Sistemazione a corrente libera 586
21.4.2 Sistemazione con traverse di regolazione 587
21.5 INTERVENTI DI CONTROLLO E MITIGAZIONE DEL FENOMENO 588

22 ANALISI SULLA QUALITÀ DELLE ACQUE E ALTRI PARAMETRI DELLA DIRETTIVA 2000/60 2007/60 SU TUTTO IL TRATTO. MONITORAGGIO E ANALISI PARAMETRI DI QUALITÀ DELL'ACQUA. INFLUENZA DELLE PROPOSTE PROGETTUALI DI SISTEMAZIONE DEL PO SULLA QUALITÀ DELLE ACQUE 589

22.1 CARATTERIZZAZIONE DELLO STATO ECOLOGICO ATTUALE DEL TRATTO IN ESAME 590
22.1.1 Impostazione metodologica 590
22.1.2 Analisi del quadro conoscitivo disponibile pregresso 590
22.1.3 Aggiornamento del quadro di riferimento mediante attività di rilievo in sito 594
22.1.4 Campagna marzo 2015: sintesi dei risultati 595
22.1.5 Campagna agosto 2015: sintesi dei risultati 597
22.1.6 Sintesi dello stato ecologico attuale 599
22.2 ANALISI MODELLISTICA DELLA POTENZIALE EVOLUZIONE DELLO STATO ECOLOGICO SU SITO PILOTA 601
22.2.1 Impostazione metodologica 601
22.2.2 Allestimento del modello ecologico 604
22.2.3 Sintesi dei risultati 607
22.3 INCIDENZA DELLE PROPOSTE PROGETTUALI SULLA QUALITÀ DELLE ACQUE DI TUTTO IL TRATTO....609
22.3.1 Impostazione metodologica 609
22.3.2 Analisi di incidenza per sotto-tratti omogenei 613
22.3.3 Valutazione degli effetti attesi per tratti omogenei: configurazione di regimazione 626
22.3.4 Valutazione degli effetti attesi per tratti omogenei: sistemazione a corrente libera 635
22.3.5 Sintesi dei risultati 642
22.3.6 Definizione degli interventi di mitigazione 648

ATTIVITÀ N. 4: IMPATTO SOCIOECONOMICO DEL POTENZIAMENTO DELLA NAVIGABILITÀ DEL FIUME PO - ANALISI BENEFICI/COSTI E ANALISI MULTI-CRITERIA RISULTATI PRELIMINARI

23 CARATTERISTICHE DEI BACINI ECONOMICI POTENZIALMENTE INTERESSATI AL TRAFFICO FLUVIO-MARITTIMO 652

23.1 COMPARTO PRODUTTIVO 652

23.2 PROVINCIA DI ROVIGO 655
23.2.1 Popolazione e territorio 655
23.2.2 Tessuto imprenditoriale 655
23.2.3 Mercato del lavoro 655
23.2.4 Risultati economici 655
23.2.5 Apertura dei mercati 656
23.2.6 L'interporto di Rovigo 656
23.2.7 Porto Levante Terminal 657
23.3 PROVINCIA DI FERRARA 657
23.3.1 Popolazione e territorio 657
23.3.2 Tessuto imprenditoriale 657
23.3.3 Mercato del lavoro 658
23.3.4 Risultati economici 658
23.3.5 Apertura mercati 659
23.3.6 L'idrovia ferrarese 659
23.4 PROVINCIA DI REGGIO EMILIA 660
23.4.1 Popolazione e territorio 660
23.4.2 Tessuto imprenditoriale 660
23.4.3 Mercato del lavoro 660
23.4.4 Risultati economici 661
23.4.5 Apertura mercati 661
23.4.6 Distretto ceramico di Sassuolo 661
23.4.7 Porto Turistico Fluviale Regionale di Boretto 662
23.5 PROVINCIA DI VERONA 662
23.5.1 Popolazione e territorio 662
23.5.2 Tessuto imprenditoriale 662
23.5.3 Mercato del lavoro 663
23.5.4 Risultati economici 663
23.5.5 Apertura mercati 663
23.5.6 Distretto del Mobile Classico della Bassa Veronese 663
23.5.7 Distretto Veneto della termomeccanica – Veneto Clima 663
23.5.8 Distretto Verona Moda.....664
23.6 PROVINCIA DI MANTOVA 664
23.6.1 Popolazione e territorio 664
23.6.2 Tessuto imprenditoriale 664
23.6.3 Mercato del lavoro 665
23.6.4 Risultati economici 665
23.6.5 Apertura mercati 665
23.6.6 Porto di Mantova 666
23.6.7 Sistema Portuale Mantovano 666
23.7 PROVINCIA DI CREMONA 667
23.7.1 Popolazione e territorio 667
23.7.2 Tessuto imprenditoriale 667

23.7.3 Mercato del lavoro 667
23.7.4 Risultati economici 667
23.7.5 Apertura mercati 668
23.7.6 Porto di Cremona 668
23.7.7 Comparto turistico 669
23.7.8 Progetto Interregionale di Valorizzazione del fiume Po 670

24 IDENTIFICAZIONE DEL PROGETTO E DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI 671

24.1 PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA 671
24.2 ANALISI DELLA DOMANDA DI TRAFFICO 672
24.3 NAVIGLIO 678
24.4 ALTRE CONSIDERAZIONI 680

25 ANALISI MULTI-CRITERIA PER LA INDIVIDUAZIONE DI SOLUZIONI ALTERNATIVE ALLO STATO DI FATTO ...681

25.1 LA METODOLOGIA 681
25.2 PESI ED OUTPUTS 682

26 SELEZIONE DEGLI INDICATORI 685

26 IL QUADRO GENERALE DEGLI INVESTIMENTI E LE COMBINAZIONI CON GLI SCENARI DI DOMANDA.....686

27 APPROCCIO METODOLOGICO 687

27.1 ANALISI B/C FINANZIARIA: DATI DI INPUT 688
27.2 ANALISI B/C ECONOMICA: DATI DI INPUT 695

28 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI 702

28.1 ANALISI BENEFICI/COSTI FINANZIARIA 702
28.2 ANALISI BENEFICI/COSTI ECONOMICA 703

29 CONCLUSIONI.....712

1 PREMESSA

La presente Relazione Generale descrive, insieme agli Allegati, le attività effettuate per lo studio "Sistema idroviario del Po 365 – Progetto preliminare per migliorare la navigabilità dal porto di Cremona al mare Adriatico – 2012-IT-91076-S" – Approfondimento delle analisi di trasporto solido e di sicurezza idraulica relative ai progetti di regimazione e sistemazione a corrente libera del fiume Po. (IR-E-2) SERVIZIO N. 1, da parte del R.T.I. tra la società ETATEC STUDIO PAOLETTI s.r.l. (mandataria), la società BETA STUDIO s.r.l. (mandante), la società BININI PARTNERS s.r.l. (mandante), la società RPA s.r.l. (mandante) e l'Associazione Professionale STUDIO PAOLETTI INGEGNERI ASSOCIATI (mandante). Di seguito vengono illustrati il percorso e le modalità di svolgimento delle prestazioni effettuate per le seguenti attività previste nell'incarico:

1. approfondimenti delle attuali condizioni idraulico-morfologiche del fiume Po;
2. estensione del progetto di sistemazione a corrente libera nel tratto compreso tra foce Mincio e l'incile Po di Goro;
3. progetto di regimazione del fiume Po tramite traverse di sostegno dei livelli idrici di magra e corrispondenti condizioni di sicurezza idraulica;
4. approfondimenti modellistici sul trasporto solido.

Il sistema di navigazione del Po è costituito dal corso principale del fiume, dai porti interni di Cremona e Mantova e dai loro collegamenti con i porti marittimi del mare Adriatico settentrionale. Il canale artificiale Fissero Tartaro Canal Bianco, tra Mantova e Venezia, scorre parallelamente al Po ed è collegato al Mincio e al suo polo logistico.

A valle della traversa di Isola Serafini il tratto fluviale oggetto del presente studio è tuttora un fiume a corrente libera in cui il livello delle acque è influenzato naturalmente dalle dinamiche idrauliche legate ai regimi di portata generati dalle vicende idrologiche dei bacini afferenti. Durante l'anno, soprattutto nel periodo estivo, il fiume presenta molti tratti non navigabili per periodi di significativa durata. Il presente progetto ha l'obiettivo di verificare soluzioni sia nel breve che nel lungo termine, per affrontare tale problematica insieme alle altre molteplici esigenze di riequilibrio morfoidraulico, ambientale, paesaggistico e di sicurezza nei periodi di piena.

Per far ciò occorre sviluppare e porre a confronto gli effetti e gli impatti indotti dai due progetti di sistemazione del fiume Po, già delineati da alcuni anni con differenziati livelli di progettazione, il Progetto di Regimazione mediante traverse di sostegno dei livelli in regime di magra e il Progetto di Sistemazione a corrente libera, non solo ai fini della navigabilità, ma anche come detto in relazione alla necessità di recupero morfologico dell'alveo inciso ed alla difesa idraulica nell'intero tratto compreso tra il Porto di Cremona e il Delta.

Il tratto fluviale oggetto del presente studio si estende tra Cremona e il Delta (circa 230 km) in corrispondenza dell'incile del Po di Goro. Essendo un tratto molto esteso, le caratteristiche del fiume sono molto variabili, sia per le differenze nella naturale dinamica e morfologia fluviale, sia per la presenza di interventi antropici spesso secolari legati alle più diverse finalità. Ad esempio, il tratto del fiume Po compreso tra Cremona e foce Mincio è stato oggetto di numerosi interventi strutturali volti a garantire una via navigabile a corrente libera, per consentire il collegamento, attraverso imbarcazioni, tra il porto di Cremona e il porto di Mantova.

Per quanto riguarda la proposta di Regimazione del fiume Po, gli esiti delle precedenti analisi sono contenute nello studio "Attività e studi propedeutici relativi alla regimazione del Po nel tratto

tra Cremona e foce Mincio – ipotesi, analisi e verifiche preliminari" (giugno 2009) e dello studio integrativo (novembre 2009), condotto da AIPo e Infrastrutture Lombarde. Le attività svolte da AIPo sono state sviluppate da alcune delle scriventi società membri del R.T.I..

Si ricorda che l'intervento di regimazione dei livelli del fiume Po, che si basa essenzialmente sulla realizzazione nel tratto di circa 180 km compreso tra Cremona e Gaiba (FE) di n. 5 traverse ad acqua fluente di regolazione e sostegno del livello idrico in condizioni di magra, nasce dalla constatazione di un avvenuto sconvolgimento ed approfondimento negli ultimi cinquant'anni dell'assetto del fondo del suo alveo, dovuto in gran parte ad una gestione incontrollata dei suoi sedimenti, a causa di penalizzazioni del trasporto solido e dragaggi, opportunamente soppressi nel periodo più recente, che hanno determinato l'asporto e l'erosione del fondo alveo di ingenti quantità di materiali inerti. L'abbassamento dell'alveo del fiume, che in alcuni punti ha superato i cinque metri, ha determinato diverse criticità, tra cui: un'alterazione dell'aspetto paesaggistico delle rive e delle fasce attigue; un abbassamento del livello delle falde idriche; difficoltà nella navigazione; l'indebolimento degli argini e scalzamento delle fondazioni dei ponti; l'impoverimento della vegetazione delle rive e delle golene; difficoltà per i prelievi ad uso irriguo e ad uso delle centrali termoelettriche.

Gli obiettivi generali del progetto di regimazione sono: garantire la possibilità di navigazione lungo il Po con navigli di classe V; il recupero, anche naturalistico, degli equilibri morfologici del fiume; la riqualificazione paesaggistica e ambientale, la produzione di energia idroelettrica, energia pulita e rinnovabile; il miglioramento delle possibilità di derivazione a fini irrigui; la stabilizzazione delle falde idriche; la disponibilità di risorsa idrica per contrastare la risalita del cuneo salino nei periodi di magra straordinaria nell'area del Delta.

Il progetto di sistemazione a corrente libera prevede, invece, la realizzazione di nuove opere trasversali (pennelli) o longitudinali (difese radenti), nonché l'abbassamento di opere esistenti per favorire la riattivazione delle aree lanchive retrostanti e la demolizione di opere trasversali esistenti (pennelli) non più funzionali, al fine di migliorare da un lato le condizioni di navigabilità, dall'altro le caratteristiche del complesso sistema ecofluviale con azioni che favoriscano la riapertura delle lanche.

Il presente studio si pone come obiettivo l'approfondimento dei suddetti studi e progetti riguardanti le due ipotesi progettuali, regimazione e sistemazione a corrente libera, in modo da poter giungere a realizzare uno studio preliminare di fattibilità che illustri le soluzioni per affrontare la navigabilità e il riassetto morfologico del Po nel breve/medio e lungo periodo.

Base fondamentale per i sopraccitati studi sono le conoscenze sperimentali attinenti la configurazione idromorfologica del Po. In proposito sono da ricordare le analisi geomorfologiche condotte da parte di alcuni degli scriventi nell'ambito dello studio effettuato per conto dell'Autorità di bacino del fiume Po "*Studio di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po*", stralcio confluenza Tanaro – confluenza Arda e stralcio confluenza Arda e l'incile del Po di Goro, e del successivo studio relativo all' "Aggiornamento delle analisi morfologiche e del bilancio del trasporto solido dell'asta del fiume Po da confluenza Stura di Lanzo all'incile del delta (periodo 2002 - 2005) e report di valutazione".

Le metodologie allora individuate, che sono qui nuovamente applicate in modo da conseguire risultati omogenei e intrinsecamente coerenti, si basano sulla seguente riflessione: essendo le caratteristiche del Po nel lungo tratto in esame molto variabili, sia per la naturale e complessa dinamica evolutiva e morfologia fluviale, sia per l'influenza a breve e lungo termine di molteplici interventi antropici localizzati e diffusi, l'interpretazione dei fenomeni evolutivi deve discendere prioritariamente dalla conoscenza fisico-sperimentale delle caratteristiche idromorfologiche fluviali e del territorio circostante, prima ancora dell'analisi condotta mediante una modellazione matematica. Infatti, solo con una metodologia di analisi del reale, quindi di tipo sperimentale, il più dettagliata possibile e strettamente ancorata alle informazioni disponibili o comunque desumibili dalle osservazioni di campo, dalla quale ottenere la migliore conoscenza "fisica" del fiume, è possibile poi poter sviluppare dei modelli coerenti con i fenomeni evolutivi in atto.

Il modello, che è appunto un modello, rappresenta la realtà solo sommariamente e solo per gli aspetti per i quali esso è costruito. D'altra parte la possibilità del modello di simulare scenari futuri diversi, sulla base di una buona calibrazione rispetto alle dinamiche evolutive passate e in atto,

rende lo stesso uno strumento fondamentale per cercare di stimare, sia pure in modo indicativo, l'effetto indotto dalla presenza di nuove opere sulla dinamica evolutiva e sulla morfologia fluviale.

In questa ottica le attività effettuate nell'ambito del presente studio comprendono:

- una presentazione generale delle caratteristiche peculiari del fiume nel tratto di interesse da Cremona e il Delta in corrispondenza dell'incile del Po di Goro (Cap. 3), in relazione ai contenuti degli studi condotti dall'Autorità di bacino del fiume Po nell'ambito del Programma Generale di Gestione dei sedimenti;
- le necessarie e rinnovate attività conoscitive di campo attinenti la configurazione delle forme di fondo, la granulometria dei sedimenti di fondo, la torbidità delle acque riferita al trasporto in sospensione (Cap. 4);
- l'analisi geomorfologica delle dinamiche evolutive che il Po ha presentato nel decennio 2005 – 2015 (Cap.4);
- l'implementazione di una modellistica bidimensionale a fondo fisso atta a riprodurre l'idrodinamica del Po in condizioni di piena (piena 2000 e piena PAI Tr200), per l'intero tratto di interesse da Cremona al Po di Goro, nel suo stato attuale (Cap. 5);
- l'analisi del progetto a sistemazione libera con la sua estensione nel tratto compreso tra foce Mincio e l'incile del Po di Goro (Cap. 6);
- l'approfondimento progettuale del progetto di regimazione con 5 traverse di sostegno dei livelli idrici di magra tra Cremona e Stienta (FE) (Cap. 7);
- la messa a punto di strumenti modellistici bidimensionali a fondo sia fisso che mobile, calibrati in funzione delle suddette conoscenze sperimentali, con i quali procedere alla ricostruzione delle dinamiche evolutive (Capp. 7 e 9);
- la stima con i suddetti modelli degli effetti indotti sulla dinamica sedimentologica e sul trasporto solido del Po e quindi dalle opere in alveo riferite ad entrambi i progetti qui analizzati e quindi anche, di riflesso, sui regimi del Delta del Po e del litorale adriatico (Cap. 9);
- analisi della possibile complementarietà delle opere di regimazione e di sistemazione a corrente libera (Cap. 8);
- l'analisi delle condizioni di navigabilità in relazione ai due assetti di progetto, regimazione e sistemazione a corrente libera, rispetto all'assetto attuale (Cap. 10);
- le specifiche per il modello fisico del fiume Po in relazione ai progetti di regimazione e di sistemazione a corrente libera (Cap. 11);
- l'approfondimento progettuale relativo alla realizzazione di una barriera antisale lungo il ramo del Po di Venezia, nei pressi di Pila (Cap. 12);
- le conclusioni dello studio, comprensive dell'analisi comparativa multi-obiettivo di entrambi i progetti di regimazione e di sistemazione a corrente libera (Cap. 13).

Naturalmente si tratta di analisi che devono essere anche riferite alla condizione attuale delle dinamiche morfologiche del Po, dettagliatamente indagate nei capitoli 3 e 4, caratterizzate da accentuate modificazioni d'alveo che ne hanno determinato un progressivo approfondimento e canalizzazione soprattutto nel tratto tra Cremona e foce Mincio. Ciò implica che le due suddette ipotesi progettuali devono confrontarsi anche con una situazione attuale piena di elevate criticità che comunque devono essere superate sia per conseguire le finalità strategiche programmate per il Po, sia per il definitivo soddisfacimento dei requisiti ambientali e di sicurezza delle Direttive europee 2000/60 e 2007/60.

Con le analisi multi-obiettivo conclusive si caratterizzano le diverse opzioni indagate con una visione integrata e complementare delle opere e dei sistemi di intervento, sia lungo l'asta fluviale, sia nel tempo per i programmi attuativi da definire secondo fasi e priorità di intervento, che rappresenta la giusta direzione per affrontare gli studi e i progetti aventi questa importanza e queste molteplici e interconnesse specificità.

2 DOCUMENTAZIONE CONSULTATA

Nello svolgimento dello studio sono stati consultati diversi documenti, tra cui:

- AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO (2011): "Progetto definitivo degli interventi relativi alla sistemazione a corrente libera del fiume Po nella tratta compresa tra Isola Serafini e foce Mincio per consentire il transito di una unità di navigazione della Va classe CEMT (MN-E-12/NI-1)"
- AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO: "Progetto preliminare di adeguamento delle condizioni di navigabilità dell'alveo di magra del fiume Po per navi di classe V - Revere – Ferrara"
- ARNI (1998): "Studio di fattibilità del sistema idroviario Padano-Veneto"
- ARPA Emilia Romagna - Servizio Idrometeorologico - Area Idrologia (dal 2005 al 2014): "Annali idrologici"
- AUTORITA' DI BACINO DEL FIUME PO (2005-2006): "Studio di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po" nel tratto confluenza Tanaro – confluenza Arda" e "Studio di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po nel tratto confluenza Arda - mare";
- AUTORITA' DI BACINO DEL FIUME PO (2007): "Aggiornamento delle analisi morfologiche e del bilancio del trasporto solido dell'asta del fiume Po da confluenza Stura di Lanzo all'incile del delta (periodo 2002 – 2005) e report di valutazione"
- AUTORITA' DI BACINO DEL FIUME PO (2004): "Catasto arginature maestre del fiume Po"
- AUTORITA' DI BACINO DEL FIUME PO (2007): "Rappresentazione delle condizioni di rischio residuale lungo l'asta del fiume Po da Torino al mare: sintesi delle conoscenze e report descrittivi"
- Consorzio Ferrara Ricerche e dell'Azienda Regionale per la Navigazione Interna (2007): "Studio di compatibilità degli interventi di progetto in alveo di Po per l'adeguamento delle condizioni di navigabilità dell'alveo di magra per navi di V classe europea nel tratto Palantone Occhiobello"
- DHI Water & Environment. 2002. Mike21C River Hydrodynamics and Morphology. DHI. Horsholm.
- DISTART dell'Università di Bologna per l'Autorità di bacino del fiume Po (2008): "Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta principale del fiume Po"
- MIKE by DHI (2014): "MIKE 21 C Curvilinear Model Scientific Documentation"
- MIKE by DHI (2014): "Water resources – River hydraulics and morphology - MIKE 21 C User Guide"
- Mosselman E., 1992. Mathematical modelling of morphological processes in rivers with erodible cohesive banks. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, 92(3). Delft University of Technology
- Regione Lombardia – AIPO – Infrastrutture Lombarde (2009): "Attività e studi propedeutici relativi alla regimazione del Po nel tratto tra cremona e foce Mincio: ipotesi, analisi e verifiche preliminari"
- Regione Lombardia – AIPO – Infrastrutture Lombarde (2009): "Attività e studi propedeutici relativi alla regimazione del Po nel tratto tra cremona e foce Mincio: ipotesi, analisi e verifiche preliminari - studi integrativi"
- SIMPO S.p.A. (1984): "Studio della formazione del Piano Generale della navigazione interna Padano-Veneta"
- Van Rijn, L.C., 1984a: "Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 10.
- Van Rijn, L.C., 1984b: "Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 11.
- Van Rijn, L.C., 1995: "Laboratory, field and mathematical modelling of sand transport in rivers." Invited lecture, colloquium IOWA University, IOWA, USA.
- http://www.leovanrijn-sediment.com/index.html

3 CARATTERISTICHE PECULIARI DEL SISTEMA FLUVIALE DEL FIUME PO

3.1 CONDIZIONI IDRAULICO-MORFOLOGICHE DEL FIUME PO DESUNTE DAGLI STUDI DELL'AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO

3.1.1 Cenni preliminari relativi alla trasformazione del Po da alveo naturale ad alveo navigabile: "come era il Po" e "come è oggi il Po"

Il tratto di alveo in studio è stato oggetto in passato di numerosi interventi di sistemazione, volti soprattutto a modificare l'assetto dell'alveo di magra da Cremona a foce Mincio, al fine di renderlo navigabile. Tale processo di sistemazione fu iniziato nel 1919, ma i lavori ebbero un forte sviluppo nel decennio 1955-1964, conseguendo verso il 1970 un grado di sistemazione pressoché definitivo. Il progetto era impostato in modo da garantire fondali minimi di 2.50 m utili per la navigazione, trasformando l'alveo naturale e pluricursale in un alveo di magra regolato di larghezza variabile fra i 250 e 300 m, tramite la costruzione di pennelli ed opere in cassero destinate a costituire le nuove linee di sponda.

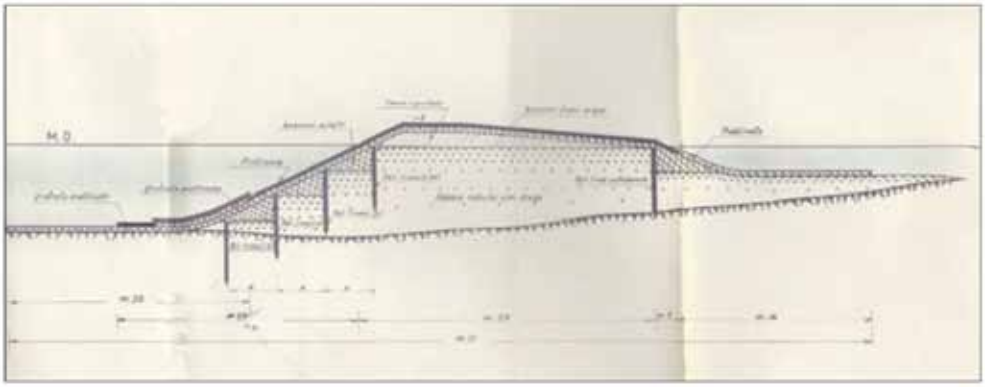


Figura 1 - Sezione tipologica di un pennello

Nelle figure seguenti si riporta il confronto fra l'assetto planimetrico del Po prima degli interventi di sistemazione per la via navigabile, dedotti dalle cartografie di Brioschi (1873) e l'assetto aggiornato al 2005, in alcune zone interne al tratto in studio; da tale confronto si può facilmente osservare come le opere di navigazione realizzate nel ventesimo secolo abbiano indotto, a fronte di qualche miglioramento della navigabilità, pesanti alterazioni all'assetto morfologico dell'alveo. A valle di foce Mincio l'assetto planimetrico dell'alveo presenta una ridotta mobilità dal 1873 e oggi, dovuta alla presenza di un sistema arginale, già presente a fine '800, prossimo all'alveo di magra.

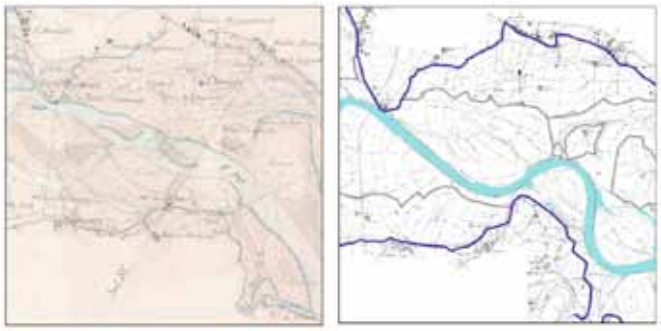


Figura 2 - Confronto 1873 – 2005 a monte di foce Taro

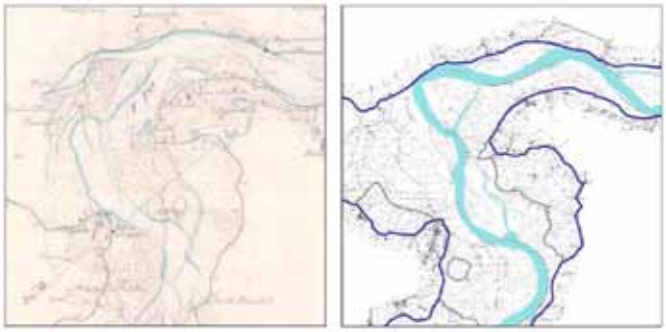


Figura 3 - Confronto 1873 – 2005 a foce Oglio



Figura 4 - Confronto 1873 – 2005 a monte di foce Mincio

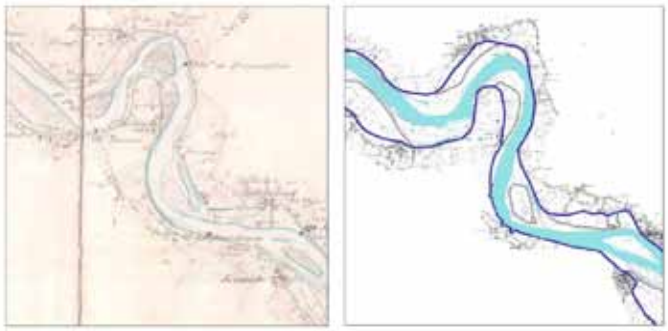


Figura 5 - Confronto 1873 – 2005 tra Bergantino e Sermide

3.1.2 Caratteristiche idrologico-idrauliche del tratto in studio

Di seguito si riportano i valori delle portate medie annue lungo l'asta del Po in corrispondenza degli idrometri ufficiali posti internamente al tratto in studio (tra parentesi si riporta la superficie del bacino idrografico sotteso):

- Po a Cremona (50'726 km2): 1'109 m3/s;
- Po a Boretto (55'183 km2): 1'200 m3/s;
- Po a Borgoforte (62'450 km2): 1'369 m3/s;
- Po a Sermide (68'724 km2): 1'343 m3/s;
- Po a Pontelagoscuro (70'091 km2): 1'497 m3/s;

Nelle figure successive si riportano le curve di durata delle portate del fiume Po in alcune delle suddette sezioni.

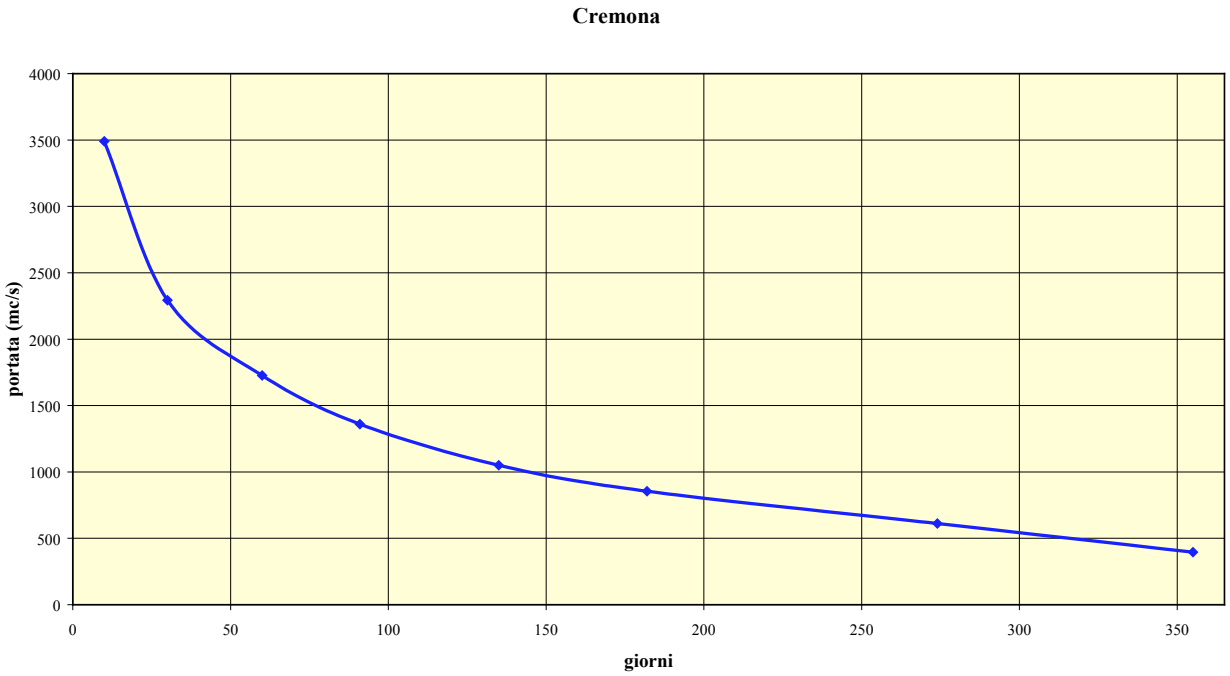


Figura 6 - Curva di durata delle portate a Cremona (Fonte: Arpa)

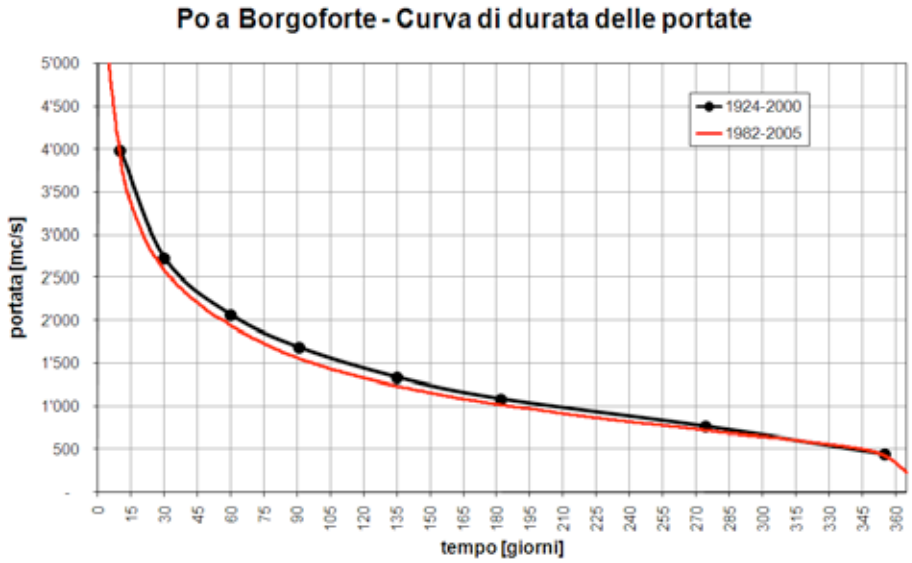


Figura 7 - Curva di durata delle portate a Borgoforte

Nell'ambito delle attività condotte nello "***Studio di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po***" dell'Autorità di bacino del fiume Po, è stato implementato un modello idrodinamico monodimensionale a fondo fisso (MIKE 11 del DHI), con il quale è stato caratterizzato l'assetto idraulico attuale dell'alveo inciso del fiume Po. In particolare, attraverso tale modello è stato possibile individuare, tra l'altro, i seguenti parametri:

- la portata di sommergenza delle forme di fondo presenti all'interno dell'alveo inciso;
- la capacità idraulica dell'alveo inciso;
- i tiranti e le velocità medie per diversi valori di portata;

la portata di sommergenza dei pennelli di navigazione.

Per il tratto compreso tra Cremona e foce Mincio, in base a quanto descritto in precedenza, è molto importante verificare l'influenza che le opere di navigazione hanno sui deflussi in alveo. Le analisi idrauliche condotte hanno permesso di definire le portate di sommergenza dei pennelli di navigazione.

L'alveo navigabile era stato a suo tempo dimensionato per contenere una portata di 400 m3/s, corrispondente alla magra ordinaria. Attualmente, come si può notare dal grafico sottostante, il valore della portata di sommergenza dei pennelli è ovunque ben superiore, o al limite uguale a 2000 m3/s. Nel tratto fino alla confluenza del T. Enza (sezione 38) il valore della portata è praticamente sempre pari o superiore a 4'000 m3/s (in alcuni casi superiore a 5'000 – 6'000 m3/s), corrispondente alla piena ordinaria ovvero all'evento che si manifesta mediamente una volta ogni due anni. Tale situazione non apporta nessun vantaggio alla funzionalità della linea navigabile ma, viceversa, impedisce nella maggior parte degli eventi medio-grandi di piena l'espansione nelle aree golenali e la riattivazione delle lanche.

Tale circostanza è legata all'abbassamento del fondo alveo, in atto soprattutto a partire dagli anni '50 – '60.Tale abbassamento, come più oltre descritto, è legato soprattutto a tre fenomeni ben distinti:

- la presenza dello sbarramento e della centrale idroelettrica di Isola Serafini;
- le estrazioni di inerti;
- la presenza delle opere di navigazione.

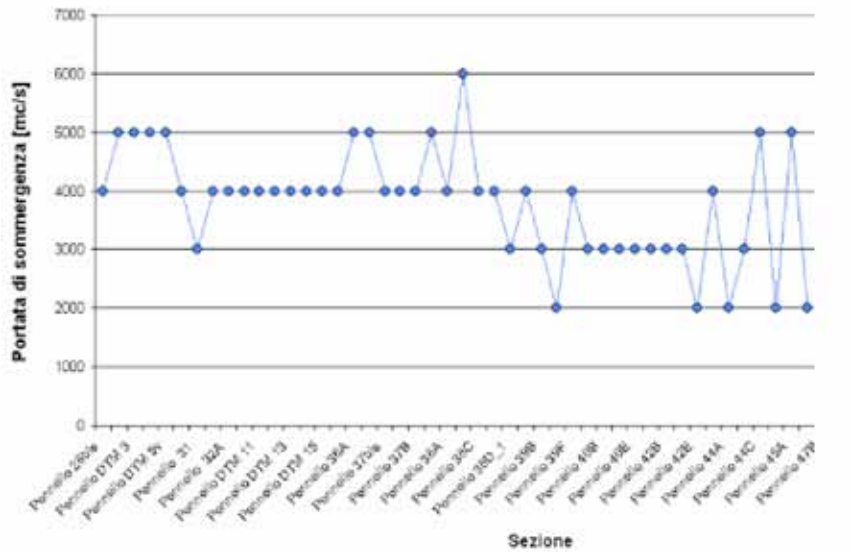


Figura 8 - Portata di sommergenza dei pennelli

In particolare, i pennelli di navigazione hanno comportato un effetto di canalizzazione dell'alveo, costringendo la portata a defluire principalmente all'interno dell'alveo navigabile. Essendo le sponde "corazzate" da opere di difesa (pennelli e curve di navigazione), l'unico elemento "non protetto" dall'azione della corrente è il fondo alveo, che viene sollecitato da dinamiche che generano ulteriore erosione. A tergo dei pennelli si sono poi depositate delle barre di notevoli dimensioni, che di fatto hanno ulteriormente ridotto l'ampiezza dell'alveo, incrementando la canalizzazione e quindi l'azione erosiva nei confronti del fondo alveo. E' evidente che tale processo finisce per autoalimentarsi se non si interviene attraverso azioni strutturali di modifica del sistema delle opere dettagliatamente indicate nel Programma di Gestione dei Sedimenti dell'Autorità di Bacino del Po (abbassamento dei pennelli di navigazione ed eventuale riapertura di lanche a tergo degli stessi attualmente interrate).

Osservando ad esempio i valori delle portate registrate presso l'idrometro di Boretto, si nota come l'attuale valore di portata di sommergenza dei pennelli sia stata superato per pochi giorni all'interno dell'intero periodo di analisi (1982 – 2005). Con riferimento all'anno medio, la portata di 4'000 – 5'000 m3/s viene superata all'incirca per 10 giorni all'anno. Pertanto, le aree poste a tergo dei pennelli risultano praticamente escluse dalle dinamiche evolutive ordinarie che quindi interessano prevalentemente solo la porzione di alveo destinato alla navigazione.

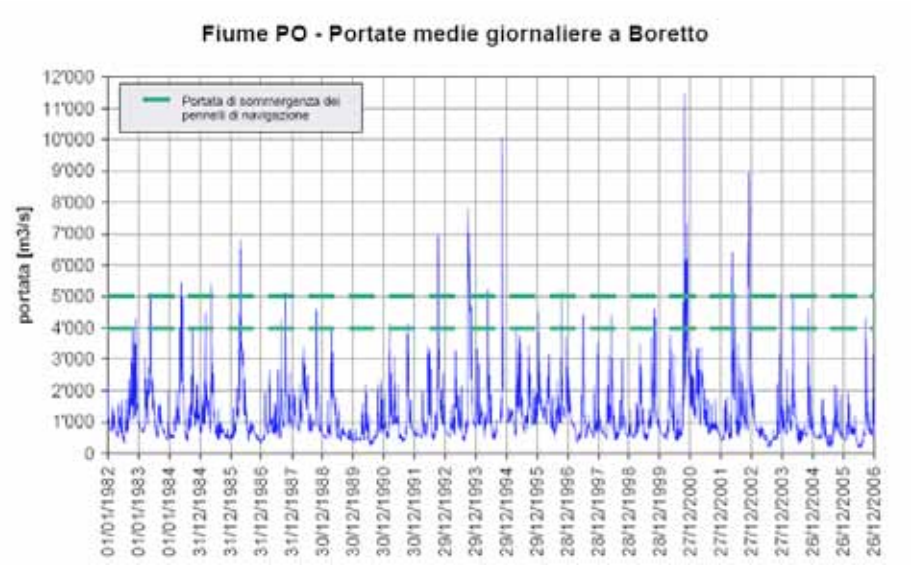


Figura 9 - Andamento della portata in Po rispetto alla portata media di sommergenza dei pennelli di navigazione tra Adda e Enza

Come accennato in precedenza, attraverso il sopra citato modello idraulico specificatamente implementato è stato possibile determinare un'altra grandezza idraulica molti significativa per comprendere le dinamiche in atto nel tratto in studio: la capacità idraulica dell'alveo inciso. Come si può ben notare dal grafico riportato di seguito, lungo il tratto in oggetto i valori di capacità idraulica dell'alveo inciso sono piuttosto elevati. Anche questo è dovuto fondamentalmente all'abbassamento del fondo alveo che si è verificato dal 1954 in poi per l'intero tratto in studio, con dinamiche molto più accentuate nei primi 25 anni (dal 1954 al 1979), in seguito all'azione combinata dei tre effetti già elencati in precedenza.

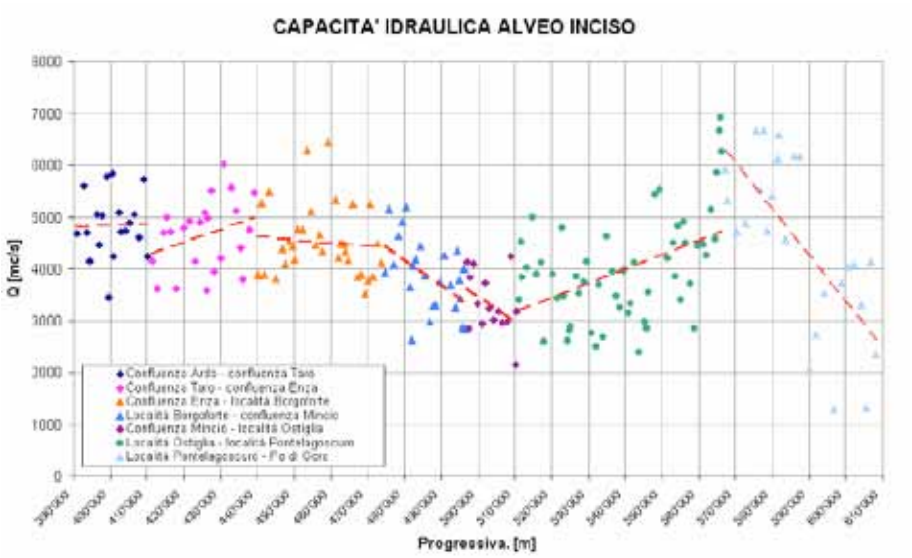


Figura 10 - Andamento della capacità idraulica dell'alveo inciso

3.1.3 Caratteristiche geomorfologiche del tratto in studio e tendenze evolutive in atto relativamente alle forme di fondo (barre e sponde)

Nell'ambito dello studio di "Aggiornamento delle analisi morfologiche e del bilancio del trasporto solido dell'asta del fiume Po da confluenza Stura di Lanzo all'incile del delta (periodo 2002 - 2005) e report di valutazione" dell'Autorità di bacino del fiume Po, sono stati effettuati campionamenti ed analisi granulometriche e litologiche dei sedimenti su circa 170 campioni, distribuiti lungo tutto l'alveo.Tali analisi hanno permesso di caratterizzare il sedimento presente lungo il Po con riferimento al fondo alveo, alle barre e alle sponde.

Le forme di fondo (barre) sono costituite prevalentemente da sabbie; le sponde sono impostate in depositi sabbiosi molto fini, limosi o in limi sabbiosi (specialmente al piede delle sponde). La golena è relativamente ampia e, verso la zona terminale, lievemente pensile.



Figura 11 - Depositi sabbiosi presenti nell'ansa meandrica di Isola Serafini

Più in dettaglio, la parte iniziale, all'incirca fino a confluenza Enza, presenta sponde incise in un "materasso" di depositi prevalentemente sabbiosi. L'alveo di magra appare invece impostato in depositi sabbioso-ghiaiosi; in superficie, sull'interfaccia con la corrente idrica, si riscontra, in generale, una maggiore concentrazione ghiaiosa a causa del fenomeno di "corazzamento", dovuto al dilavamento più o meno spinto della frazione sabbiosa.

A valle dello sbarramento di Isola Serafini la presenza delle suddette ghiaie è riscontrabile solo nel segmento fluviale compreso tra confluenza Taro e confluenza Enza. Questi depositi più grossolani possono essere messi in relazione con gli apporti appenninici attuali. In merito, si consideri che in questo tratto il fiume Po scorre in prossimità del margine collinare. Gli affluenti appenninici, pertanto, sfociano direttamente nel Po senza l'interposizione di una apprezzabile piana alluvionale in cui "abbandonare" parte del carico solido grossolano. La presenza di depositi relativamente grossolani in alveo, all'incirca fino a confluenza Enza, definisce, quindi, la distanza alla quale il Po riesce attualmente a mobilizzare il materiale ghiaioso, immesso dai suddetti affluenti. La circostanza che le ghiaie si trovino solo nell'alveo di magra e non nelle forme di fondo (barre) appare dovuto al fatto che nell'alveo inciso (qui particolarmente canalizzato) si "concentra" il filone principale della corrente dotato di velocità ed energia relativamente più elevati. Inoltre, le dimensioni granulometriche di tali depositi sono tali da poter essere movimentate sul fondo essenzialmente per "trascinamento". Le sabbie, invece, oltre che essere trasportate per "trascinamento" (nelle frazioni più grossolane), possono subire un trasporto anche in sospensione. Le sabbie rappresentano, pertanto, i depositi della fase decrescente e della "coda" dell'evento di piena.



Figura 12 - Depositi sabbioso-ghiaiosi, corazzati, presenti nell'alveo di magra tra confluenza Parma e confluenza Enza.

La sola eccezione alla condizione sopra esposta, in cui non sono state riscontrate le "ghiaie" in alveo, è rappresentata dal segmento fluviale situato immediatamente a valle del canale di restituzione dello sbarramento di Isola Serafini fino all'incirca oltre Cremona. In questo segmento, caratterizzato da un forte approfondimento della quota di fondo alveo negli ultimi 50 anni circa, il substrato ghiaioso, di chiara pertinenza litologica appenninica, si rinviene alla base dei depositi sabbiosi di barra ad una quota maggiore di quella del fondo alveo attuale. Tale condizione evidenzia la considerazione che detti depositi siano sospesi rispetto alla quota di fondo alveo ed essendo riscontrabili sulle barre di entrambe le sponde ne deriva che essi possano essere stati incisi ed asportati dai processi erosivi responsabili dell'abbassamento del fondo alveo. Questo tratto, come già sopra accennato, è stato oggetto della realizzazione di interventi volti a garantire la navigazione (curve di navigazione e pennelli). L'analisi della evoluzione morfologica dell'alveo inciso nel periodo successivo o contestuale alla realizzazione delle opere di navigazione ha confermato che l'evoluzione geomorfologica e sedimentologica dell'alveo inciso nel tratto navigabile è stata fortemente condizionata dalle suddette opere. Infatti, la correzione planimetrica dell'alveo ad opera dei suddetti interventi, ha comportato una progressiva canalizzazione dell'alveo di magra, a seguito della contestuale sedimentazione "forzata" a tergo dei pennelli di navigazione.

La presenza delle opere di difesa radente sulla sponda opposta, concava, ne avrebbe impedito la naturale divagazione, costringendo il corso d'acqua ad una "canalizzazione" progressiva con contestuale riduzione della superficie dell'alveo di magra. Tale fenomeno si è poi amplificato a causa dell'abbassamento del fondo. L'evoluzione sopra esposta è ben sintetizzata nelle seguenti figure.

L'analisi sopra esposta evidenzia come il Po, nel tratto compreso tra Cremona e foce Mincio, abbia raggiunto la configurazione morfologica e sedimentologica attuale già a partire dal 1988. Tra il 1988 ed oggi, l'evoluzione ha comportato prevalentemente il colmamento dei canali a tergo dei pennelli e la deposizione di barre laterali.

Nel dettaglio, l'intero tratto in studio può essere suddiviso in cinque tratti omogenei:

1. da confluenza Adda a confluenza Taro;
2. da confluenza Taro a confluenza Oglio;
3. da confluenza Oglio alle confluenze Mincio – Secchia;
4. dalle confluenze Mincio – Secchia a Pontelagoscuro;
5. da Pontelagoscuro all'incile del Po di Goro.

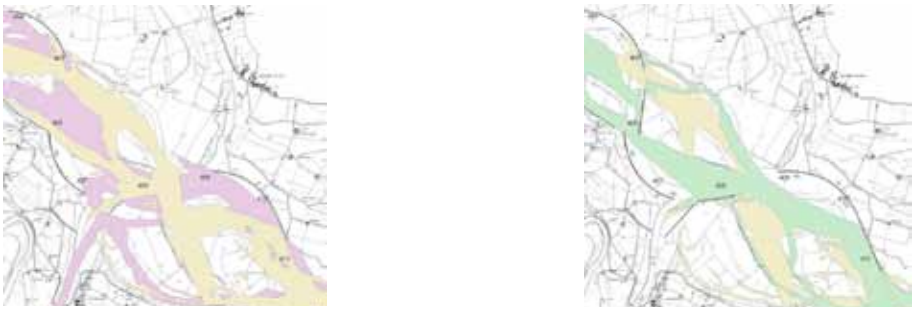


Figura 13 - Confronto alveo di magra 1931 (rosa) – 1953 (giallo) e confronto alveo di magra 1953 (giallo) – 1967 (verde)

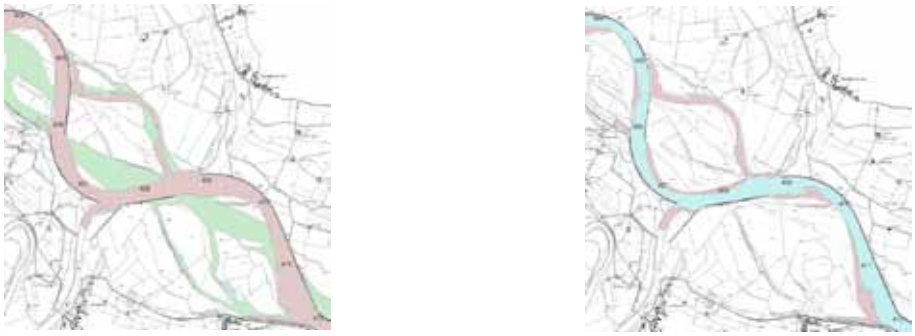


Figura 14 - Confronto alveo di magra 1967 (verde) – 1988 (rosso) e confronto alveo di magra 1988 (rosso) – 2005 (azzurro)

Tratto 1 (da confluenza Adda a confluenza Taro)

Il tratto 1 (da confluenza Adda a confluenza Taro) risente fortemente della dinamica indotta dalla presenza dello sbarramento di Isola Serafini a monte, nonché della presenza di consistenti opere di regimazione, atte a mantenere condizioni favorevoli alla navigazione. L'alveo è monocursale sinuoso, incassato in depositi prevalentemente sabbiosi da fini a molto fini, limosi, costituenti le sponde incise. Le forme di fondo (barre) sono costituite prevalentemente da sabbie. Si riscontra la presenza di un "substrato" sabbioso – ghiaioso nell'alveo di magra sommerso. Nonostante la litologia prevalente nelle forme di fondo sia data da sabbie, le barre sono caratterizzate da altezza relativamente elevata e fronti inclinati. Si evidenzia un generale stato di erosione in alveo, a causa del quale sarebbe stato raggiunto localmente il substrato grossolano, corazzato, attualmente affiorante sul fondo alveo. Il bilancio delle forme di fondo (sponde e barre) "erosione – deposito" è fortemente negativo, pari a -14,5 Mm3 nel periodo 1982 – 2005 (forme di fondo in deciso deposito). Tale tendenza appare condizionata, nel medio e lungo periodo, essenzialmente dalla dinamica indotta dall'esercizio dello sbarramento di Isola Serafini, sulla sedimentazione all'interno del meandro stesso e sull'erosione di fondo alveo, nonché dalla presenza dei pennelli di navigazione, che costituiscono delle vere e proprie "trappole" sedimentarie.

Tratto 2 (da confluenza Taro a confluenza Oglio)

Il tratto 2 (da confluenza Taro a confluenza Oglio) è in continuità geomorfologica con il precedente. Infatti, anche questo tratto risente fortemente della dinamica indotta dalla presenza delle opere di navigazione. L'alveo è monocursale, da sinuoso a localmente meandriforme, incassato in depositi prevalentemente sabbiosi da fini a molto fini, limosi, costituenti le sponde incise. Le forme di fondo (barre) sono costituite prevalentemente da sabbie. La presenza di un litofacies sabbioso - ghiaiose nell'alveo di magra sommerso si riscontra solo fino a confluenza Enza (progressiva 437 circa). A valle di confluenza Enza il tratto si differenzia dai precedenti per la mancanza di depositi sabbioso-ghiaiosi nell'alveo di magra sommerso. Pertanto, a partire da confluenza Enza sponde, alveo e forme di fondo risultano impostati omogeneamente in depositi prevalentemente sabbiosi e sabbioso-limosi. Il bilancio delle forme di fondo (sponde e barre) "erosione – deposito" è fortemente negativo, pari a -26,3 Mm3 nel periodo 1982 – 2005 (forme di fondo in condizioni di deposito generalizzato). La condizione di deposito generalizzato è da ricondurre alla risposta del sistema fluviale ai pennelli di navigazione, costituenti delle vere e proprie "trappole" sedimentarie.

Tratto 3 (da confluenza Oglio alle confluenze Mincio - Secchia)

Il tratto 3 (da confluenza Oglio alle confluenze Mincio - Secchia) costituisce la parte terminale del tratto fluviale navigabile. L'alveo, complessivamente monocursale, presenta una prima parte rettilineo-sinuosa (40% circa del tratto) ed una seconda parte meandriforme. L'evoluzione meandrica è "bloccata" dalla presenza di opere di difesa radente e da pennelli di navigazione (come avviene nei tratti descritti precedentemente). L'alveo è incassato in depositi prevalentemente sabbiosi da fini a molto fini, limosi, costituenti le sponde incise. Le forme di fondo (barre) ed il fondo alveo sono costituiti prevalentemente da sabbie. Il bilancio delle forme di fondo (barre e sponde) "erosione – deposito" è negativo, pari a -2,2 Mm3 (forme di fondo in condizioni di deposito generalizzato, ma in rapporto minore rispetto al tratto precedente). Anche in questo tratto la condizione di deposito generalizzato è da ricondurre alla risposta del sistema fluviale ai pennelli di navigazione, seppur di entità minore rispetto ai tratti più a monte. Si è detto, infatti, che la configurazione morfologica dell'alveo inciso, nel tratto fluviale navigabile, è il risultato di una serie di azioni correttive esercitate dalle opere di navigazione; azioni che a partire dall'inizio degli anni '50 si sono esplicate attraverso il trattenimento di sedimenti a tergo dei pennelli, con contestuale canalizzazione dell'alveo di magra, il quale, già dal 1988, aveva sostanzialmente raggiunto l'assetto attuale. Successivamente a tale data, le uniche modificazioni significative sono rappresentate da ulteriori depositi nei canali a tergo dei pennelli e nelle barre longitudinali. Va da sé che negli ultimi 50 anni il comportamento del corso d'acqua nel tratto navigabile, per quanto attiene le forme di fondo, è stato indirizzato al deposito.

Tratto 4 (dalle confluenze Mincio – Secchia a Pontelagoscuro)

Il tratto 4 (dalle confluenze Mincio – Secchia a Pontelagoscuro) costituisce la parte di alveo fluviale situato immediatamente a valle del tratto fluviale navigabile e immediatamente a monte dell'incile del delta. Il corso d'acqua assume progressivamente una configurazione "differenziata" attraverso le seguenti caratteristiche morfologiche: 1) l'alveo di magra tende ad ampliarsi e ad assumere un andamento progressivamente (verso valle) pluricursale, con contestuale formazione di numerose barre longitudinali (isole), alcune delle quali molto estese e persistenti; 2) la presenza locale di pennelli di regimazione ha comportato, nel tempo, la chiusura di alcuni canali laterali "forzando", localmente, una configurazione prevalentemente monocursale; 3) in planimetria l'alveo presenta alternanze di tratti meandrici o sinuosi ad altri rettilinei. Il bilancio delle forme di fondo (barre e sponde) "erosione – deposito" è positivo, pari a 4,1 Mm3 (forme di fondo in condizioni di erosione). Si inverte il trend di bilancio riscontrato nei tratti precedenti, navigabili. Si segnala inoltre che il 50% circa del materiale complessivamente eroso dalle sponde e dalle barre, nel periodo 1982-2005, risulta essere stato mobilizzato in condizioni di regime ordinario (32% nel tratto precedente). Considerato che il 57% del volume di erosione è a carico delle forme di fondo (barre), tale dato conferma una netta inversione di tendenza rispetto ai tratti 1, 2 e 3, verso una maggiore sensibilità idraulica in condizioni di regime ordinario, una maggiore dinamicità interna ed una maggiore "naturalità geomorfologica". Le modificazioni delle forme di fondo appaiono infatti condizionate in eguale misura dal regime ordinario e straordinario.

Tratto 5 (compreso tra Pontelagoscuro e la diramazione del Po di Goro)

Il tratto 5 (compreso tra Pontelagoscuro e la diramazione del Po di Goro) costituisce l'incile del delta, fino alla diramazione del canale distributore denominato "Po di Goro". L'alveo si restringe e si canalizza entro le arginature maestre, relativamente prossime alla sponda incisa (localmente in froldo). La golena è relativamente stretta e fortemente pensile. La dinamica relativa alle forme di fondo perde importanza rispetto a quella che caratterizza l'alveo canalizzato. In planimetria l'alveo presenta una configurazione prevalentemente rettilineo-sinuosa, monocursale. L'alveo è incassato in depositi prevalentemente limosi e limoso-sabbiosi, costituenti le sponde incise. Le forme di fondo (barre) ed il fondo alveo sono costituiti prevalentemente da sabbie fini, sabbie limose e limi. Il bilancio delle forme di fondo (barre e sponde) "erosione – deposito" è negativo, pari a -3,7 Mm3 (forme di fondo in condizioni di deposito generalizzato). I volumi movimentati evidenziano una forte diminuzione dell'importanza dei processi relativi alla dinamica delle forme di fondo, in accordo con il carattere fortemente canalizzato del tratto in esame (canale deltizio distributore). Infatti, praticamente tutto il materiale complessivamente eroso dalle sponde e dalle barre risulta essere stato mobilizzato in condizioni di regime straordinario.

3.1.4 Analisi delle tendenze evolutive del fondo alveo

L'analisi delle tendenze evolutive del fondo alveo è stata effettuata nell'ambito degli studi condotti per conto dell'Autorità di bacino del fiume Po utilizzando i rilievi topografici condotti da AIPo in diversi periodi. Confrontando tra loro le sezioni rilevate negli stessi punti, in anni differenti, è stato possibile analizzare le dinamiche evolutive in atto nel fondo alveo. Per determinare le linee evolutive che hanno caratterizzato l'evoluzione del fondo alveo lungo il corso del fiume Po, è stata applicata una metodologia basata essenzialmente sul confronto tra i profili di pelo libero di magra in diverse epoche. Questi profili conducono ad una rappresentazione idraulica abbastanza rappresentativa per lo scopo di cui sopra, dal momento che il pelo libero si dispone sempre al di sopra delle diverse irregolarità del fondo e con quote idriche sempre decrescenti verso valle. Per ogni campagna di rilievo si è determinato il profilo di pelo libero associato ad una portata ridotta (100 m3/s), ottenuto attraverso un modello di calcolo idrodinamico a fondo fisso del fiume Po (modulo HD del codice di calcolo MIKE 11 del Danish Hydraulic Institute), implementato con le sezioni ricavate dai rilievi AIPO. I profili così individuati sono stati definiti come "profili di fondo medio", in quanto forniscono l'andamento del pelo libero che si forma in funzione della morfologia media del fondo dell'alveo. Dal confronto fra i diversi profili di fondo medio, associati ai diversi passi temporali posti all'interno del periodo di analisi, si è determinata l'evoluzione in atto nel fondo alveo, individuando quindi i tratti che sono soggetti a fenomeni di sovralluvionamento o di erosione, oppure quei tratti che risultano essere sostanzialmente stabili.

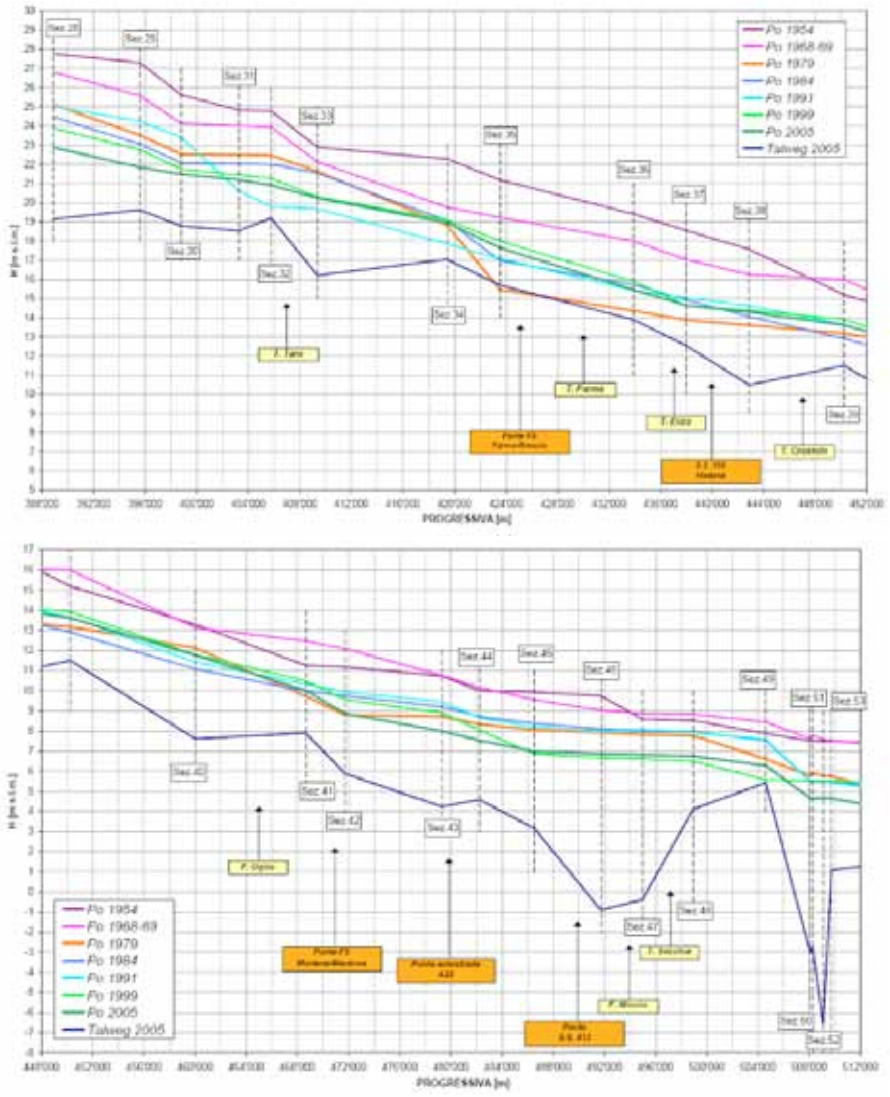


Figura 15 - Profili di fondo medio multitemporali 1979, 1999 e 2005

Dall'analisi dei profili sopra riportati, considerando il tratto in studio compreso tra Cremona e il Po di Goro, si osserva:

- nel tratto da Isola Serafini fino a monte di foce Parma, il fondo medio dell'alveo è caratterizzato da un continuo processo di erosione del fondo medio dell'alveo, soprattutto nel tratto tra foce Adda e foce Arda;
- tra foce Parma e foce Oglio si è verificato un innalzamento delle quote di fondo tra il 1979 e il 1999; successivamente si è verificata una sostanziale stabilità;
- tra foce Oglio e foce Mincio è verificato nell'intero periodo 1979 – 2005 un abbassamento delle quote di fondo medio;
- il tratto a valle di Isola Serafini, fino a monte di foce Parma, è caratterizzato da un continuo processo di erosione del fondo medio dell'alveo, soprattutto nel tratto tra foce Adda e foce Arda. Tale dinamica evolutiva è legata alla presenza dello sbarramento di Isola Serafini, alla presenza delle opere di navigazione e alle attività estrattive condotte prima degli anni '80;
- nel tratto tra foce Parma e foce Oglio si è verificato un innalzamento delle quote di fondo, soprattutto nel periodo tra il 1979 e il 1999;
- tra foce Oglio e Bergantino (MN) si è verificato nell'intero periodo 1979 – 2005 un abbassamento delle quote di fondo medio;
- il tratto tra Bergantino (MN) e Pontelagoscuro (FE) è caratterizzato da condizioni di sostanziale stabilità;
- a valle di Pontelagoscuro (FE) il fondo alveo ha subito nell'intero periodo tra il 1979 e il 2005 un progressivo innalzamento, correlato sia all'azione di rigurgito ad opera del mare, sia all'apporto solido da monte in occasione delle tre piene, 1994, 2000 e 2002.

La determinazione delle tendenze evolutive in atto nel fondo alveo può essere condotta anche attraverso l'analisi delle altezze idrometriche minime annue registrate. Si ritiene che, in generale, le variazioni di livello in periodi tra loro molto ravvicinati (qualche anno) siano verosimilmente correlate alle differenze tra le portate di magra, mentre le variazioni di livello in periodi prolungati (decine di anni) siano correlate ad una variazione della morfologia dell'alveo di magra.

Di seguito si riportano le letture idrometriche (altezza idrica rispetto allo "0" idrometrico) delle magre annuali (una nel periodo autunno-inverno e una nel periodo primavera-estate) registrate presso le stazioni di misura Cremona (dal 1868 al 2014) e Boretto (dal 1868 al 2014). Essendo il numero degli idrometri abbastanza contenuto rispetto all'estensione del Po, le tendenze derivanti dall'analisi dell'andamento dei livelli di magra, possono essere considerate solo per i tratti di fiume prossimi agli idrometri stessi.

In generale si osserva una sostanziale invariabilità dei livelli di magra fino all'incirca al 1960, dopodiché i livelli si sono ridotti notevolmente fino al 1990. Dopo il 1990 il fenomeno di abbassamento dei livelli di magra si è generalmente attenuato, fatta eccezione per i livelli relativi alle magre estive degli anni 2003, 2005 e 2006, i quali sono però correlati ad eventi di magra del tutto eccezionali. Il fenomeno di abbassamento dei livelli tra il 1960 e il 1990 testimonia l'abbassamento generalizzato del fondo alveo del Po che si è verificato in tale periodo.

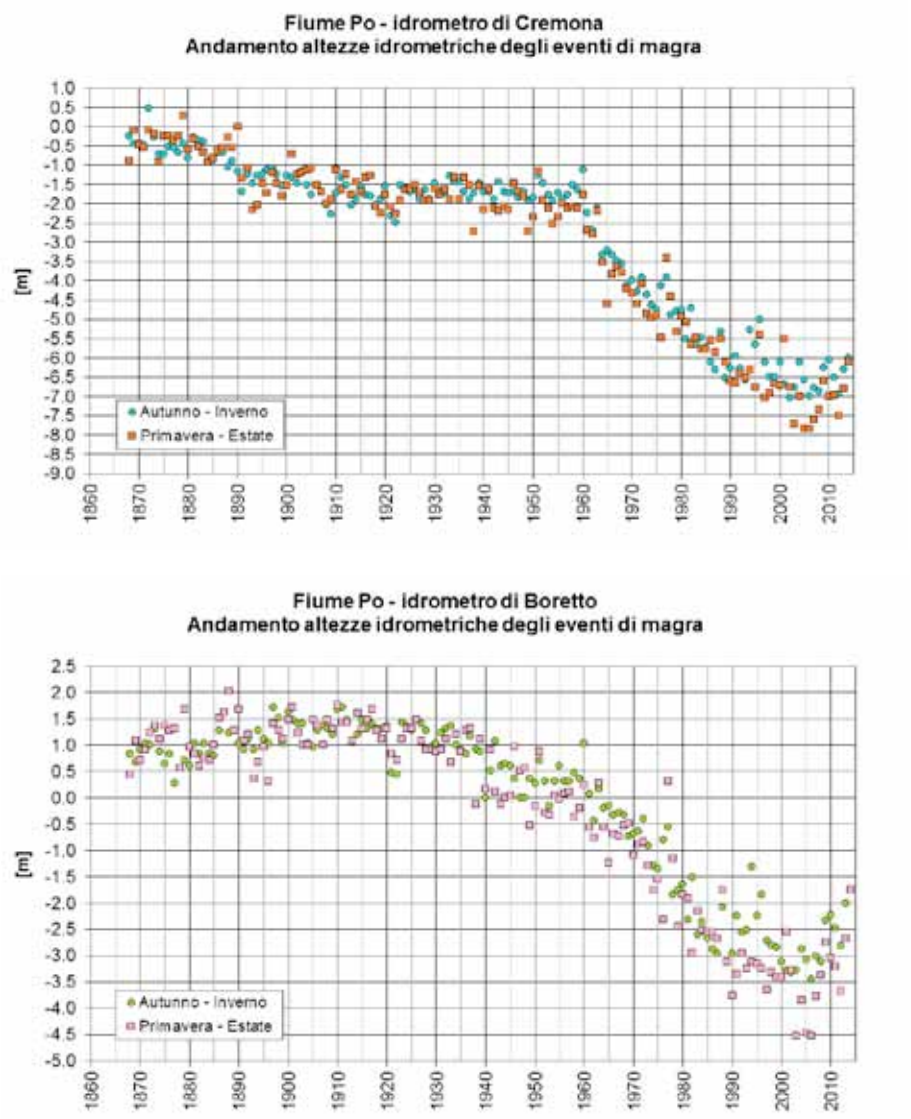


Figura 16 - Andamento delle altezze idrometriche degli eventi di magra in corrispondenza degli idrometri di Cremona e Boretto

Il fatto che dopo il 1990 la tendenza all'abbassamento risulti essere più contenuta rispetto al periodo precedente, è dovuta essenzialmente ai seguenti fattori:

1. significativa riduzione delle escavazioni dall'alveo inciso;

2. maggior apporto solido in seguito agli eventi di piena straordinari che si sono verificati (1994, 2000 e 2002).

La dinamica erosiva in atto a valle di Isola Serafini è legata alla presenza dello sbarramento, alla presenza delle opere di navigazione e alle attività estrattive condotte prima degli anni '80. Indubbiamente lo sbarramento e la gestione della centrale idroelettrica determinano un rallentamento della corrente a monte e quindi condizioni medie che favoriscono il deposito sul fondo, mentre a valle dello sbarramento l'insieme di diversi fattori (deflusso "povero" di sedimento, sponde "corazzate" dalle opere di difesa, presenza di opere di navigazione che inducono l'incanalamento della corrente fluviale di morbida e di piena ordinaria nell'alveo di magra) favoriscono l'erosione del fondo alveo. L'insieme di queste azioni ha comportato, verosimilmente, la progressiva asportazione locale del substrato grossolano, corazzato, attualmente "sospeso" di qualche metro rispetto al fondo alveo. Attualmente l'erosione del fondo alveo interessa depositi prevalentemente sabbiosi, relativamente antichi.

4 APPROFONDIMENTI DELLE ATTUALI CONDIZIONI IDRAULICO-MORFOLOGICHE DEL FIUME PO

4.1 PREMESSA

I risultati delle analisi geomorfologiche condotte nell'ambito dello studio effettuato per conto dell'Autorità di bacino del fiume Po "*Studio di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po*", stralcio confluenza Tanaro – confluenza Arda e stralcio confluenza Arda e l'incile del Po di Goro, e del successivo studio relativo all'"Aggiornamento delle analisi morfologiche e del bilancio del trasporto solido dell'asta del fiume Po da confluenza Stura di Lanzo all'incile del delta (periodo 2002 - 2005) e report di valutazione", hanno consentito di suddividere il segmento fluviale oggetto del presente studio in sei "tratti omogenei", contraddistinti da condizioni litologiche, geomorfologiche e sedimentologiche complessivamente omogenee. Essi sono (secondo le codifiche dello studio dell'AdBPo):

- "tratto omogeneo D": dallo sbarramento di Isola Serafini fino a confluenza Adda;
- "tratto omogeneo E": da confluenza Adda fino a confluenza Taro;
- "tratto omogeneo F": da confluenza Taro fino a confluenza Oglio;
- "tratto omogeneo G": da confluenza Oglio fino a confluenza Secchia;
- "tratto omogeneo H": da confluenza Secchia fino a Pontelagoscuro;
- "tratto omogeneo I": da Pontelagoscuro fino alla diramazione del Po di Goro.

Le analisi relative agli approfondimenti delle attuali condizioni idraulico-morfologiche del fiume Po verranno condotte usufruendo di un nuovo rilievo della configurazione dell'alveo del Po, con particolare riferimento all'alveo inciso, che verrà effettuato da AIPo nel corso del 2015, attraverso la realizzazione di un DTM di elevato dettaglio. Ciò consentirà di procedere ad un confronto dettagliato con l'analogo DTM rilevato nel 2005 dall'Autorità di Bacino del Po e con i rilievi batimetrici eseguiti da AIPo del 2010 (tratto Cremona - foce Mincio). Sulla base di tale confronto sarà possibile effettuare l'analisi delle attuali condizioni idraulico-morfologiche in analogia con la metodologia utilizzata negli studi a supporto del Programma Generale di Gestione dei Sedimenti dell'Autorità di bacino del fiume Po (v. più oltre Cap. 4.6).

Le metodologie allora individuate, che devono essere nuovamente applicate in modo da conseguire risultati omogenei e intrinsecamente coerenti, si basano sulla seguente riflessione: essendo le caratteristiche del Po nel tratto in esame molto variabili, sia per la naturale e complessa dinamica evolutiva e morfologia fluviale, sia per l'influenza a breve e lungo termine di molteplici interventi antropici localizzati e diffusi, l'interpretazione dei fenomeni evolutivi deve discendere prioritariamente dalla conoscenza fisico-sperimentale delle caratteristiche idromorfologiche fluviali e del territorio circostante, il più dettagliata possibile e strettamente ancorata alle informazioni disponibili o comunque desumibili dalle osservazioni di campo, dalla quale ottenere la migliore conoscenza "fisica" del fiume.

In questa ottica le attività effettuate nell'ambito del presente studio comprendono:

- le necessarie e rinnovate attività conoscitive di campo attinenti la configurazione delle forme di fondo, la granulometria dei sedimenti di fondo, la torbidità delle acque riferita al trasporto in sospensione (attività descritta nel presente capitolo);
- l'analisi geomorfologica delle dinamiche evolutive che il Po ha presentato nel decennio 2005 – 2015 (attività descritta nel presente capitolo);
- la messa a punto di strumenti modellistici bidimensionali a fondo sia fisso che mobile, calibrati in funzione delle suddette conoscenze sperimentali, con i quali procedere alla ricostruzione delle suddette dinamiche evolutive (attività descritta nei successivi capitoli 6 e 8);

- la stima con i suddetti modelli degli effetti indotti sulla dinamica evolutiva dalle opere in alveo riferite ad entrambi i progetti qui analizzati: quello di regimazione dei livelli di magra tramite le cinque traverse di sostegno e quello di sistemazione a corrente libera (attività descritta nei successivi capitoli 6 e 8).

4.2 ANALISI CONDOTTE DALL'AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO

Le analisi condotte dall'Autorità di bacino del fiume Po nell'ambito degli "***Studi di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po***", hanno portato a determinare il bilancio del trasporto solido al fondo, cioè a stimare il valore del volume che nell'anno medio (all'interno di un determinato periodo di analisi, che nello specifico è compreso tra il 1982 e il 2005) è transitato in una data sezione del corso d'acqua. Senza entrare nel dettaglio degli aspetti metodologici, di seguito si riportano in sintesi i risultati ottenuti, attraverso l'applicazione del bilancio del trasporto solido condotta mediante l'aggregazione lungo la progressiva, secondo lo schema riportato nella figura sottostante, delle determinazioni derivanti dagli studi geomorfologici, idraulici e tenendo conto degli apporti esterni e dei volumi estratti.

In ogni tratto fluviale di lunghezza pari a circa 100 m, il bilancio della portata media di trasporto solido (valutata in termini di volume di trasporto nel periodo di riferimento) è fornito dall'espressione:

$$G_i = G_{i-1} + A_f - Estr + \Sigma E_{bar} - \Sigma D_{bar} + \Sigma E_{sp} - \Sigma D_{sp} + \Sigma E_{fondo} - \Sigma D_{fondo}$$

in cui:

G_i, G_{i-1} = portate solide medie nelle sezioni rispettivamente i di valle e i-1 di monte del tratto considerato;

Af = portata solida proveniente dagli affluenti e dall'apporto di sedimentazione di materiali veicolati in sospensione;

Estr = portata solida media estratta;

ΣE_{bar} = sommatoria delle portate solide rese disponibili dalle erosioni di barra;

ΣD_{bar} = sommatoria delle portate solide arrestatesi nei depositi di barra;

ΣE_{sp} = sommatoria delle portate solide rese disponibili dalle erosioni di sponda;

ΣD_{sp} = sommatoria delle portate solide arrestatesi nei depositi di sponda;

ΣE_{fondo} = sommatoria delle portate solide rese disponibili dalle erosioni di fondo alveo;

ΣD_{fondo} = sommatoria delle portate solide arrestatesi nei depositi di fondo alveo.

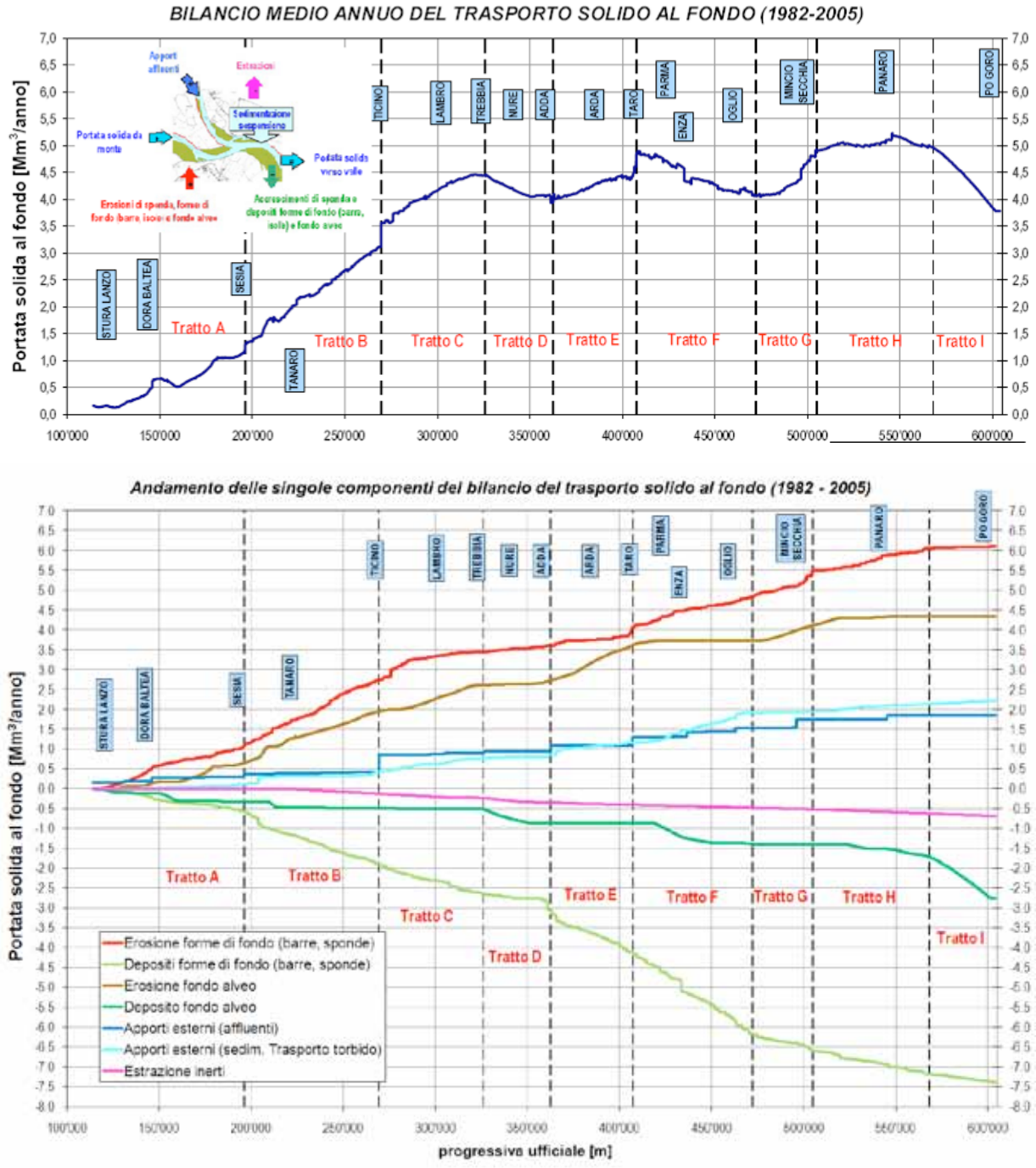


Figura 17 - Bilancio trasporto solido al fondo (sopra) e delle singole componenti (sotto), nel periodo 1982-2005

Considerando il tratto in oggetto, da Cremona al Po di Goro, l'analisi del diagramma sopra riportato mette in evidenza che:

1. **il tratto compreso tra foce Adda (a valle di Isola Serafini e a monte di Cremona) e foce Taro**, caratterizzato da un alveo monocursale sinuoso, presenta un incremento lungo la progressiva della portata solida al fondo (mediamente circa 22'000 m3/km anno) in quanto all'interno del tratto si ha che le erosioni, in atto soprattutto sul fondo alveo, sono superiori ai depositi, presenti soprattutto a tergo dei pennelli di navigazione. Il processo di erosione a carico del fondo alveo è legato, come più volte osservato, alla presenza della centrale idroelettrica di Isola Serafini (apporto ridotto di materiale solido da monte), alle opere di navigazione (canalizzazione dell'alveo inciso) e all'estrazione di inerti (effetti legati alle estrazioni condotte prima degli anni '80). Tale dinamica è incompatibile con l'assetto fluviale in quanto l'erosione in atto sul fondo alveo, in continua evoluzione, non solo rende parzialmente inutilizzabili alcune opere (conche di navigazione per

l'accesso al porto di Cremona e per oltrepassare la centrale di Isola Serafini), ma può indurre situazioni di rischio di instabilità gli argini maestri e i manufatti di attraversamento. Dalle analisi granulometriche e litologiche condotte si è potuto riscontrare che il substrato ghiaioso, di chiara pertinenza litologica appenninica, si rinviene alla base dei depositi sabbiosi di barra ad una quota maggiore di quella del fondo alveo attuale. Tale condizione mette in evidenza che detti depositi sono sospesi rispetto alla quota di fondo alveo ed essendo riscontrabili sulle barre di entrambe le sponde ne deriva che essi possano essere stati incisi ed asportati dai processi erosivi responsabili dell'abbassamento del fondo alveo;

2. **il tratto compreso tra foce Taro e Borgoforte (a valle foce Oglio)**, caratterizzato da un alveo monocursale, da sinuoso a localmente meandriforme, presenta una scarsa naturalità geomorfologica, esplicatesi in una forte "staticità" dei depositi, prevalentemente a tergo dei pennelli di navigazione. Il valore della portata solida al fondo è in costante diminuzione lungo tutto il tratto (mediamente circa -11'000 m3/km anno). Tale circostanza è legata al fatto che le erosioni in atto nelle forme di fondo (barre e sponde) e gli apporti esterni (sia come carico di fondo che come carico in sospensione che sedimenta), sono inferiori ai depositi di barra (soprattutto a tergo dei pennelli di navigazione) e lungo il fondo alveo (associato all'apporto di materiale grossolano da parte degli affluenti appenninici che la corrente del Po non è in grado di trasportare verso valle, se non per tratti ridotti e in condizioni di piena);

3. **il tratto compreso tra Borgoforte e Ostiglia** (a valle delle confluenze con Mincio e Secchia), caratterizzato da un alveo complessivamente monocursale (a monte rettilineo-sinuoso e a valle meandriforme), presenta un incremento della portata solida al fondo (mediamente circa 26'000 m3/km anno) per effetto delle dinamiche interne al sistema (erosioni > depositi). Si segnala che all'interno del tratto è in atto un approfondimento delle quote di fondo alveo e le opere di navigazione sono più contenute rispetto ai tratti di monte, pertanto i depositi di barra sono più limitati e si constata una certa ripresa della dinamica erosionale di sponda, soprattutto in corrispondenza della porzione terminale del tratto. E' possibile che l'obiettivo di incrementare la portata solida da monte possa ridurre i processi erosivi in atto, soprattutto quello che interessa il fondo alveo. E' necessario, inoltre, evitare che il trasporto solido proveniente da monte vada a depositarsi a tergo dei pennelli, per cui occorre ridurre l'altezza di tali opere, senza però interferire con le necessità di navigazione

4. **il tratto compreso tra Ostiglia (a valle delle foci di Mincio e Secchia) e Pontelagoscuro**, è caratterizzato da un alveo di magra da monocursale (prevalente) a pluricursale, da rettilineo a sinuoso, localmente meandriforme e con presenza di barre longitudinali (isole) relativamente ben sviluppate. Tale tratto, non condizionato in modo diffuso da opere di difesa spondale, in assenza di opere di navigazione e di condizionamenti esterni (assenza di rilevanti apporti esterni e ridotta influenza del mare), risulta essere sostanzialmente in equilibrio dinamico (erosioni = depositi). Esso costituisce la parte di alveo situato immediatamente a valle del tratto navigabile e immediatamente a monte dell'incile del delta;

5. **il tratto compreso tra Pontelagoscuro e il Po di Goro**, caratterizzato da un alveo monocursale, da rettilineo a sinuoso, relativamente canalizzato entro le arginature maestre, presenta una portata solida al fondo in costante diminuzione lungo la progressiva (mediamente circa -33'000 m3/km anno). La dinamica relativa alle forme di fondo perde importanza rispetto a quella che interessa il fondo dell'alveo. La dinamica in atto risulta essere associata al fenomeno di deposito in atto lungo il fondo alveo, correlato al fatto che nel decennio precedente all'estremo delle analisi condotte (2005) si sono verificati tre eventi di piena straordinari (1994, 2000 e 2002) che indubbiamente hanno contribuito ad apportare notevoli quantità di materiale solido, il quale transita lentamente verso valle, a causa della progressiva perdita di energia verso la foce dovuta all'azione di rigurgito del mare.

4.3 INDAGINI DI CAMPO E ANALISI GRANULOMETRICHE

4.3.1 Inquadramento

Nell'ambito delle attività condotte per il presente progetto sono state effettuate le seguenti nuove indagini granulometriche di campo.

Nel presente paragrafo vengono descritte la metodologia utilizzata e le attività effettuate per determinare le caratteristiche granulometriche e sedimentologiche dei materiali presenti nell'alveo inciso del F. Po e, in particolare, nelle forme di fondo, nell'alveo sommerso e, localmente, nelle sponde.

I risultati delle analisi geomorfologiche eseguite dagli scriventi nell'ambito dello "Studio di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti dell'alveo del Fiume Po, nel tratto compreso tra la confluenza Stura di Lanzo e la diramazione Po di Goro, nell'intervallo complessivo di analisi 1982 – 2005", hanno consentito di suddividere il fiume Po in nove "tratti omogenei", contraddistinti da condizioni litologiche, geomorfologiche e sedimentologiche complessivamente omogenee.

Il segmento fluviale oggetto delle presenti attività di approfondimento comprende parte del Tratto D e tutti i tratti successivi, fino alla progressiva 604 (diramazione Po di Goro). Nel dettaglio, essi sono:

- "tratto omogeneo D": dallo sbarramento di Isola Serafini alla progressiva km 362 circa (confluenza Adda);
- "tratto omogeneo E": dalla progressiva km 362 alla progressiva km 408 circa (Confluenza Taro);
- "tratto omogeneo F": dalla progressiva km 408 alla progressiva km 464 circa (Confluenza Oglio);
- "tratto omogeneo G": dalla progressiva km 464 alla progressiva km 497 circa (Confluenza Secchia);
- "tratto omogeneo H": dalla progressiva km 497 alla progressiva km 567 circa (Pontelagoscuro).
- "tratto omogeneo I": dalla progressiva km 567 alla progressiva km 604 circa (diramazione Po di Goro).

4.3.2 Programma di campionamento

I campioni di sedimento e la loro distribuzione spaziale sono stati programmati tenendo conto delle dinamiche attive dell'alveo del fiume Po, del relativo assetto geomorfologico e della presenza di potenziali "fonti" di apporti solidi significativi (affluenti, tratti di sponda in erosione, presenza di sedimenti in alveo o sulle barre a tessitura diversificata). Allo scopo di ottenere informazioni sulla tipologia dei sedimenti trasportati da alcuni affluenti appenninici principali sono stati effettuati specifici campionamenti anche nel loro alveo (v. Taro, Parma, Enza).

Per omogeneità di confronto, il campionamento è stato programmato nelle sezioni e nei medesimi punti di prelievo già individuati e utilizzati nell'ambito degli studi effettuati a supporto del Programma Generale di Gestione dei Sedimenti (PGGS) dell'Autorità di bacino del fiume Po.

In particolare, i campionamenti sono stati eseguiti lungo "stendimenti" e/o "aree campione", riferite alle sezioni topografiche ufficiali, esplicitate nella tabella riportata a lato.

Complessivamente sono stati realizzati 49 "stendimenti" distribuiti nei 6 tratti omogenei, da cui sono stati prelevati 143 campioni (barre, alveo, sponde e affluenti).

TRATTO D	TRATTO E	TRATTO F	TRATTO G	TRATTO H	TRATTO I
S25_03	S24F	T. Parma	S41	S48C	S68
S24C	S25A36	S32A	S42	S49B	S69
	S26C	S33B	S42A	S50	S70
	S27B	S35D	S43B	S53B	S71
	S28	S36	S45A	S54	S72
	S28A	T. Enza	S46A	S56B	
	S30	S37	S46C	S57A	
	S31	S37BIS	S47	S59B	
	T. Taro	S38D		S62	
		S38E		S63	
		S39C		S64B	
		S40		S64C	
		S40D			
TOTALE=6 campioni	TOTALE=37 campioni	TOTALE=37 campioni	TOTALE=25 campioni	TOTALE=24 campioni	TOTALE=14 campioni

4.3.3 Metodologia di campionamento

Tutti i campioni prelevati sono stati sottoposti ad analisi granulometriche, per setacciamento.

Nei tratti più sensibili a particolari dinamiche erosionali o di deposito, i sedimenti sabbiosi di barra sono stati sottoposti anche ad analisi mineralogiche (in sezione sottile) per la determinazione del trend del "quarzo mono-cristallino". Questo costituente è molto diffuso nei sedimenti del F. Po. Gli studi eseguiti da alcuni degli scriventi sul F. Po (v. PGGS) e sul F. Ticino ("Monitoraggio morfologico e sedimentologico dell'alveo del Fiume Ticino", nel tratto compreso tra Bereguardo e confluenza Ticino per conto del Parco Lombardo della Valle del Ticino) hanno evidenziato un'ottima correlazione tra il trend del quarzo mono-cristallino e quello del bilancio del trasporto solido (Figura 18, Figura 19). Questa correlazione si spiega poiché il meccanismo responsabile dell'incremento della frequenza del quarzo mono-cristallino (urti e movimentazione di ciottoli ad elevato contenuto quarzoso) è strettamente correlato all'incremento del trasporto solido lungo la progressiva.

Quanto sopra evidenzia l'ipotesi che il quarzo (e soprattutto le dinamiche responsabili della sua produzione all'interno del sistema) possa costituire un ottimo "tracciante" delle dinamiche evolutive in atto lungo la progressiva. E' quindi interessante poter verificare in termini quantitativi il legame tra il quarzo mono-cristallino e il bilancio del trasporto solido al fine di ottenere eventuali indici in grado di correlare, ad esempio, la frequenza del quarzo con la tendenza al deposito o all'erosione in un determinato tratto fluviale. Se tale ipotesi, in prima approssimazione già confermata dagli studi sopracitati condotti da alcuni degli scriventi, fosse verificata in relazione alle nuove analisi qui effettuate, si potrebbe disporre di uno strumento di monitoraggio estremamente agevole, di semplice applicazione e, soprattutto, ripetibile con frequenza relativamente elevata.

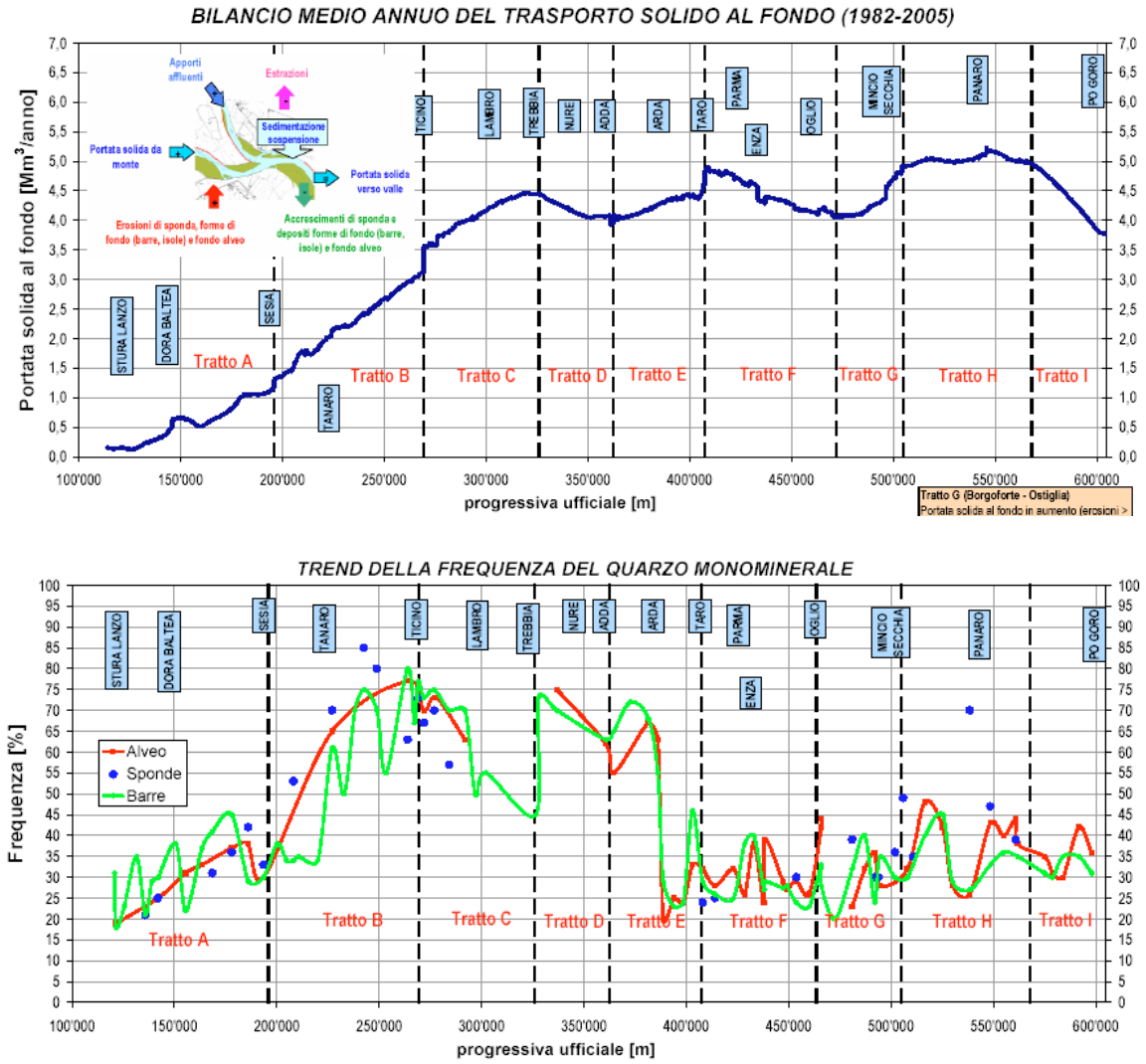


Figura 18 – Trend quarzo mono-cristallino – bilancio trasporto solido lungo il fiume Po.

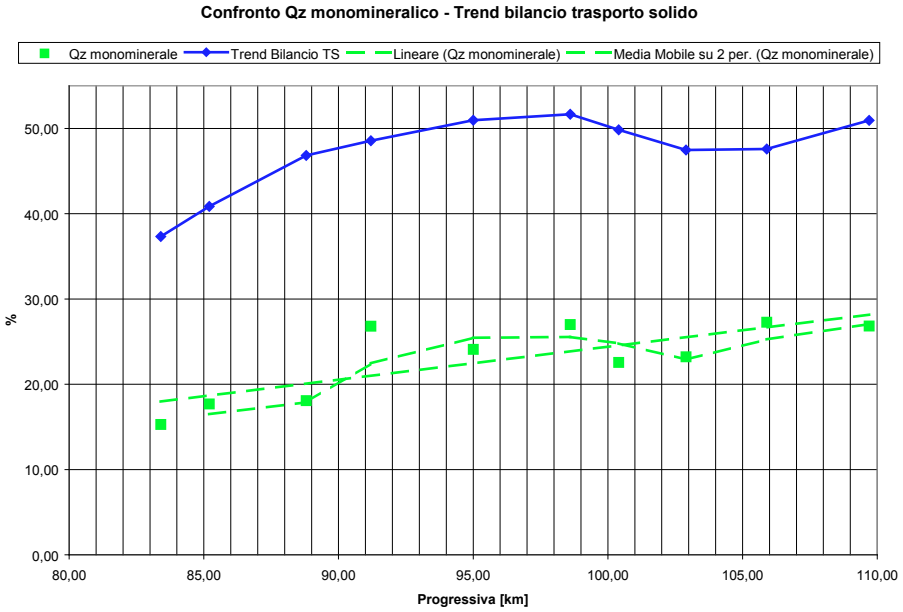


Figura 19 – Trend quarzo monomineralico – bilancio trasporto solido lungo il F. Ticino

Per il prelievo dei sedimenti è stata adottata una procedura di campionamento che consente di prelevare campioni il più rappresentativi possibile, utilizzando diverse metodologie in funzione della granulometria prevalente.

Nella fattispecie, sono stati prelevati quantitativi di ghiaia di peso pari a 16 kg circa e di sabbia pari a circa 1,7 kg. Tutti i campioni prelevati sono preparati mediante il metodo della "quartatura" al fine di rendere la frazione analizzata rappresentativa dell'intero volume campionato. Il materiale prelevato è stato quindi progressivamente omogeneizzato e dimezzato fino a raggiungere un volume pari a 1/5 - 1/10 di quello iniziale.

In presenza di sabbie con matrice limosa i materiali, prima di essere analizzati, sono stati preventivamente privati della componente limosa, mediante lavaggio. Il contenuto fine (residuo di lavaggio) è stato trattenuto mediante un apposito setaccio in modo da poter stimare la quantità di sedimento fine presente per unità di peso di sedimento totale.

Il materiale raccolto è stato "insacchettato" in contenitori di plastica; su ciascun sacchetto, con pennarello indelebile, è stata riportata una sigla, indicante: il codice identificativa del "Tratto fluviale omogeneo", la sigla della sezione ufficiale di riferimento, la sigla della forma campionata, il numero del campionamento progressivo per sezione (ad es.: TF/S64C/B/1 indica un campionamento nel tratto F (TF), sezione di riferimento S64C, forma campionata (B barra, A alveo, ecc.). La sigla "α" presente in alcuni casi prima dell'indicazione della sezione di campionamento (ad es.: TF6/αS64C/B/1) indica che i campioni non sono allineati sulla sezione ma su di un asse ruotato intorno all'estremo della sezione stessa.

Per indentificare il "morfotipo" e la posizione del campione nelle diverse parti del morfotipo stesso, sono state utilizzante le seguenti abbreviazioni:

A = campione in Alveo di magra, sommerso;

B = campione sulla superficie esposta di una Barra (l.s.);

BU = campione all'unghia di una Barra (l.s.), in corrispondenza dell'alveo di magra emerso;

BF = campione sul fronte di una Barra;

S = campione sul fronte di una sponda in erosione;

4.3.3.1 Campioni con abbondante frazione ghiaiosa

La metodologia di campionamento, del tutto analoga a quella già impiegata nell'ambito del PGGS,

è definita in modo da poter valutare e quantificare l'eventuale "corazzamento" superficiale. Allo scopo, una volta valutata preventivamente in campagna la presenza di un orizzonte superficiale di corazzamento, si procede al prelievo di due campioni: uno "superficiale", uno "subsuperficiale".

Il metodo di campionatura prevede la stesa, su di un'area morfologicamente omogenea, di una "cornice" a sezione quadrata di 30 cm di lato. Il prelievo è effettuato asportando lo strato "superficiale" di sedimento, avente spessore pari a 10 cm (mediante "cazzuola" o "pala a mano" di dimensioni adeguate), corrispondente ad un totale di circa 16 kg di materiale. Nei casi in cui è stata riscontrata la presenza di corazzamento, il prelievo è stato ripetuto campionando prima l'orizzonte superficiale di corazzamento e poi l'orizzonte "subsuperficiale". Lo spessore degli orizzonti campionati, "superficiale" ed eventualmente "subsuperficiale", è controllato attraverso l'uso di un riferimento metrico rigido infisso nel terreno.

4.3.3.2 Campioni sabbiosi

Nel caso di sedimenti sabbiosi il metodo di campionamento prevede la stesa, su di un'area morfologicamente omogenea, di una "cornice" a sezione quadrata di 15 cm di lato. Il prelievo è stato eseguito asportando lo strato "superficiale" di sedimento, avente spessore pari a 5 cm (mediante "cazzuola") corrispondente ad un totale di circa 1,7 kg di materiale.

Lo spessore dell'orizzonte campionato è stato controllato attraverso l'uso di un riferimento metrico rigido infisso nel terreno.

4.3.4 Metodologia di analisi

Sui campioni sono state effettuate analisi di laboratorio, finalizzate all'acquisizione di:

- composizione granulometrica dei campioni e fuso rappresentativo di ogni tratto fluviale, nelle sue diverse componenti: alveo, sponde, barre;
- punti di troncatura granulometrica dei sedimenti dell'alveo inciso e delle relative forme di fondo di ogni tratto fluviale, indicativi delle modalità di trasporto (al fondo, per saltazione, in sospensione) in funzione del regime delle portate;
- trend, per ciascun tratto omogeneo, del quarzo mono-cristallino dei sedimenti dell'alveo inciso e delle barre, indicativo del relativo stato evolutivo (erosione, deposito, equilibrio).
- Allo scopo, sono state eseguite specifiche analisi granulometriche (per setacciamento) e mineralogiche (al microscopio in sezione sottile e luce polarizzata, previo "incollaggio" delle sabbie con resine epossidiche).
-

4.3.5 Analisi granulometriche

Le analisi granulometriche sono state eseguite per setacciamento, mediante l'uso di setacci in acciaio "*Endecotts*" (certificati ISO3310-1), aventi diametro pari a 200 mm. Data la natura dei depositi esaminati e tenuto conto degli obiettivi dello studio, i limiti inferiore e superiore dei setacci sono stati stabiliti in corrispondenza dei diametri: 0,062 mm (limite inferiore delle sabbie); 25 mm (ciottoli medi). Dato il non elevato numero di ciottoli di dimensioni maggiori di 25 mm, per quantitativo unitario di materiale oggetto di analisi, la loro misura è stata eseguita "uno ad uno", mediante calibro a lettura digitale. L'analisi granulometrica di laboratorio è integrata con osservazioni di campagna, sulla base alle quali è stato possibile stimare le dimensioni massime dei ciottoli presenti nel deposito campionato.

I dati e risultati delle osservazioni di campagna e delle analisi di laboratorio sono riportati in apposite schede, raggruppate per "tratto omogeneo" (riportate nell'Allegato 1 alla presente relazione). Per ciascun tratto è stata compilata una "copertina" riassuntiva delle sezioni complessivamente campionate e, per ciascuna sezione, una sintesi dei campioni prelevati.

In ciascun tratto omogeneo, le schede sono raggruppate in base alla sezione di campionamento; ciascun gruppo comprende uno stralcio cartografico con riportata l'ubicazione e la sigla

identificativa della sezione, nonché l'ubicazione dei singoli punti di prelievo.

Ciascuna forma campionata (barra, alveo, sponda) viene descritta attraverso una o più schede descrittive di campagna, una o più schede contenenti i dati desunti attraverso le analisi di laboratorio ed una o più schede contenenti i risultati in forma grafica.

In particolare la scheda di campagna contiene informazioni relative ai caratteri litologici e morfologici dell'area di campionamento e alla vegetazione presente.

La scheda di laboratorio riporta le caratteristiche granulometriche dei depositi.

Nella scheda dei grafici e dei risultati si evidenzia, in forma sintetica, la composizione granulometrica del campione, sia attraverso "curve di frequenza", sia mediante "curva cumulativa". Un esempio è riportato nella Figura 20.

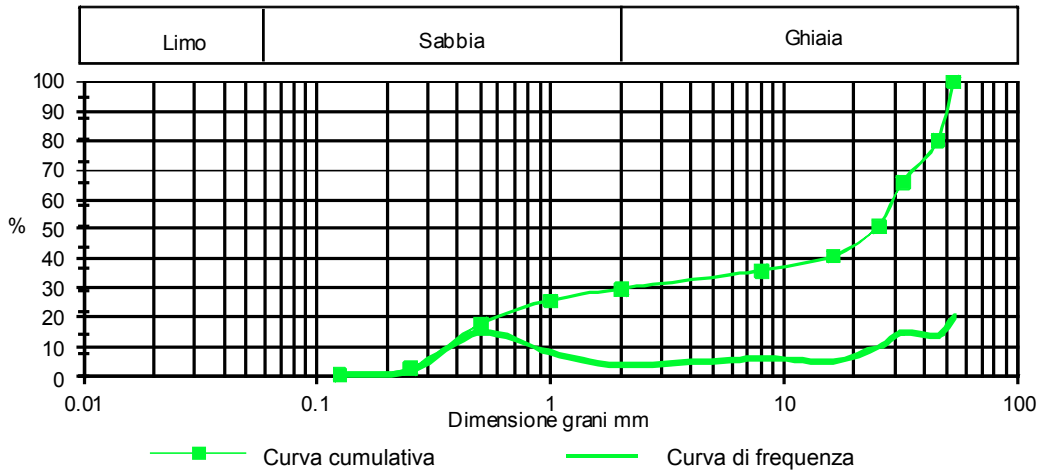


Figura 20 – Esempio di restituzione grafica di curva granulometrica.

Sono stati individuati i seguenti parametri statistico-sedimentologici:

- *media* = Dmed = diametro medio = (D16 + D50 + D84) / 3
- *mediana* = D50, espressione del valore di tendenza centrale e della "capacità di trasporto";
- *diametro massimo* = Dmax = espressione della "competenza" del mezzo di trasporto;
- *coefficiente di cernita* = (D84 – D16) / 2, espressione del grado di selezionamento del materiale;
- *coefficiente di asimmetria* = Sk = (D84 + D16 - 2D50) / 2(D84 – D16), che esprime lo scostamento tra "mediana" (D50) e "media". Sulla base della convenzione rappresentativa assunta, Sk è negativo quando vi è una "coda" di materiali "fini", positivo quando la "coda" è grossolana.

In ciascuna scheda è riportata una tabella di sintesi dei sopra descritti parametri statistico-sedimentologici relativa sia al campionamento 2014-2015, oggetto del presente studio, sia ai campioni delle campagne precedenti (PGGS).

4.3.6 Punti di troncatura

L'analisi delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti consente di determinare anche i cosiddetti "**punti di troncatura**", che si individuano dalla curva cumulativa della distribuzione granulometrica, costruita su di un diagramma bilogaritmico ed esprimendo le dimensioni dei granuli in unità "?".

La "scala φ" è la trasposizione in logaritmi della scala Udden – Wentworth. Si tratta, più precisamente, dei logaritmi in base 2 dei valori dimensionali espressi in millimetri. La progressione geometrica di ragione 2 di Udden – Wentworth si riduce così alla progressione lineare dei logaritmi in base 2:

16; 8; 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,062 = D [mm] (scala Udden – Wentworth)

4; 3; 2; 1; 0; -1; -2; -3; -4 = $\log_2$ D [φ] (scala φ)

Poiché si analizzano prevalentemente materiali di dimensioni minori di 2 mm, i quali nella scala φ risultano negativi, per comodità si cambia il segno ai logaritmi:

-4; -3; -2; -1; 0; 1; 2; 3; 4 = -$\log_2$ D [φ]

Utilizzando la rappresentazione granulometrica sopra descritta, la curva granulometrica cumulata diventa una spezzata; i punti di intersezione dei diversi segmenti costituiscono i "punti di troncatura" del sedimento. Ciascun segmento lineare, costituente la spezzata, è rappresentativo di una "popolazione granulometrica" omogenea (figura seguente), rappresentativa delle diverse modalità di trasporto del sedimento per effetto di una determinata corrente fluviale (Lane 1938; Visher, 1969). Nella fattispecie, i punti di troncatura evidenziano le popolazioni granulometriche il cui trasporto avviene prevalentemente per "trazione" (al fondo), per "saltazione" e "in sospensione".

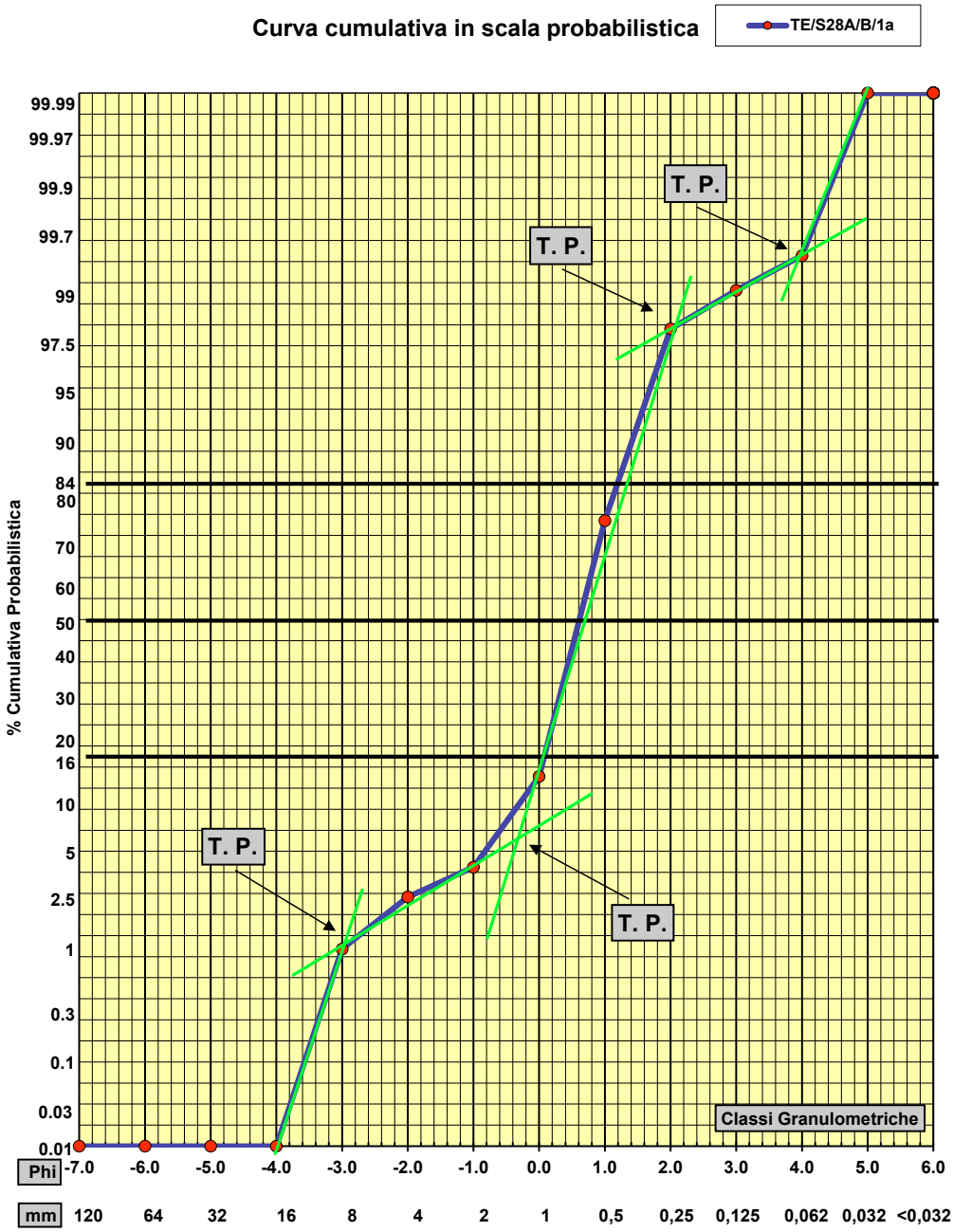


Figura 21 – Esempio di rappresentazione dei punti di troncatura.

4.3.7 Trend del quarzo monominerale

La determinazione quantitativa del quarzo monominerale è stata eseguita in sezione sottile, su campioni rappresentativi dei depositi di barra.

La metodologia di analisi prevede l'utilizzo della frazione di dimensioni comprese tra 0,25 e 0,50 mm, previo incollaggio dei costituenti mediante l'utilizzo di apposite resine sintetiche. Il "preparato solido", di spessore adeguato, può quindi essere utilizzato per ottenere una sezione sottile, analizzabile con microscopio petrografico ottico, a luce polarizzata.

4.3.8 Risultati delle analisi granulometriche e sedimentologiche

Nel segmento fluviale in studio, compreso tra il meandro di Isola Serafini e l'incile del Delta, alla diramazione del Po di Goro, le attività di campagna e il contestuale prelievo dei campioni sono state effettuate nel periodo compreso tra ottobre 2014 e luglio 2015.

TRATTO D	TRATTO E	TRATTO F	TRATTO G	TRATTO H	TRATTO I
S25_03	S24F	T. Parma	S41	S48C	S68
S24C	S25A36	S32A	S42	S49B	S69
	S26C	S33B	S42A	S50	S70
	S27B	S35D	S43B	S53B	S71
	S28	S36	S45A	S54	S72
	S28A	T. Enza	S46A	S56B	
	S30	S37	S46C	S57A	
	S31	S37BIS	S47	S59B	
	T. Taro	S38D		S62	
		S38E		S63	
		S39C		S64B	
		S40		S64C	
		S40D			
TOTALE=6 campioni	TOTALE=37 campioni	TOTALE=37 campioni	TOTALE=25 campioni	TOTALE=24 campioni	TOTALE=14 campioni

Tabella 1 – sezioni di campionamento e numero di campioni

Nella Tabella 1 sono riportate le sezioni di campionamento e il numero di campioni prelevati. In nero sono evidenziate le sezioni oggetto di prelievo nella campagna di rilevamento di ottobre 2014. In colore sono evidenziate le sezioni il cui campionamento è stato rinviato a causa di condizioni di inaccessibilità da terra o per presenza di livelli idrici troppo elevati. Il loro completamento è stato effettuato nel periodo compreso tra aprile 2015 (blu) e luglio 2015 (verde).

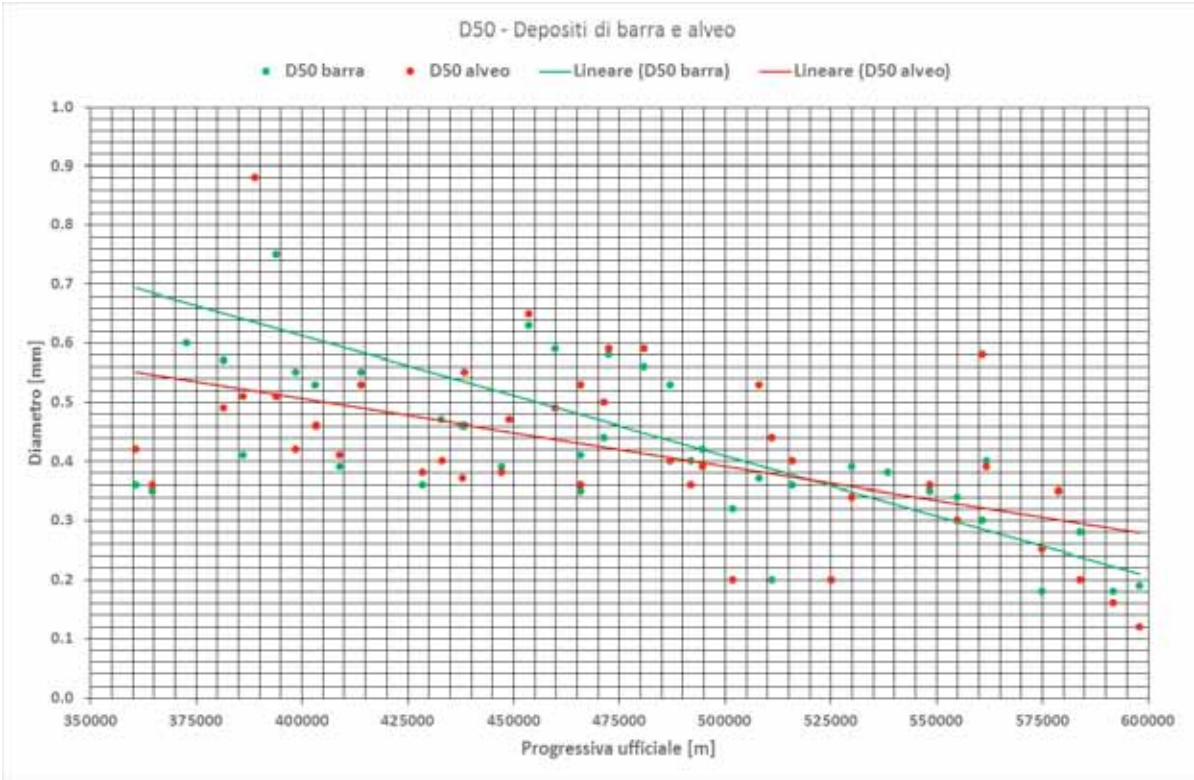
In sintesi, sono stati completati 49 "stendimenti" distribuiti nei 6 tratti omogenei D, E, F, G, H, ed I da cui sono stati prelevati n. 143 campioni (barre, alveo, sponde del F. Po e affluenti principali).

4.3.8.1 Trend granulometrico lungo la progressiva

I risultati dei rilievi e delle analisi effettuate sono compendiati nelle "Schede di campagna e di laboratorio" riportate nell'Allegato 1. Dall'esame dei risultati ottenuti attraverso le osservazioni in campo e le analisi di laboratorio emerge quanto segue:

1 Rispetto alla situazione 2005 (v. PGGS), le condizioni sedimentologiche del F. Po, riscontrate durante i sopralluoghi del 2014-2015, evidenziano una maggiore propensione al trasporto da parte del corso d'acqua. Infatti, è stata riscontrata la significativa erosione altimetrica delle forme di fondo precedentemente rilevate nel meandro di Isola Serafini e la presenza di considerevoli depositi di barra, di natura prevalentemente sabbiosa, nei tratti situati a valle.

2 Nella seguente Figura 22 è riportato il Trend del D50 delle forme di fondo (barre) e dei depositi di fondo alveo lungo la progressiva. Nella successive Figura 23 e Figura 24 è riportato il confronto tra il D50 relativo alla campagna di rilevamento del 2005-07 e quello della campagna 2014-15.



Fgura 22 – Trend del D50 con la progressiva nel segmento fluviale compreso tra Isola Serafini e diramazione Po di Goro.

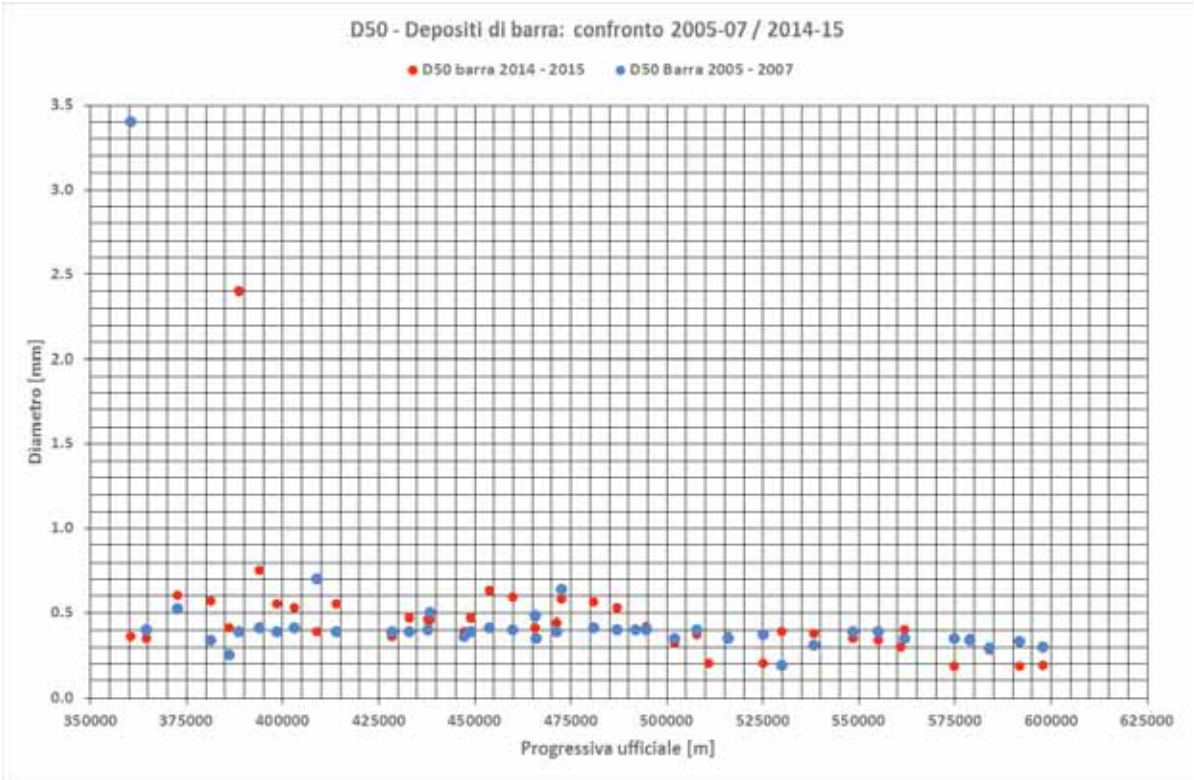


Figura 23 – Confronto 2005-07/2014-15 del D50 depositi di barra.



Figura 24 - Confronto 2005-07/2014-15 del D50 depositi di fondo alveo.

La sopra citata propensione ad un maggior trasporto del corso d'acqua, rispetto alla condizione 2005, è confermata anche dal trend del D50 dei depositi di barra e di fondo alveo. Infatti, i grafici di Figura 23 e di Figura 24 evidenziano un incremento relativo del D50 lungo la progressiva, soprattutto nel tratto compreso tra Boretto (km 440) e Borgofranco/Melara (km 515). Inoltre, rispetto alla condizione 2005, si riscontra una contestuale diminuzione relativa del D50 nel meandro di Isola Serafini e nel tratto immediatamente a valle, fino all'incirca a Polesine Parmense.

3 Il D50 dei depositi di barra nel meandro di Isola Serafini a ottobre 2014 è minore di quello riscontrato nel 2005, il quale è invece confrontabile con il D50 dei depositi attualmente presenti in un intorno della progressiva km 390 (Polesine Parmense).

4.3.8.2 Punti di troncatura: modalità di trasporto e deposito dei sedimenti

Dall'analisi delle curve cumulative probabilistiche, costruite in "scala φ", è stato possibile ricavare informazioni sulle diverse popolazioni granulometriche definite dai "punti di troncatura". Questi, come già illustrato in precedenza, definiscono sub-popolazioni di un determinato fuso granulometrico il cui trasporto e deposito sono attribuibili a modalità e regime idraulico differenti.

Infatti, in letteratura le popolazioni granulometriche individuate dai segmenti della spezzata probabilistica, definiti dai punti di troncatura, sono considerate rappresentative delle diverse modalità di trasporto del sedimento (Lane 1938; Visher, 1969). Nella fattispecie, i punti di troncatura evidenziano le popolazioni granulometriche il cui trasporto avviene prevalentemente per "trazione (trascinamento e rotolamento)", per "saltazione" e in "sospensione".

I risultati delle analisi eseguite hanno consentito di definire, in particolare, il limite dimensionale tra il materiale che subisce trasporto sul fondo (per fenomeni trattivi e per saltazione) e quello che subisce trasporto essenzialmente in sospensione.

La conoscenza di tale limite è di fondamentale importanza poiché i risultati delle osservazioni di campagna, come già emerso dagli studi eseguiti dagli scriventi nell'ambito del PGGS, suggeriscono che i depositi costituenti le forme di fondo e localmente l'alveo di magra sommerso, sono costituiti anche da materiali fini che verosimilmente, specialmente nelle fasi parossistiche di un evento di piena, vengono veicolati in sospensione per poi essere "abbandonati" insieme al trasporto di fondo durante le fasi "discendenti" delle piene stesse.

L'ipotesi sopra esposta trova conferma nella letteratura specifica (v. ad es.: CATI L. (1981) – "Idrografia e Idrologia del bacino del Po". Pubbl. n. 19 dell'Ufficio Idrografico del Po), da cui risulta che il trasporto in sospensione del Po interessa le particelle più fini che, a causa dei moti turbolenti, possono essere trasportate in sospensione senza contatto diretto con il fondo.

I suddetti Autori hanno stimato il limite granulometrico al di sotto del quale si ha trasporto in sospensione, indicando un valore pari a 0,35 mm.Tale valore è ritenuto rappresentativo per tutta l'asta del Po, da Stura di Lanzo a mare. Considerato che sabbie di dimensioni minori di 0,35 mm sono generalmente presenti anche nei depositi di barra (talora in percentuale relativamente elevata), va da sé che parte del carico sospeso alimenti in parte le forme di fondo, specialmente durante la fase discendente di una piena.

Le seguenti Figura 25 e Figura 26 evidenziano i punti di troncatura individuati sui campioni di barra e di fondo alveo prelevati nella campagna di rilevamento di ottobre 2014 – luglio 2015.

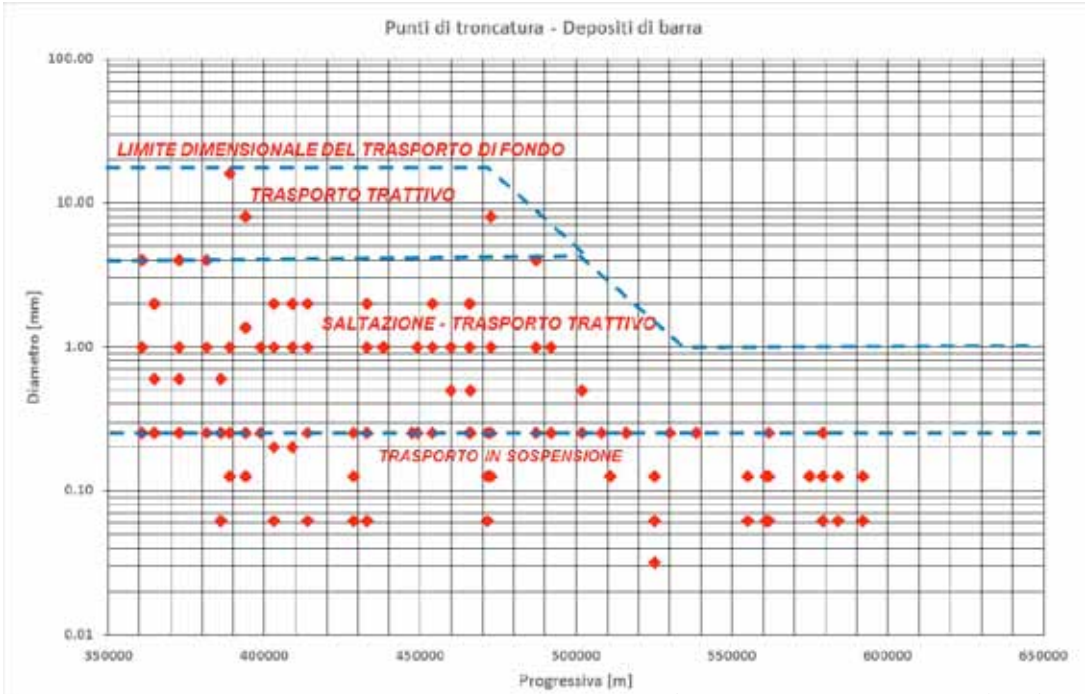


Figura 25 – Punti di troncatura dei depositi di barra nel segmento fluviale compreso tra Isola Serafini e incile Po di Goro.

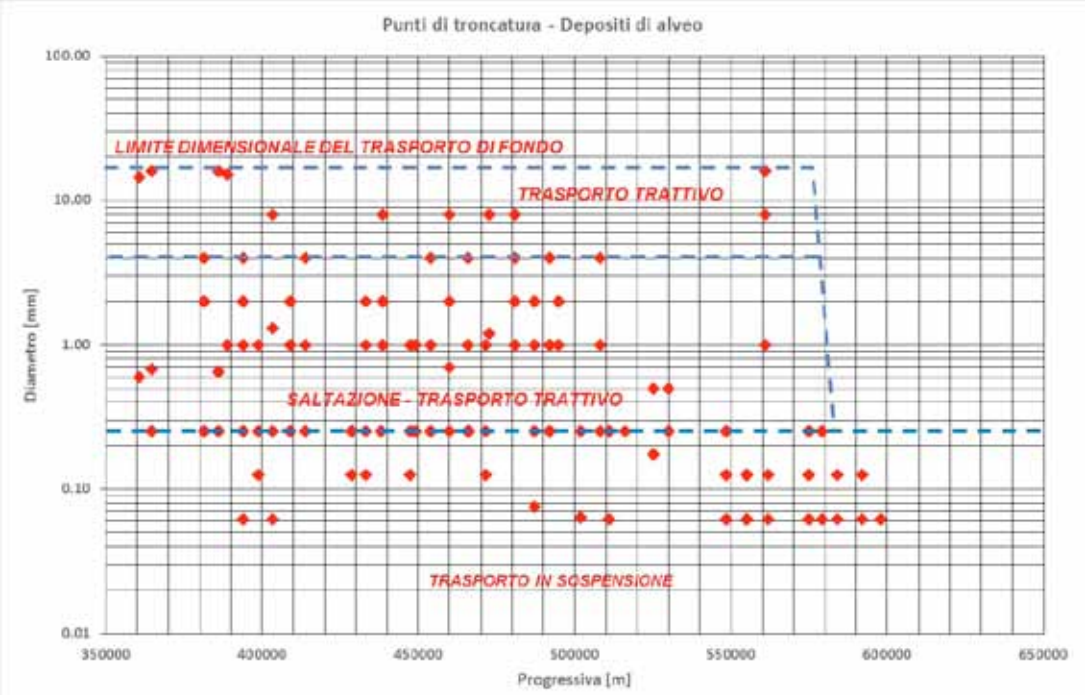


Figura 26 – Punti di troncatura dei depositi di fondo alveo nel segmento fluviale compreso tra Isola Serafini e incile Po di Goro.

I risultati ottenuti per i depositi di barra e di fondo alveo sono congruenti tra di loro e confermano quanto già emerso dagli studi precedenti effettuati da alcuni degli scriventi nell'ambito del PGSS: la dimensione di 0,25 mm individua, omogeneamente in tutto il segmento fluviale in oggetto, il limite di separazione tra il trasporto in sospensione e quello al fondo. Nell'ambito del trasporto di fondo il punto di troncatura di 4 mm discrimina il trasporto "trattivo" (rotolamento e trascinamento) dal trasporto per saltazione. A partire dalla progressiva km 500 – 510 i sedimenti hanno composizione essenzialmente sabbiosa; nel trasporto di fondo prevalgono i meccanismi di "saltazione". Sia nei depositi di barra che in quelli di fondo alveo si individua un punto di troncatura variabile tra 18 mm (monte) e 2 mm (Pontelagoscuro), il quale individua il limite superiore del trasporto solido di fondo.

4.3.8.3 Trend del Quarzo monocristallino

Il quarzo è il minerale più diffuso nelle rocce metamorfiche e ignee, tipiche degli apporti sedimentari del F. Po di provenienza essenzialmente alpina e costituisce la fase mineralogica più stabile (in termini sia di alterazione chimica che di usura).

Considerato che gli apporti appenninici sono rappresentati sostanzialmente da rocce sedimentarie, sia nei termini ghiaiosi che sabbiosi (come confermato dai campionamenti eseguiti sulle barre di confluenza e a monte delle confluenze, negli alvei torrentizi stessi), "l'arricchimento" relativo della frazione quarzosa nel F. Po non può che essere dovuto alla progressiva disgregazione dei litici metamorfici e ignei (di provenienza alpina), a partire dai segmenti fluviali di monte (v. sistema braided), i quali verrebbero "ereditati" dai tratti di valle in modo cumulato lungo la progressiva.

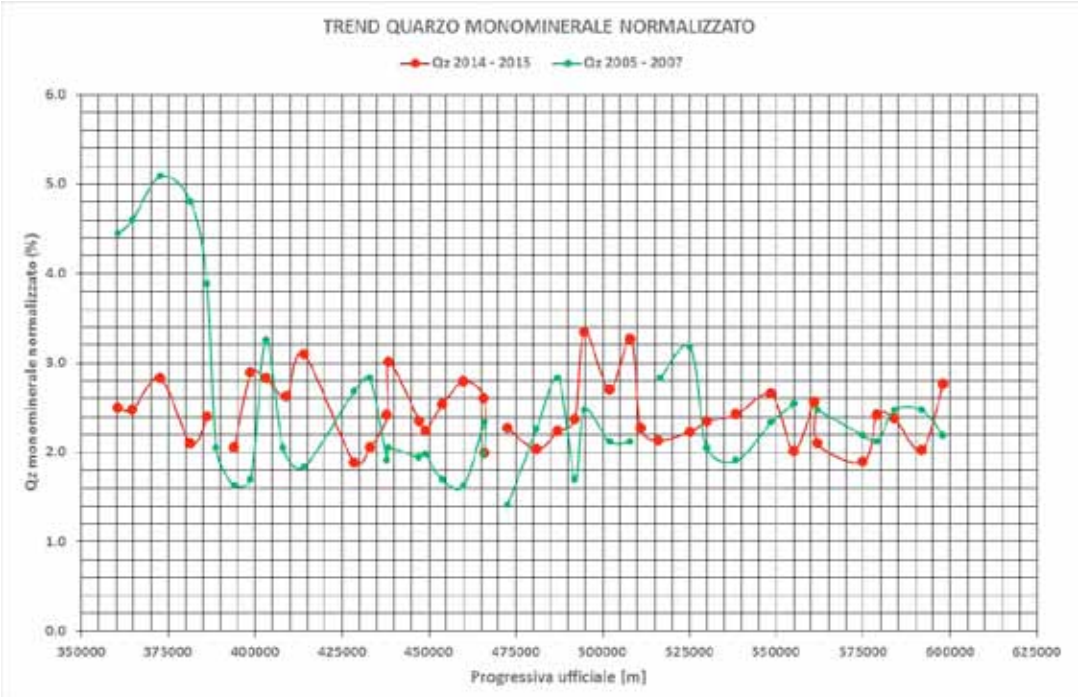


Figura 27 - Trend della frequenza normalizzata del quarzo monominerale: confronto 2005 / 2015.

Nel precedente grafico (Figura 27) è riportato il confronto tra il trend della frequenza normalizzata del quarzo monocristallino relativo alle campagne di campionamento 2005-2007 con quelle del 2014-2015.

4.4 MONITORAGGIO SPERIMENTALE DELLA TORBIDITÀ DELLE ACQUE DEL PO FINALIZZATA ALLA MISURA DEL TRASPORTO SOLIDO IN SOSPENSIONE

4.4.1 Premessa

Le analisi delle attuali condizioni idraulico-morfologiche del fiume Po e di approfondimento modellistico necessitano anche di informazioni legate al trasporto solido del Po in sospensione, che come noto è una componente molto importante del trasporto solido totale del F. Po.



Al fine di quantificare il carico di sedimenti sospesi veicolati dal fiume Po, è stato effettuato il monitoraggio della torbidità, quale proxy dei solidi sospesi totali (SST), nel fiume stesso. Il monitoraggio della torbidità è stato condotto mediante l'utilizzo di due sonde multiparametriche in grado di effettuare misure in continuo (es. ogni 15 min). Le sonde sono della YSI Inc., modello 6920 V2.

Le sonde misurano la torbidità in unità NTU (Nephelometric Turbidity Units). Tale unità di misura è riferita alla concentrazione di sostanze insolubili e stabili come SiO2 o formazina standard (ad esempio vale la conversione 1 NTU = 1/7,5 mg/l di SiO2).

La misura della torbidità è stata effettuata nelle quattro sezioni di Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro, in corrispondenza di differenti regimi idrologici (magra, morbida). In particolare, sono state eseguite n. 3 campagne di misura.

Le misure vengono effettuate lungo ciascuna sezione al fine di valutare eventuali disomogeneità trasversali.

Per poter effettuare una stima quantitativa dei solidi in sospensione a partire dalla misura della torbidità, il monitoraggio è stato completato con analisi di laboratorio su campioni di matrice acquosa prelevati in contemporanea con il rilevamento della torbidità, per l'identificazione dei solidi sospesi totali (SST), al fine di individuare la correlazione tra torbidità e SST. Queste informazioni, accoppiate alle misure di portata effettuate nelle stazioni di monitoraggio idrometrico, consentono di stimare i carichi di solidi sospesi veicolati nelle diverse sezioni fluviali dal fiume Po e quindi di valutare, seppur in modo qualitativo, l'andamento lungo il tratto in studio della portata solida in sospensione.



Figura 28 – Geolocalizzazione dei quattro siti di campionamento

4.4.2 Torbidità

La torbidità viene comunemente definita come la proprietà di impedire la trasmissione della radiazione solare. La torbidità è un utile indicatore della presenza, nella colonna d'acqua, di particellato sospeso che può essere sia di origine organica che inorganica. Il monitoraggio continuo della distribuzione dei valori di torbidità permette di valutare la capacità che una parte del sistema ha di trattenere e accumulare materiale in sospensione. Nelle acque correnti, la torbidità è strettamente correlata alla quantità di materiale sospeso in acqua e al trasporto solido. Il materiale in sospensione rappresenta un elemento di vulnerabilità per l'ecosistema poiché incide sulla quantità della radiazione solare, sulla temperatura, l'ossigeno disciolto e l'adsorbimento di sostanze inquinanti non idrosolubili, che così possono essere trasportate in acqua. Un aumento di torbidità può avere infatti conseguenze piuttosto rilevanti. Le particelle presenti in superficie possono assorbire calore causando un aumento di temperatura del corso d'acqua che può portare ad una riduzione dei livelli di ossigeno disciolto. Inoltre, una ridotta trasparenza delle acque ostacola il passaggio della luce limitando così l'attività fotosintetica con ulteriore riduzione dell'ossigeno disciolto.

4.4.3 Solidi Totali

I solidi totali comprendono oltre ai solidi sospesi filtrabili e non, i solidi disciolti nell'acqua. Il contenuto naturale di solidi sospesi in un corso d'acqua può venire alterato da diversi fattori tra i quali il dilavamento di aree urbane, scarichi di depuratori ed erosione del suolo.

Basse concentrazioni di solidi totali possono limitare la vita acquatica, alte concentrazioni possono altresì abbassarne la qualità dell'acqua causando gli effetti sopra descritti.

4.4.4 Campionamenti condotti

Come precedentemente indicato, nell'ambito del monitoraggio della torbidità e dei SST in 4 sezioni fluviali del F. Po sono state condotte tre campagne di monitoraggio, nelle giornate di seguito riportate:

- 8 - 9 gennaio 2015 (campagna a) – portata liquida variabile da circa 1'000 m3/s (Cremona) a 1'400 m3/s (Pontelagoscuro)
- 19 - 20 marzo 2015 (campagna b) - portata liquida variabile da circa 2'200 m3/s (Cremona) a 2'700 m3/s (Pontelagoscuro)
- 8 ottobre 2015 (campagna c) - portata liquida variabile da circa 1'600 m3/s (Cremona) a 2'100 m3/s (Pontelagoscuro)

In ciascuna sezione fluviale e per ciascuna campagna si sono effettuati tre campionamenti per l'analisi dei solidi sospesi totali lungo la relativa sezione fluviale. Le sezioni di Cremona, Borgoforte e Pontelagoscuro sono state percorse dalla sponda sinistra idrografica alla sponda destra idrografica mente la sezione di Boretto è stata percorsa dalla sponda destra alla sponda sinistra (Tabella 2).

Campione	Posizione idrografica
CRE1_a/b/c	sinistra
CRE2_a/b/c	centro
CRE3_a/b/c	destra
BOR1_a/b/c	destra
BOR2_a/b/c	centro
BOR3_a/b/c	sinistra
BRG1_a/b/c	sinistra
BRG2_a/b/c	centro
BRG3_a/b/c	destra
PTL1_a/b/c	sinistra
PTL2_a/b/c	centro
PTL3_a/b/c	destra

Tabella 2 - Posizionamento e codifica dei campioni raccolti

Per ogni sito si è proceduto a registrare in continuo i valori di torbidità mediante l'utilizzo delle suddette sonde multiparametriche. Per questo motivo sono stati effettuati dei passaggi da sponda a sponda lungo la relativa sezione fluviale, a differenti profondità. Inoltre in tre punti della sezione si è proceduto al campionamento dell'acqua superficiale da destinare alle analisi di laboratorio per la stima dei solidi sospesi totali (SST).



Figura 29 - Sezione fluviale di Cremona durante la campagna c



Figura 30 - Sezione fluviale di Boretto durante la campagna c



Figura 31 - Sezione fluviale di Borgoforte durante la campagna c



Figura 32 - Sezione fluviale di Pontelagoscuro durante la campagna c

Di seguito vengono riportati a titolo esemplificativo le rotte (i tracciati) percorsi nelle sezioni investigate di Borgoforte e di Pontelagoscuro e i punti di campionamento per i TSS, utili per capire la metodica utilizzata (Figura 33 e Figura 34).

I colori identificano i tragitti tra una sponda e l'altra. In rosso il primo passaggio rilevando in continuo la torbidità alla profondità 0 – 0,50 m dal pelo libero; in verde il tragitto opposto con rilievi di torbidità tra la profondità 0,5 e 1,5 m; in giallo il terzo passaggio con rilievi nella zona 1,5 – 3 m di profondità ed infine in azzurro l'ultimo passaggio con misure di torbidità oltre i 3 m di profondità.



Figura 33 - Tracciato GPS dei transetti percorsi nella sezione di Borgoforte durante la campagna a da sponda sinistra a destra



Figura 34 - Tracciato GPS dei transetti percorsi nella sezione di Borgoforte durante la campagna a da sponda sinistra a destra

4.4.5 Risultati delle attività di monitoraggio

4.4.5.1 Valutazione delle concentrazioni di SST e relazione con la torbidità monitorata

In laboratorio sono state eseguite le analisi dei 36 campioni raccolti per la stima dei solidi sospesi totali mediante metodica APAT CNR IRSA 2090.

Nella Figura 35 si mostrano i risultati delle analisi effettuate in laboratorio in merito al contenuto di SST nei tre punti di campionamento per ciascuna sezione fluviale e per ciascuna campagna di monitoraggio. Come è possibile osservare la seconda campagna è stata caratterizzata da concentrazioni di SST di oltre un ordine di grandezza superiore rispetto alla prima campagna. L'ultima campagna di monitoraggio registra valori intermedi tra le prime due.

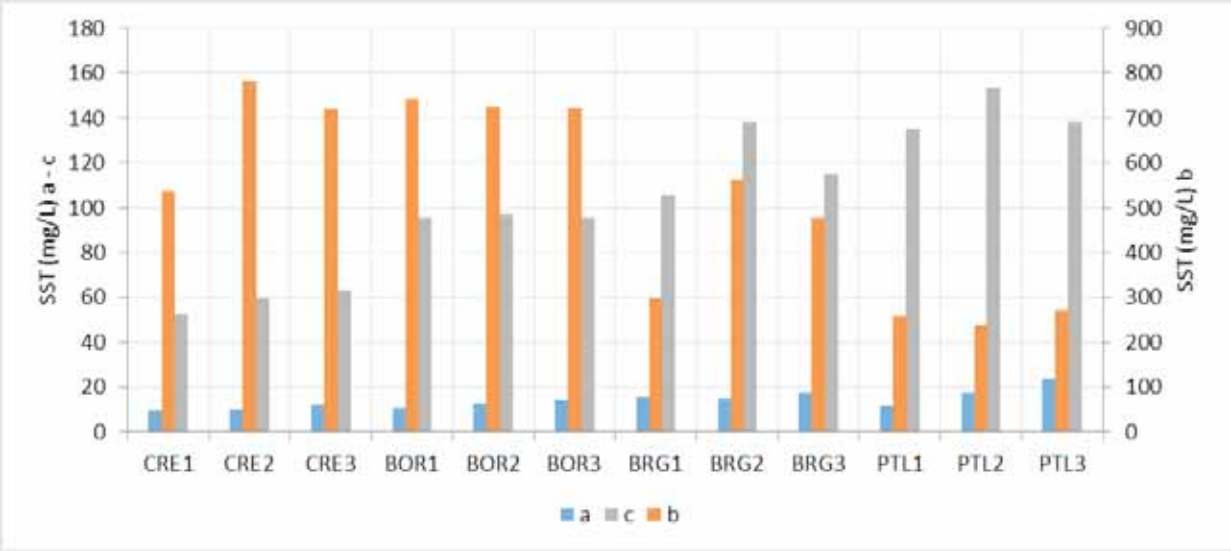


Figura 35 - Andamento dei SST nelle 4 sezioni per ciascuna campagna

In Tabella 3 si sintetizzano i risultati delle tre campagne nelle 4 sezioni fluviali utilizzando i valori medi delle grandezze stimate lungo la sezione fluviale.

Campagna	Sito	SST (mg/L)	Torbidità (NTU)	Q (m^3/s)	Carico SST (kg/s)
a	**Cremona**	10.65	10.63	997.80	10.6
a	**Boretto**	12.63	12.53	1093.85	13.8
a	**Borgoforte**	16.00	16.20	1317.21	21.1
a	**Pontelagoscuro**	17.75	20.27	1437.32	25.5
b	**Cremona**	679.50	645.73	2229.00	1514.6
b	**Boretto**	729.20	651.47	2406.00	1754.5
b	**Borgoforte**	446.00	360.40	2551.00	1137.7
b	**Pontelagoscuro**	256.67	232.47	2673.00	686.1
c	**Cremona**	58.51	48.67	1571.00	91.9
c	**Boretto**	96.06	77.67	1762.00	169.3
c	**Borgoforte**	119.36	96.33	1926.00	229.9
c	**Pontelagoscuro**	141.99	136.33	2069.00	293.8

Tabella 3 - Sintesi dei risultati medi ottenuti in ciascuna sezione e per ciascuna campagna

Com'è possibile osservare in Figura 36 e in Tabella 3, la prima campagna di monitoraggio è stata caratterizzata da portate inferiori, seguita dalla terza campagna e infine dalla seconda con portate sensibilmente più elevate.

Inoltre, è possibile osservare come si possa passare dalle decine di kilogrammi al secondo di solidi in sospensione durante la prima campagna, alle centinaia di kilogrammi per secondo durante la terza campagna, alle migliaia di kg/s per la seconda.

In Figura 36 si può osservare che mentre per la prima e terza campagna le concentrazioni di SST aumentano all'aumentare della portata e quindi da monte a valle, durante la seconda campagna si ha un aumento delle concentrazioni a Boretto rispetto a Cremona, seguito poi da un abbassamento dei valori di SST a Borgoforte e Pontelagoscuro.

Questo comportamento è osservabile anche in Tabella 3 dai dati di torbidità monitorati.

Questo fenomeno è riconducibile alle caratteristiche dell'evento monitorato. La prima e la terza campagna di monitoraggio ricadono a valle di eventi non particolarmente intensi e soprattutto, sono state condotte piuttosto distanti dall'evento meteorico. Questo è osservabile in Figura 36 dove gli idrogrammi risultano essere praticamente costanti nel tempo.

La seconda campagna di monitoraggio, invece, è stata condotta proprio in corrispondenza dell'onda di piena conseguente ad un evento meteorico intenso. In particolare, mentre la sezione di Cremona è stata monitorata durante l'inizio della fase calante del picco di piena, le altre sezioni sono state monitorate durante il picco del colmo di piena.

Si ipotizza quindi che se fossero state condotte le misurazioni successivamente al passaggio dell'onda di piena si sarebbero osservate torbidità e SST decisamente superiori e con andamento crescente da monte verso valle.

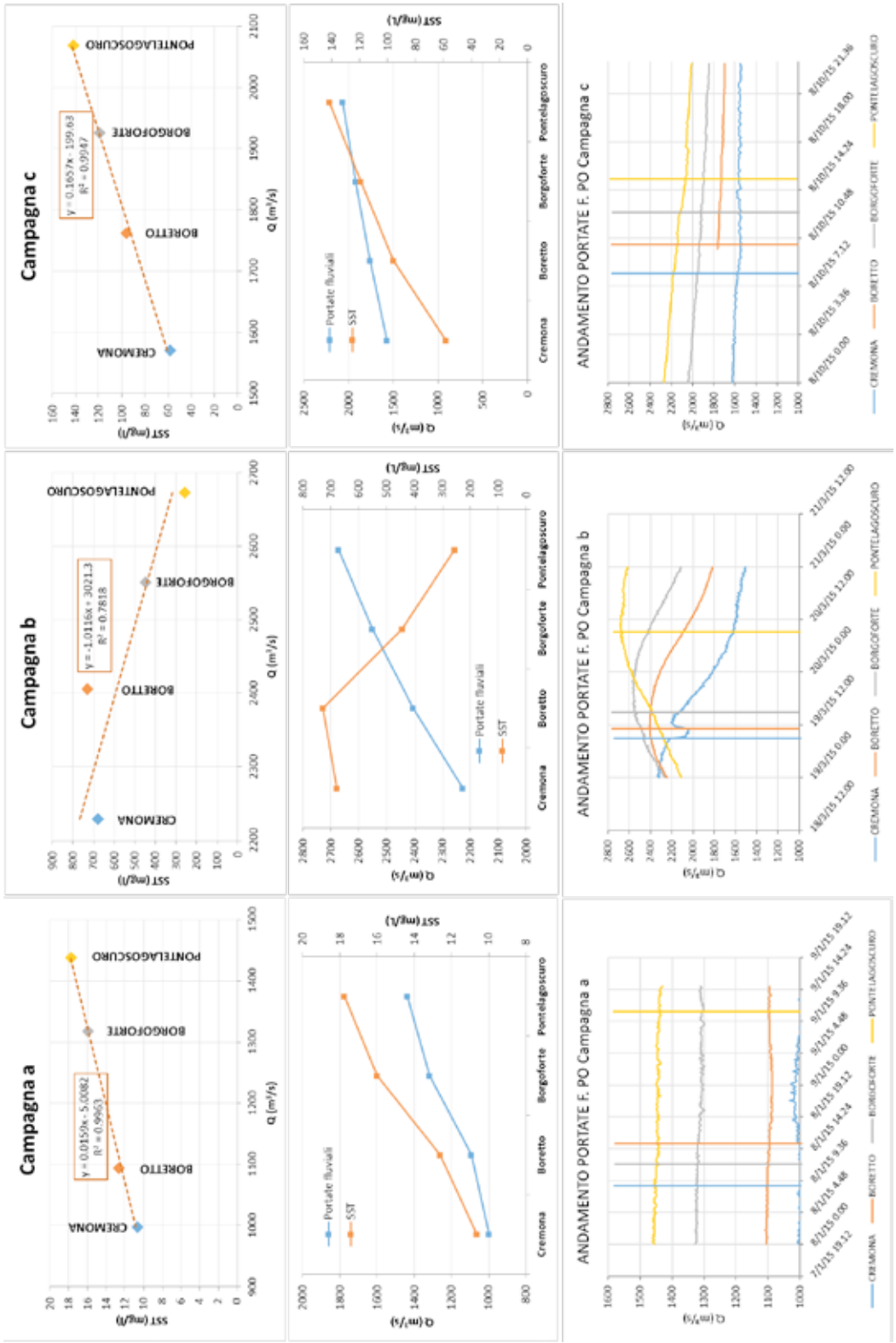


Figura 36 - Andamento delle concentrazioni di SST in funzione della portata fluviale e variabilità di quest'ultima nel tempo (i segmenti verticali rappresentano l'orario di campionamento) e nelle sezioni

In Figura 37 è riportata la relazione esistente tra la torbidità e i SST tal quale e utilizzando dati normalizzati (LOG10) nelle diverse sezioni fluviali. Com'è possibile osservare i punti si posizionano tutti lungo un'unica direzione permettendo, quindi, di identificare un'unica relazione tra la torbidità e i SST per l'intero tratto fluviale (Figura 38) con un elevato coefficiente di regressione R^2 pari a 0.98.

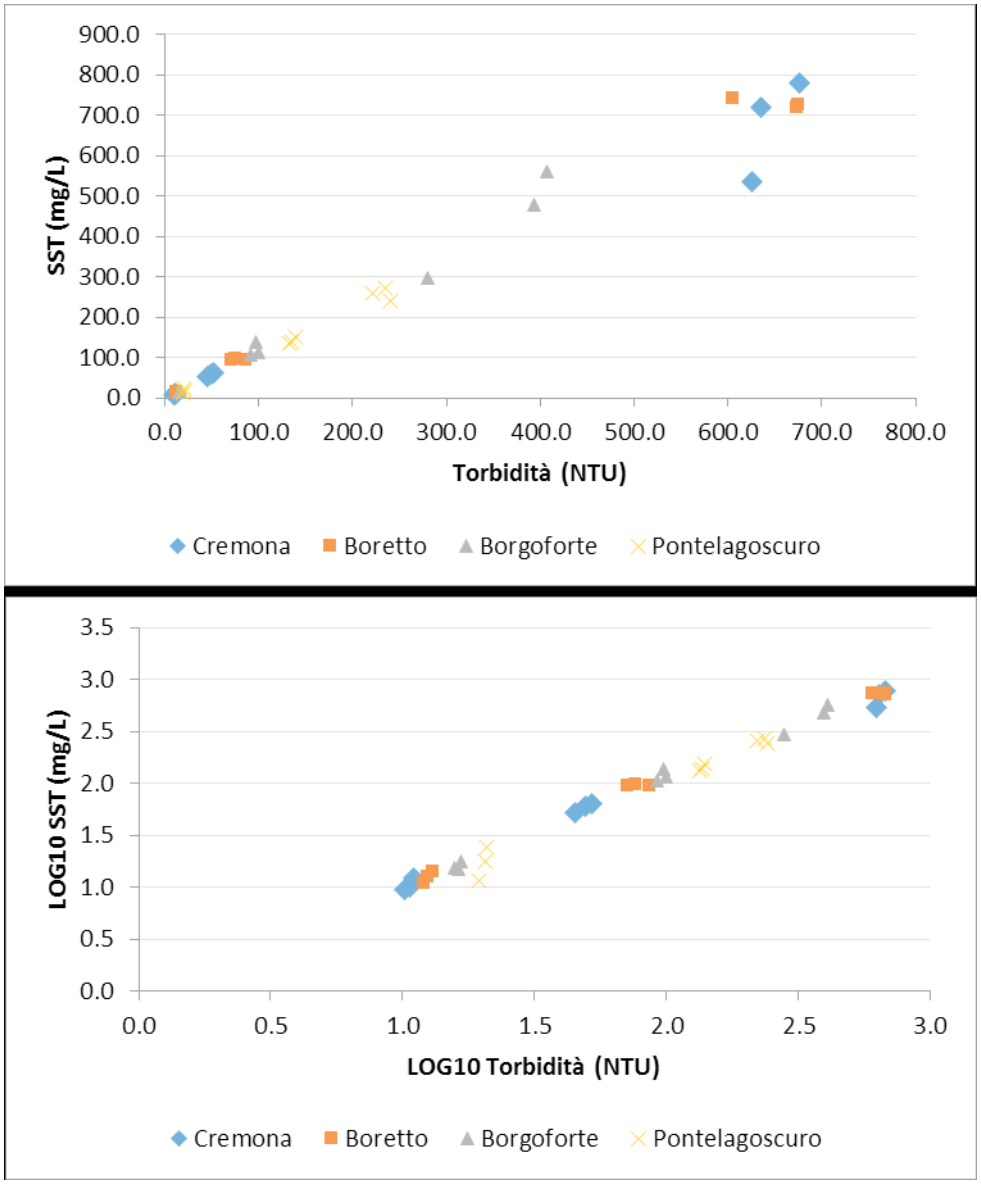


Figura 37 - Grafico della relazione tra Torbidità e SST in tutte le sezioni monitorate e per tutte le 3 campagne utilizzando i dati tal quali e normalizzati (LOG10)

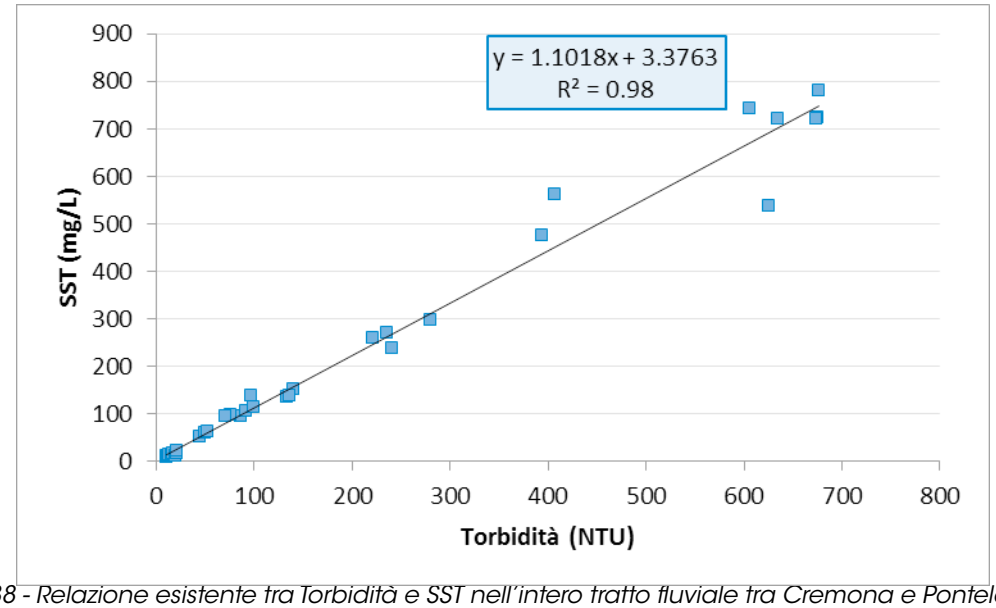


Figura 38 - Relazione esistente tra Torbidità e SST nell'intero tratto fluviale tra Cremona e Pontelagoscuro

Mediante l'utilizzo dell'equazione riportata in Figura 38, si potranno quindi in futuro stimare le concentrazioni di SST sulla base delle sole misure di torbidità.

Questo risulta essere un importante risultato pratico, poiché la torbidità è un parametro facilmente monitorabile, anche in continuo mediante strumentazione automatica a basso costo e scarsa manutenzione, cosa che non è valida per il monitoraggio in continuo dei SST.

4.4.5.2 Andamento della torbidità lungo le sezioni monitorate

Come anticipato precedentemente, durante le tre campagne di monitoraggio ciascuna sezione fluviale è stata percorsa mediante natante. La sezione è stata percorsa più volte al fine di monitorare a diverse profondità e lungo la sezione la torbidità delle acque del Po. Questa analisi ha avuto come scopo l'identificazione di eventuali gradienti lungo la sezione fluviale al fine di valutare possibili aree di ricarica e di sedimentazione.

A causa della forte corrente non è stato possibile percorrere le sezioni sempre in maniera rettilinea e lungo la stessa direttrice (Figura 33 e Figura 34). Al fine di rendere più omogenee tra di loro le sezioni investigate durante le campagne si è deciso di prendere in considerazione una ipotetica sezione intermedia tra le quattro percorse dal natante. Questo consente inoltre una più facile lettura dei dati riportati nei grafici a seguire. In Figura 39 vengono riportate le tracce medie delle sezioni percorse nei diversi siti.



Figura 39 - Tracciato delle diverse sezioni di misura. In alto a partire da destra abbiamo la sezione di Cremona e, a sinistra, quella di Boretto; in basso, sempre da destra verso sinistra, le sezioni di Borgoforte e di Pontelagoscuro

Nella Figura 40, Figura 41 e Figura 42 è possibile osservare la distribuzione della torbidità lungo la sezione fluviale in funzione della profondità durante le tre campagne di monitoraggio. I grafici sono stati ottenuti mediante l'interpolazione lineare della griglia di punti monitorati, che seppur molto fitta poiché la sonda acquisiva un valore ogni 5 secondi, non risultava essere continua. Ogni grafico è stato sviluppato con una propria scala cromatica e numerica. Questo permette di identificare le variazioni contenute di torbidità lungo la sezione e la profondità non altrimenti individuabili se fosse stata utilizzata un'unica scala.

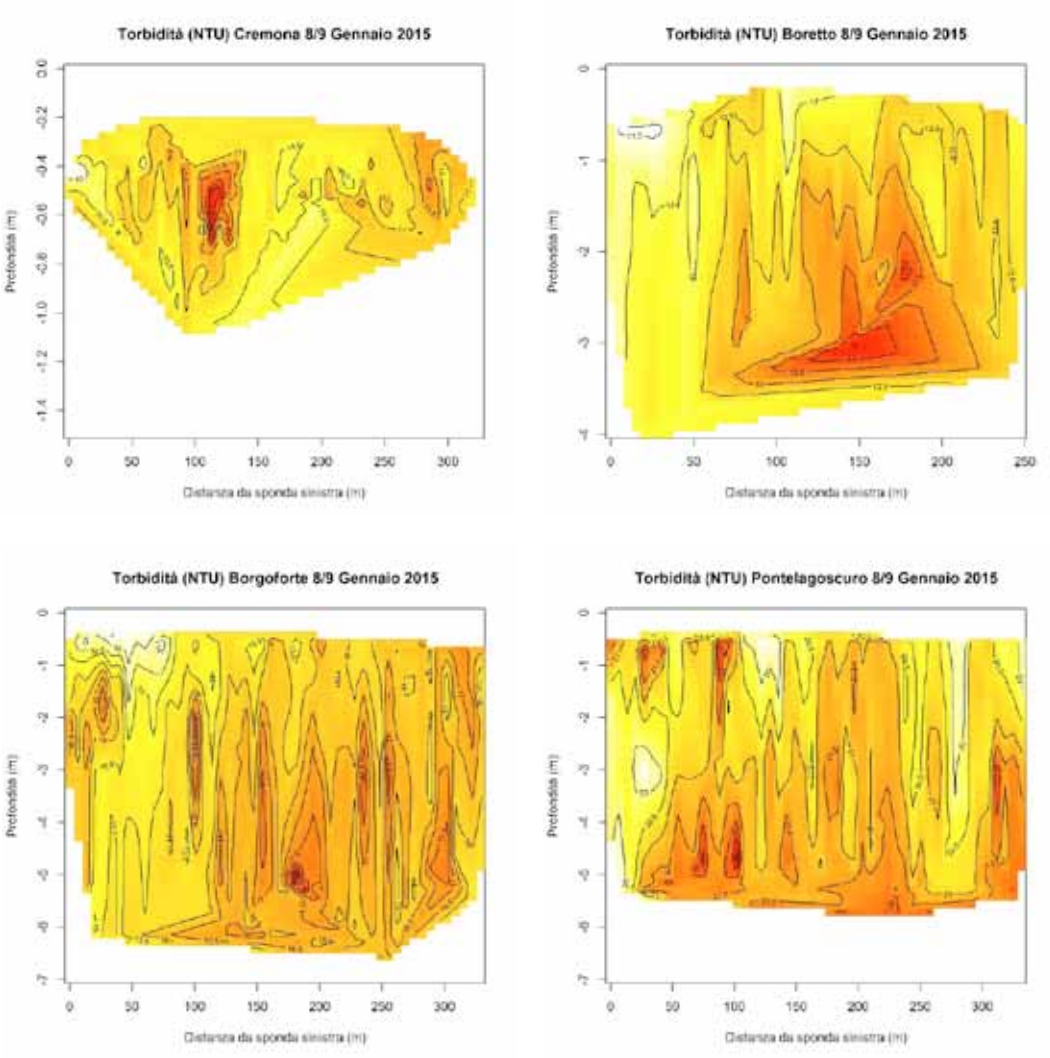


Figura 40 - Andamento della torbidità con la profondità lungo le 4 sezioni fluviali durante la campagna di monitoraggio effettuata nei giorni 8 e 9 gennaio 2015; la scala cromatica è differente in ciascun grafico al fine di evidenziare le differenze interne alla sezione non visibili con un'unica scala

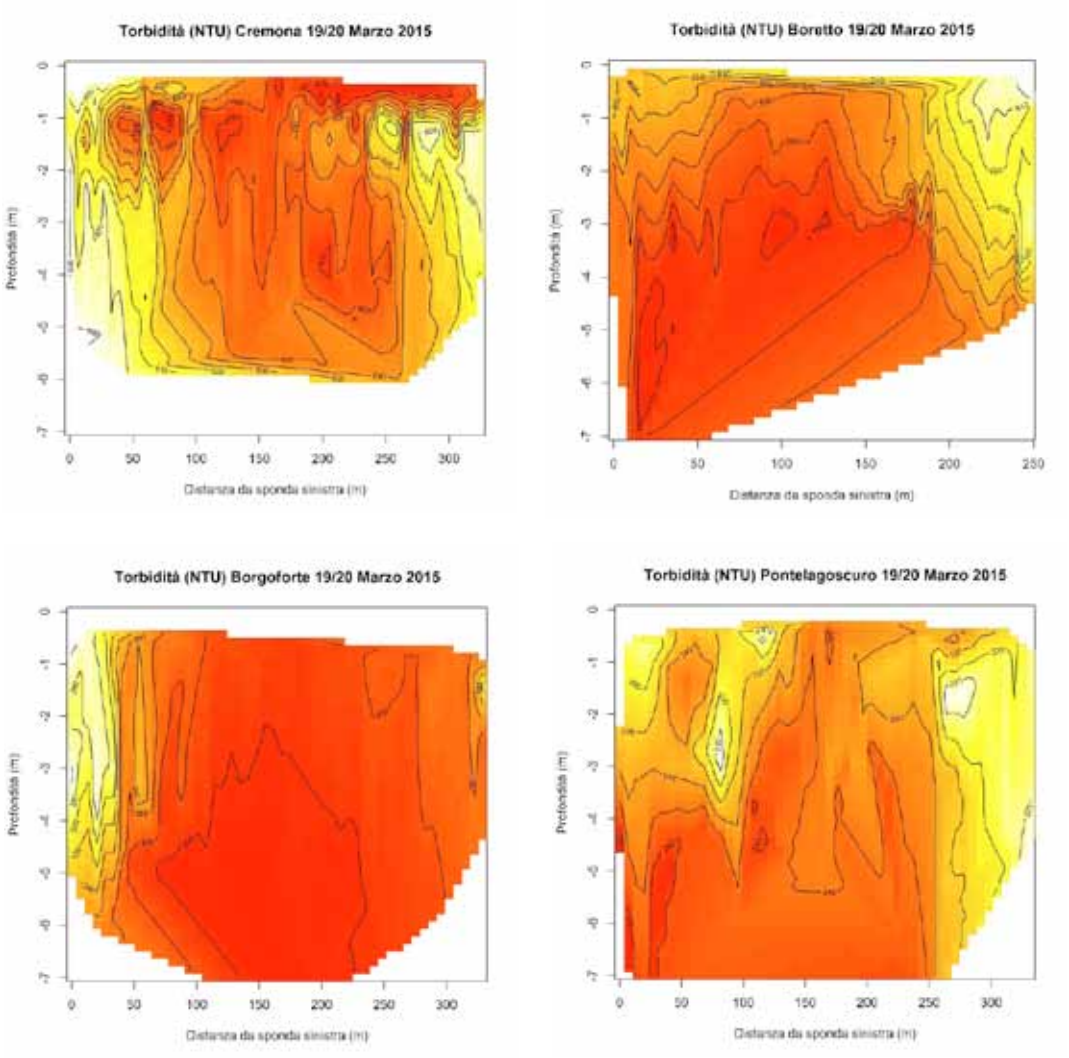


Figura 41 - Andamento della torbidità con la profondità lungo le 4 sezioni fluviali durante la campagna di monitoraggio effettuata nei giorni 19 e 20 marzo 2015; la scala cromatica è differente in ciascun grafico al fine di evidenziare le differenze interne alla sezione non visibili con un'unica scala

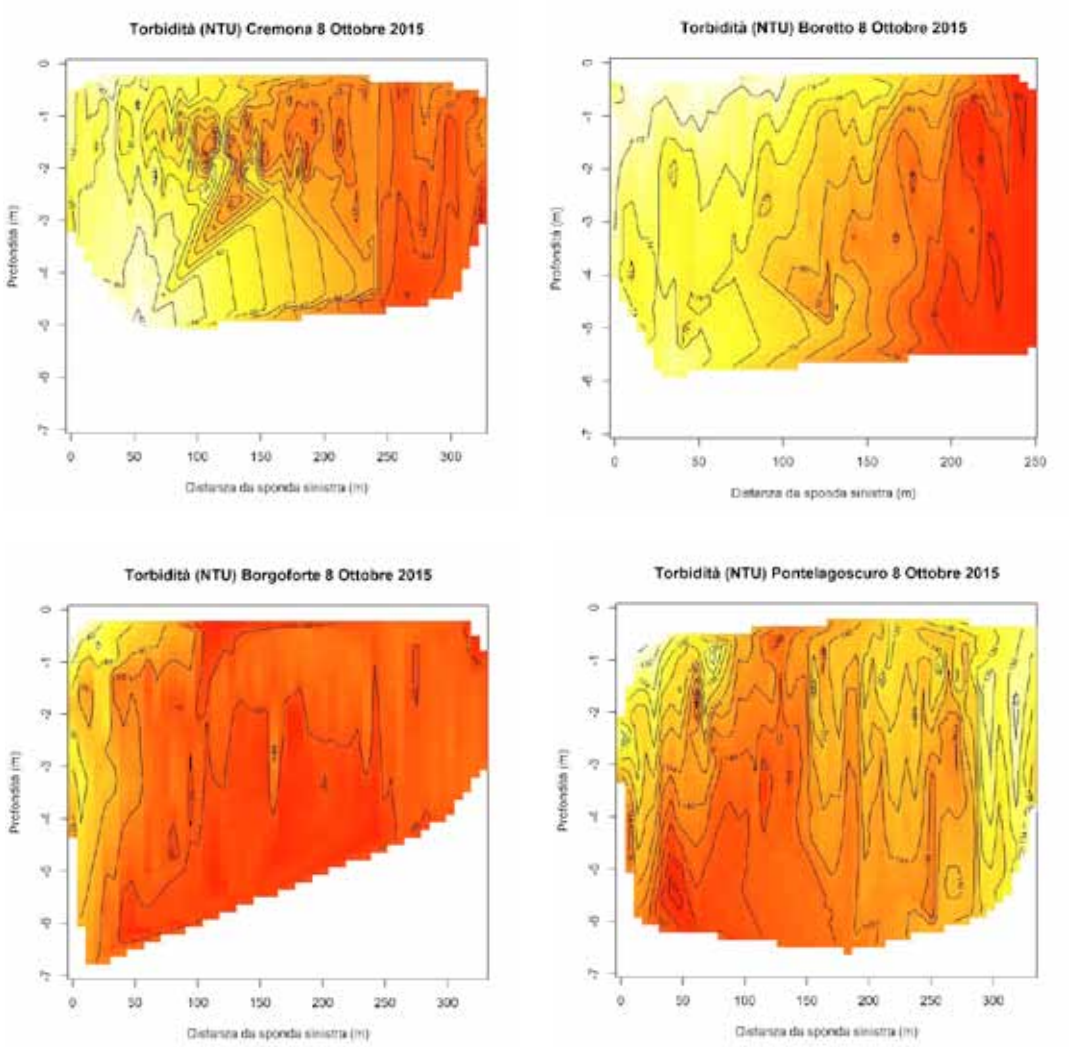


Figura 42 - Andamento della torbidità con la profondità lungo le 4 sezioni fluviali durante la campagna di monitoraggio effettuata nel giorno 8 ottobre 2015; la scala cromatica è differente in ciascun grafico al fine di evidenziare le differenze interne alla sezione non visibili con un'unica scala

Come si può osservare dalle figure precedenti, a Cremona, specialmente durante la terza campagna ma anche in parte durante la prima e la seconda, si possono osservare valori di torbidità più elevati in destra idrografica del fiume rispetto alla sponda sinistra idrografica. Questo può essere ricondotto all'assetto planimetrico del fiume. La sponda destra della sezione monitorata risulta essere infatti il lato convesso della curva e quindi il punto di maggior accumulo di materiale.

Sensibilmente diverso è il comportamento della torbidità nella sezione di Boretto dove si osserva una variabilità non omogenea durante le tre campagne di monitoraggio. Durante la prima campagna si evidenziano valori leggermente superiori di torbidità rispetto al resto della sezione, unicamente a circa 3 m di profondità, nella zona centrale del tracciato. Durante la seconda e la terza campagna si evidenziano, invece, distribuzioni della torbidità opposte tra loro. Ovvero durante la seconda campagna si osservano valori inferiori di torbidità, lungo l'intera colonna d'acqua, in sponda destra mentre durante la terza campagna lungo la sponda sinistra. È da sottolineare che questo sito si trova in un tratto piuttosto rettilineo dell'alveo.

Nella sezione fluviale di Borgoforte, per tutte le tre campagne di monitoraggio, si osservano torbidità più basse, nell'intera colonna d'acqua, lungo la sponda sinistra. Questo è più evidente durante le campagne in cui si registrano valori di torbidità superiori. Anche in questo caso, come a Cremona, la sponda destra in cui si registrano torbidità più elevate si trova dal lato convesso della curva e quindi nel punto di maggiore accumulo, tant'è che poco a valle, sul lato destro dell'alveo, si trova una barra laterale piuttosto grande.

A Pontelagoscuro, come atteso, si evidenziano torbidità inferiori, lungo l'intera colonna d'acqua, lungo la sponda destra. Il lato convesso risulta infatti coincidere con la sponda sinistra in cui si osservano torbidità superiori.

4.4.6 Confronto tra i dati di torbidità riportati negli annali idrologici e il monitoraggio effettuato

Negli annali idrologici dell'ARPA Emilia Romagna - Servizio Idrometeorologico - Area Idrologia sono riportati, per alcune sezioni fluviali, i valori della portata torbida; di seguito si riportano i valori medi annui, espressi in kg/s:

- Po a Cremona (anno 2013): 41 kg/s;
- Po a Boretto (1957-1963, 1965-1972, 1986-1989, 2010, 2011, 2013): 271 kg/s;
- Po a Pontelagoscuro (1956-1973, 1975-1984, 1986-1991, 2010-2013): 310 kg/s.

Come riportato in precedenza, il monitoraggio condotto nell'ambito del presente studio è relativo a tre eventi differenti, di cui l'ultimo è stato effettuato in corrispondenza di portate liquide comprese tra 1'570 m3/s a Cremona e 2'070 m3/s a Pontelagoscuro, prossime a condizioni medie.

Dalle misure effettuate risulta pertanto che la torbidità media è stata pari a circa 90 kg/s a Cremona, 170 kg/s a Boretto, 230 kg/s a Borgoforte e 290 kg/s a Pontelagoscuro. Tali valori sono del tutto simili e confrontabili con quelli riportati negli annali.

Prendendo come riferimento la sezione di Pontelagoscuro, si ha che il trasporto torbido medio annuo è pari a circa 6 Mm3/anno. Tale valore è dello stesso ordine di grandezza del trasporto solido al fondo, che secondo il PGGS dell'Autorità di bacino del fiume Po è pari, a Pontelagoscuro, è pari a circa 5 Mm3/anno (periodo 1982-2005).

4.4.7 Conclusioni

La campagna di monitoraggio condotta ha permesso di identificare una relazione univoca, nell'intero tratto fluviale monitorato, tra torbidità e SST. Questo risulta essere un importante risultato poiché la torbidità è un parametro facilmente monitorabile anche in continuo mediante strumentazione automatica a basso costo e scarsa manutenzione cosa che non è valida per il monitoraggio in continuo dei SST.

Inoltre, la campagna di monitoraggio ha permesso di identificare distribuzioni abbastanza omogenee della torbidità con la profondità e lungo ciascuna sezione fluviale, mentre i valori differiscono molto tra le diverse sezioni di monitoraggio.

Infine, dalla compagna di monitoraggio emerge una sostanziale conferma del trasporto solido complessivo lungo il Po indicato negli annali idrologici dell'ARPA Emilia Romagna - Servizio Idrometeorologico - Area Idrologia. In particolare il trasporto solido in sospensione che perviene nell'area del Delta del Po e quindi nel mare Adriatico risulta pari, nella media annua, a circa 6 Mm3/anno.

Come già detto, tale valore è dello stesso ordine di grandezza del trasporto solido al fondo, che secondo il PGGS dell'Autorità di bacino del fiume Po è pari, a Pontelagoscuro, è pari a circa 5 Mm3/anno (periodo 1982-2005).

4.5 AGGIORNAMENTO DELLE ANALISI DEL BILANCIO DEL TRASPORTO SOLIDO DI FONDO DEL FIUME PO CONDOTTO NEL PROGRAMMA GENERALE DI GESTIONE DEI SEDIMENTI DEL FIUME PO

L'aggiornamento delle analisi condotte nell'ambito degli Studi di fattibilità di gestione dei sedimenti, condotti a supporto del Programma Generale di Gestione dei Sedimenti (PGGS) dell'Autorità di bacino del fiume Po, viene effettuato con la stessa metodologia utilizzata negli studi suddetti.

Tale metodologia si basa essenzialmente sul "confronto" tra la configurazione dell'alveo inciso

rappresentata nel DTM 2005 dell'AdBPo (in quel che segue denominato DTM 2005), con quella desunta dal nuovo rilievo laser-scanner, effettuato nel corso del 2015 (d'ora in avanti denominato DTM 2015).

La metodologia utilizzata confronta, mediante GIS, le modificazioni planimetriche e volumetriche delle forme di erosione e di deposito avvenute nel decennio 2005-2015 nell'alveo inciso del fiume Po (in base alle analisi condotte per il PGGS il numero di forme di fondo da analizzare è pari a circa 1'500). Le analisi vengono effettuate scindendo quelle legate al fondo alveo e quelle associate alle forme emerse (barre, sponde), in modo da poter comprendere meglio le tendenze evolutive in atto nelle diverse componenti dell'alveo inciso.

L'analisi delle tendenze evolutive delle forme emerse è stata effettuata nell'intervallo temporale 2005 – 2015; a titolo esemplificativo, nella Figura 43, la linea blu rappresenta l'alveo inciso al 2005, le aree verdi i depositi formatisi tra il 2005 e il 2015, le aree rosse gli arretramenti delle linea di sponda (erosione), le aree arancioni i fenomeni di "erosione di barra", le aree azzurre i depositi di barra già esistenti nel 2005 (formatesi tra il 1982 e il 2005) e le aree gialle i depositi già esistenti nel 1982 (formatisi, quindi, precedentemente al 1982).

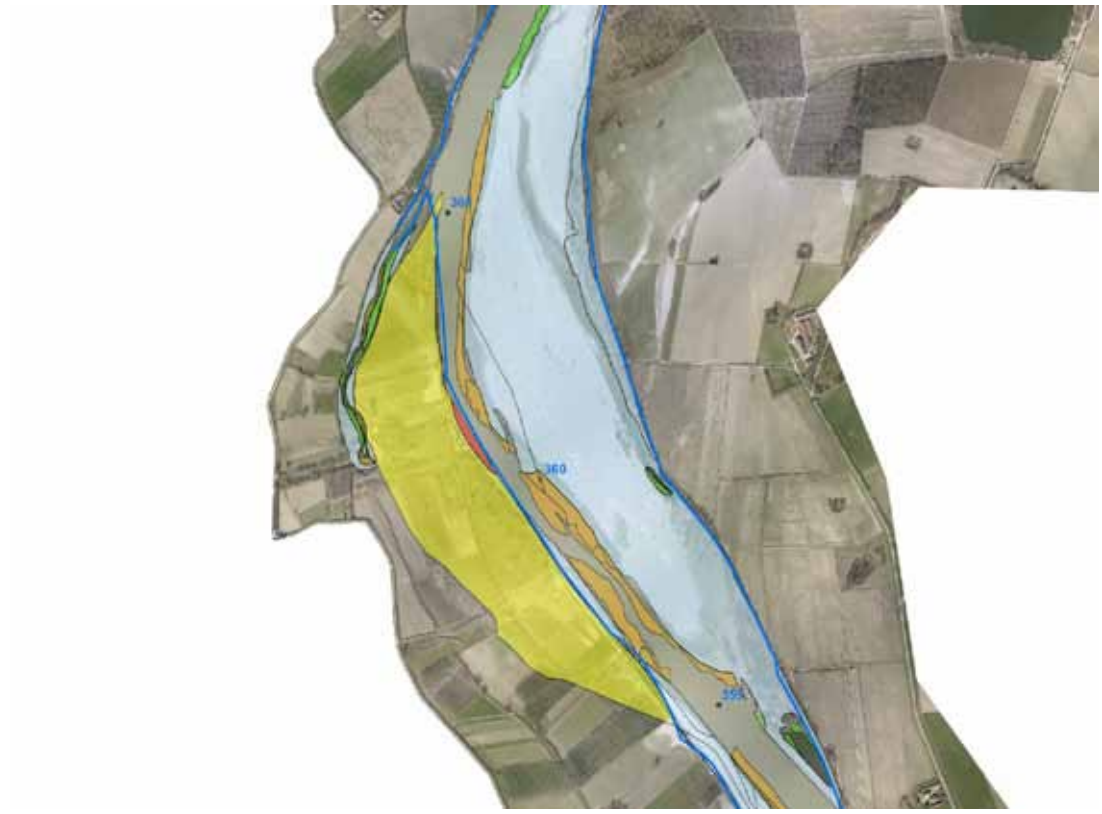


Figura 43 – Confronto PGGS 2005 condizione 2015.

Le aree arancioni, nel caso specifico, rappresentano i "potenziali" fenomeni di erosione delle barre esistenti nel 2005, come "mero" confronto tra la configurazione planimetria del 2005 e quella del 2015, quest'ultima desunta dalle ortofoto e dal DTM acquisiti con il volo effettuato nel 2015. La condizione dei livelli idrici in alveo, al momento del volo, era sensibilmente diversa dalla condizione rilevata nel 2005, a causa di portate idriche relativamente più elevate, comportanti livelli idrici più elevati fino a 3 metri circa.

La portata defluente in Po durante il rilievo laser-scanner del 2005 era dell'ordine di 500-800 m3/s, mentre nel 2015 la portata era dell'ordine di 1'000-1'500 m3/s tra Cremona e foce Oglio, 2'000-2'500 m3/s tra foce Oglio e foce Panaro e 1'500-2'000 m3/s a valle di foce Panaro, fino al Po di Goro.

Ne consegue che il confronto planimetrico tra le due configurazioni, 2005 e 2015, possa enfatizzare i fenomeni erosivi, per "apparente" elisione delle porzioni periferiche e altimetricamente meno elevate delle barre, le quali potrebbero essere ancora presenti ma sommerse. Va da sé, che non

tutti i fenomeni "apparentemente" elisivi, a carico delle barre, siano dovuti effettivamente a fenomeni di erosione, poiché gli stessi possono essere imputabili alla locale sommersione delle barre stesse. Onde poter minimizzare l'errore che si commetterebbe ammettendo acriticamente che i fenomeni "elisivi" sopra descritti siano imputabili a fenomeni erosivi strictu senso, è stata messa a punto una procedura analitica che, per step successivi, consentisse di stabilire quali forme fossero da attribuire indubbiamente a fenomeni di erosione.

Il primo step, di carattere essenzialmente "geomorfologico", è consistito nella valutazione dell'ampiezza planimetrica delle scarpate frontali delle barre emerse, rispetto al livello idrico 2005. Tale operazione ha consentito di definire l'impronta planimetrica delle scarpate sommerse e il conseguente limite del poligono di sommersione della barra, in modo da poterlo poi escludere dal calcolo volumetrico delle erosioni (Figura 44).



Figura 44 – Primo step di analisi. Esempio cartografico di fronte di barra sommerso (evidenziato, in trasparenza, dalla lettera "c").

In Figura 44 è riportato un esempio cartografico del primo step analitico sopra descritto. Il poligono giallo è una barra già esistente dal 1982, il poligono azzurro è una barra formatasi tra il 1982 e il 2002, il poligono arancione è il "potenziale" fenomeno erosivo del fronte della barra (poligono arancione "a") e di un deposito sabbioso, formatosi nel periodo 2002-2005, relativamente più basso del precedente e in continuità con l'alveo di magra (poligono arancione "b"). Note l'inclinazione del fronte delle barre (desunta dalle schede di rilevamento geomorfologico del PGGS, aggiornate nel presente studio), la quota delle barre al 2015 (da DTM 2015), i livelli idrici esistenti alla data di acquisizione delle ortofoto e del DTM, è stato possibile stimare la superficie di sommersione del fronte delle barre, come evidenziato graficamente nella Figura 44 ("c" in trasparenza).

In seconda battuta sono state individuate, visivamente (dalla ortofoto), le situazioni in cui la sussistenza della barra sommersa, al di sotto del pelo libero dell'acqua, è evidenziata dalla presenza di vegetazione arbustiva o arborea affiorante o sub-affiorante dal pelo libero della corrente fluviale (Figura 45).

Il confronto tra il livello idrico locale esistente all'epoca del volo 2015, con la quota della forma al 2005, ha consentito di stimare il tirante di sommersione della barra. In base alla tipologia di vegetazione, affiorante o sub-affiorante dal pelo libero dell'acqua, è stato possibile valutare, sia pur qualitativamente, la sussistenza di eventuali fenomeni di erosione a carico della barra sommersa.

Criteri del tutto analoghi a quelli sopra descritti sono stati applicati per individuare eventuali depositi di barra formatisi tra il 2005 e il 2015 e parzialmente o totalmente sommersi per effetto delle non ottimali condizioni idrauliche esistenti alla data di realizzazione del volo 2015.

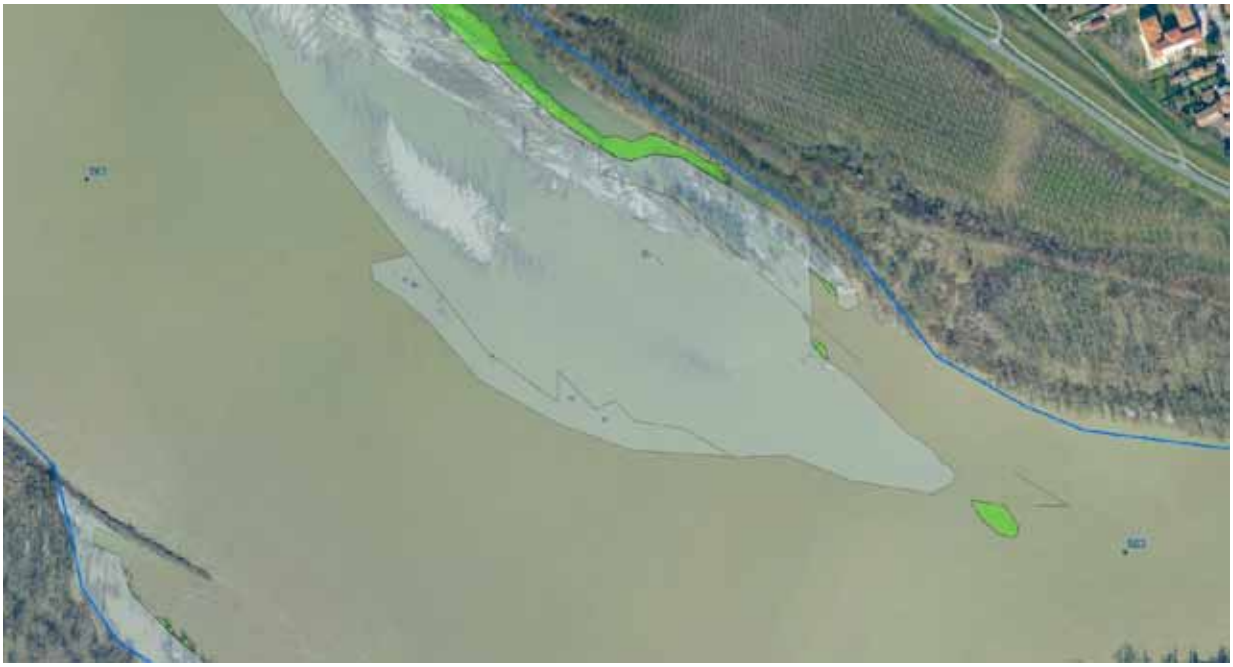


Figura 45 – Ortofoto 2015. Il cerchio blu evidenzia la presenza di vegetazione arbustiva allineata lungo l'asse fluviale, dalla quale si desume la sussistenza del deposito di barra sommerso.



Figura 46 – Il cerchio rosso evidenzia un'area in cui la presenza di vegetazione arbustiva e arborea evidenzia la presenza di nuovi depositi sommersi.

Si rendono necessarie ulteriori valutazioni in ordine alle seguenti problematiche principali, non risolvibili con il semplice confronto tra le condizioni 2005 e 2015:

1. 1. possibili ed eventuali modificazioni intermedie rispetto al 2015, le cui tracce possono essere state completamente cancellate prima del 2015;
2. 2. laddove siano state riscontrate forme di deposito planimetricamente stabili nell'intero periodo di osservazione, può persistere il dubbio se anche il deposito sia da considerare stabile o se invece si tratti di una forma dotata di un substrato stabile, con depositi in equilibrio dinamico con il sistema (in altre parole, la forma è planimetricamente persistente nel tempo ma soggetta a

cicli alterni di deposito e rimobilizzazione dei sedimenti presenti al di sopra della quota dell'alveo di magra);

3. 3. caratterizzazione "dell'impronta" dovuta all'attività ordinaria rispetto a quella straordinaria del corso d'acqua e modalità di erosione e deposito durante le diverse fasi di una piena straordinaria;
4. 4. individuazione dei criteri per stabilire la tendenza evolutiva delle forme di erosione e deposito.

L'esperienza maturata attraverso lo "Studio di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po" ha consentito di verificare che:

- forme di deposito caratterizzate da un grado di persistenza temporale limitata corrispondono a depositi transitori, nell'ambito della dinamica che "governa" la rimobilizzazione e il trasporto a valle di sedimenti precedentemente depositati su "barre stabili", fungenti da aree di "parcheggio" dei sedimenti stessi. Tali forme, non rivestono pertanto alcuna importanza nel bilancio complessivo di medio periodo (pari a quello in oggetto, corrispondente a 10 anni). Infatti, in termini di bilancio del trasporto solido, fenomeni di deposito ed erosione ripetuti nel tempo, nell'ambito del segmento fluviale in studio, si elidono;
- il grado di stabilità planimetrica di un deposito o della relativa "forma di fondo" è determinabile mediante l'analisi ed il confronto delle informazioni contenute nelle carte geomorfologiche disponibili, precedenti al 2015 (1982, 2002 e 2005), integrato attraverso l'analisi della condizione rilevabile dalle ortofoto 2015, nonché attraverso osservazioni in sito (sopralluoghi);
- la caratterizzazione "dell'impronta" dovuta all'attività ordinaria rispetto a quella straordinaria del corso d'acqua è stata impostata, nell'ambito del PGGS, attraverso la valutazione del "peso" che l'attività "ordinaria" (riconducibile alla normale attività stagionale del corso d'acqua) e "straordinaria" (riconducibile a eventi di piena, tipo quello verificatosi nel 2009) hanno nel controllo della configurazione morfologica delle forme presenti nell'alveo inciso e nella distribuzione spazio-temporale dei sedimenti. Nel caso specifico, dell'aggiornamento al 2015, oggetto della presente relazione, i livelli idrici esistenti alla data in cui è stato effettuato il volo per l'acquisizione delle ortofoto e del relativo DTM erano troppo elevati per consentire un'analisi di dettaglio, in grado di poter differenziare le forme sensibili ai diversi regimi del corso d'acqua. Infatti, la maggior parte delle forme relativamente basse rispetto al livello di magra erano sommerse. Inoltre, a causa del livello idrico troppo elevato, il piede delle sponde dell'alveo inciso risultava sistematicamente sommerso. Anche questa condizione è sfavorevole all'analisi delle dinamiche erosionali delle sponde e delle barre "storiche", di altezza comparabile con la quota golenale e delle relative tendenze evolutive. Altro elemento che ha limitato l'analisi della sensibilità delle forme di fondo al regime del corso d'acqua è la mancanza di dati relativi a step intermedi agli estremi temporali di analisi.

Per quanto riguarda le analisi relative alle tendenze evolutive del fondo alveo, si ricorda che le analisi condotte nell'ambito del PGGS hanno utilizzato una metodologia basata essenzialmente sul confronto tra i profili di pelo libero di magra in diverse epoche. Precisamente, per ogni campagna di rilievo si è determinato il profilo di pelo libero associato ad una portata assai ridotta (100 m3/s), ottenuto attraverso un modello di calcolo idrodinamico a fondo fisso del fiume Po implementato con le sezioni ricavate dai rilievi AIPo. I profili così individuati sono stati definiti come "profili di fondo medio", in quanto forniscono l'andamento del pelo libero che si forma in funzione della morfologia media del fondo dell'alveo. Dal confronto fra i diversi profili di fondo medio, associati ai diversi passi temporali posti all'interno del periodo di analisi, si è determinata l'evoluzione in atto nel fondo alveo, individuando quindi i tratti che sono soggetti a fenomeni di sovralluvionamento o di erosione, oppure quei tratti che risultano essere sostanzialmente stabili. Tale metodologia derivava dal fatto che fino ad allora era disponibile un solo rilievo di dettaglio del fondo alveo (2005).

Nel corso dell'anno 2015 è stata effettuata una nuova campagna di rilievi batimetrici, in corrispondenza delle zone prossime alle tracce delle sezioni ufficiali del fiume Po, allo scopo di ottenere informazioni coerenti con i dati relativi ai periodi precedenti al 2005. In particolare sono state rese disponibili le batimetrie del fondo alveo in corrispondenza delle sezioni comprese tra la n. 26 (Cremona) e la n. 44 (in prossimità di San Giacomo Po, a valle di Borgoforte).

In funzione dei nuovi rilievi 2015 è stato possibile procedere all'aggiornamento delle analisi volte a identificare le modificazioni intervenute lungo il fondo alveo tra il 2005 e il 2015, solo per il tratto compreso tra le suddette sezioni e quindi tra la progressiva km 375 e la progressiva km 482.

Per il tratto compreso tra la sezione 44 e l'incile del Po di Goro, a causa della mancanza di rilievi batimetrici aggiornati, non è stato possibile procedere all'aggiornamento delle analisi relative alle dinamiche evolutive relative al fondo alveo.

4.5.1 Analisi delle tendenze evolutive delle forme emerse – metodologia

In dettaglio, lo sviluppo delle attività svolte per studiare le tendenze evolutive relative alle forma di fondo emerse, prevede le fasi di seguito descritte:

Fase 1: analisi e confronto DTM 2005 (AdBPo) e DTM 2015 (AIPo)

La prima fase di lavoro comprende i seguenti passi:

- individuazione, censimento e analisi, in corrispondenza dei due estremi temporali in studio, dei seguenti elementi geomorfologici significativi: alveo di magra, processi evolutivi delle sponde (erosioni), barre, riempimenti di canali, copertura del suolo delle barre, forme macroscopiche dovute alla presenza delle acque di piena in zone golenali (riempimento di canali e paleo-alvei);
- definizione dei livelli di riferimento al 2005 ed eventuale "normalizzazione" della configurazione 2015 ai livelli 2005.
- confronto delle configurazioni ai due estremi temporali con individuazione, delimitazione e censimento delle modificazioni planimetriche delle forme di fondo (barre) e delle sponde;
- definizione delle unità geomorfologiche elementari di erosione e deposito.

Fase 2: impostazione del data-base e calcoli volumetrici

Il data-base relativo ai poligoni omogenei e alle informazioni numeriche ad essi associate è stato impostato attraverso:

- determinazione dell'area di ciascun poligono omogeneo (di erosione e deposito). Come già in precedenza detto, a causa della presenza di livelli idrici troppo elevati, alla data di realizzazione dei voli per la realizzazione del DTM 2015 e per l'acquisizione delle relative ortofoto, non è stato possibile differenziare, per i poligoni di erosione delle barre e delle sponde, le tipologie sensibili al regime straordinario da quelle sensibili al regime ordinario. Per ciascuna forma di deposito individuata è stato invece possibile determinare, dove presente, la frazione stabile, quella instabile (rimobilizzabile) e le relative tendenze. Per definire il grado di stabilità e la tendenza evolutiva di una forma di fondo è stato seguito il seguente processo diagnostico: a) persistenza temporale della forma nel periodo di osservazione, in molti casi associata ad estensione planimetrica della stessa; b) quota assoluta; c) persistenza temporale di una vegetazione arborea stabile e/o evoluzione, tra il 2002-2005 e il 2015, della copertura vegetale da nuda a cespugliosa fino a una vegetazione arborea, stabile; d) configurazioni geomorfologiche locali del corso d'acqua potenzialmente favorevoli al mantenimento e/o all'accrescimento della forma nel breve e medio periodo (ad es.: sponda convessa di un'ansa meandrica; sponda in curva convessa; presenza di pennelli che favoriscono il deposito).
- determinazione della quota media assoluta di ciascun poligono omogeneo (barre e sponde) e della relativa altezza media rispetto al livello di riferimento (livello 2005) e calcolo dei volumi elementari (per ciascun poligono), lungo la progressiva. Per quanto riguarda le forme di erosione, come già in precedenza detto, è stato tenuto conto della "superficie" di sommersione delle sponde e dei fronti delle barre "alte", preesistenti, correggendo adeguatamente la relativa superficie. Per quanto riguarda le barre sommerse, come già in precedenza esposto, sono state incluse nel computo dei volumi di erosione quelle la cui sussistenza al momento del volo era evidenziata in modo "indiretto", secondo la procedura analitica già descritta nel paragrafo precedente. Inoltre, sulla base delle conoscenze pregresse (PGGS) relative alla persistenza

temporale delle forme di fondo in funzione della relativa altezza media, è noto che, in generale, barre sommerse con tirante (al momento del volo) minore di un metro, rispetto alla quota che le stesse avevano nel 2005, possono essere certamente escluse dal calcolo dei volumi di erosione.

- determinazione dei poligoni corrispondenti alle barre preesistenti (barre preesistenti al 1982, depositi 1982-2005 e depositi 2002-2005), al netto dei fenomeni di erosione avvenuti complessivamente tra il 1982 e il 2015. La quota media assoluta dei poligoni risultanti, è stata confrontata con la quota media che gli stessi avevano nel 2005. Detto confronto ha permesso di individuare: 1) le forme che nell'intervallo 2005-2015 hanno subito un incremento di quota (deposito) ed i relativi volumi di deposito; 2) le forme che nell'intervallo 2005-2015 hanno subito una riduzione di quota (erosione) ed i relativi volumi di erosione; 3) le forme che nell'intervallo 2005-2015 non hanno subito modificazioni altimetriche significative (condizione di equilibrio).

Fase 3: verifiche in campagna

Il modello geomorfologico quantitativo, ricostruito attraverso le fasi di cui sopra, è stato verificato attraverso sopralluoghi, effettuati anche contestualmente alle operazioni di campionamento dei sedimenti, i quali hanno consentito una migliore caratterizzazione delle forme di erosione e di deposito e delle relative tendenze evolutive, delle tendenze evolutive non rilevabili fedelmente dalla cartografia e dai DTM disponibili, della granulometria prevalente dei depositi costituenti le forme di fondo e le sponde (v. campionamenti appositamente effettuati).

Fase 4: definizione di tratti omogenei e bilancio erosione/deposito

In funzione della granulometria prevalente (criterio sedimentologico) e della configurazione morfologica delle barre, sono stati differenziati e verificati i tratti omogenei già individuati nel PGGS, tenuto conto anche della presenza delle opere di difesa e delle opere di navigazione.

Per quanto riguarda la sensibilità delle forme di fondo alle diverse condizioni di regime idraulico, come già in precedenza esposto, le condizioni di livello idrico in alveo alla data di realizzazione del volo e la non disponibilità del rilievo batimetrico completo del fondo alveo, non hanno consentito l'applicazione degli indici morfologici già definiti e applicati in sede di redazione del PGGS.

4.5.2 Analisi delle tendenze evolutive delle forme emerse – risultati ottenuti

Vengono di seguito esposti i risultati delle analisi geomorfologiche eseguite nel segmento fluviale in studio, compreso tra lo sbarramento di isola Serafini e l'incile del delta, diramazione Po di Goro, nell'intervallo di analisi 2005 – 2015. Il segmento fluviale esaminato è stato suddiviso in sei "tratti omogenei", contraddistinti da condizioni litologiche, geomorfologiche e sedimentologiche complessivamente omogenee. Essi sono:

"tratto omogeneo D": dalla progressiva km 357 (sbarramento di isola Serafini) alla progressiva km 371 circa (confluenza canale di restituzione dell'impianto di Isola Serafini). In precedenza il tratto "D" si estendeva fino a foce Adda, ma in questa sede si è deciso di estenderlo fino al termine del meandro di Isola Serafini;

- "tratto omogeneo E": dalla progressiva km 371 alla progressiva km 408 circa (Confluenza Taro);
- "tratto omogeneo F": dalla progressiva km 408 alla progressiva km 464 circa (Confluenza Oglio).
- "tratto omogeneo G": dalla progressiva km 464 alla progressiva km 497 circa (Confluenza Secchia).
- "tratto omogeneo H": dalla progressiva km 497 alla progressiva km 567 circa (Pontelagoscuro).
- "tratto omogeneo I": dalla progressiva km 567 alla progressiva km 604 circa (diramazione Po di Goro).

Nei paragrafi seguenti vengono descritti, con riferimento ad ogni tratto omogeneo, i risultati emersi dall'analisi geomorfologica. Per ogni tratto viene riportata una tabella che riassume i valori caratteristici delle dinamiche in atto nel periodo 2005 - 2015, in particolare:

1. totale erosione: volume complessivamente eroso nel tratto da sponde e barre;
2. totale deposito: volume complessivamente depositato nel tratto su sponde, barre e canali;
3. bilancio (erosione – deposito): differenza tra volume complessivamente eroso nel tratto e quello depositato;
4. incidenza percentuale di depositi stabili o in via di stabilizzazione rispetto al totale dei depositi;
5. incidenza percentuale di depositi instabili rispetto al totale dei depositi.

Il tratto omogeneo D, dalla traversa di Isola Serafini fino alla confluenza con il canale di restituzione della centrale, il fiume Po ha le caratteristiche geomorfologiche tipiche di un corso d'acqua decisamente monocursale, relativamente canalizzato e meandriforme, di bassa energia. In questo tratto la portata idrica è estremamente variabile in funzione delle modalità di regolazione dello sbarramento di Isola Serafini, con regime estremamente impulsivo. L'ansa meandrica di Isola Serafini appare "congelata" dalla presenza di importanti opere di difesa spondale e di arginatura. I materiali presenti come depositi sono costituiti essenzialmente da sabbie e ghiaietto. Le ghiaie si riscontrano localmente sul fondo alveo e, più diffusamente, alla base dei depositi sabbiosi costituenti le barre laterali. Per quanto riguarda le forme di fondo, esse sono costituite da depositi sabbiosi, con ghiaietto. Le sponde risultano impostate in depositi sabbiosi da fini a molto fini. Le caratteristiche sostanziali di questo tratto sono di seguito sintetizzate:

SINTESI TRATTO D - Intervallo temporale di osservazione = 2005 - 2015	
TOTALE EROSIONE (mc) =	1'921'878
TOTALE DEPOSITO (mc) =	2'295'257
BILANCIO (EROSIONE-DEPOSITO) (mc) =	-373'379
PERCENTUALE DI DEPOSITI STABILI O IN VIA DI STABILIZZAZIONE (%) =	83%
PERCENTUALE DEPOSITI INSTABILI (%) =	17%

Tabella 4 - Volumi dinamiche evolutive TRATTO D – intervallo 2005 – 2015w

- il volume di materiale complessivamente eroso dalle sponde e attraverso la rimobilizzazione delle barre, nell'intervallo temporale esaminato, risulta pari a circa 1,92 Mm3, di cui 1,84 Mm3 (96%) circa derivano dalla rimobilizzazione di forme di fondo (barre). Solo il 4% delle forme di erosione sono a carico delle sponde;
- il volume complessivamente depositato ammonta a 2,29 Mm3 circa. Ne risulta, complessivamente, un bilancio "erosione – deposito" negativo, pari a -0,37 Mm3 (forme di fondo in deposito) a cui corrisponde un tasso di deposito dell'ordine di 37'000 m3/anno. Tale tendenza, molto più marcata nel periodo 1982-2005, appare condizionata, nel medio e lungo periodo, essenzialmente dalla dinamica indotta dalla regolazione dello sbarramento di Isola Serafini sulla sedimentazione all'interno del meandro stesso, regolazione che dipende essenzialmente dal regime idraulico del F. Po nel periodo di analisi;
- la maggior parte dei depositi di barra, formatisi nel periodo 2005 – 2015, risulta essere instabile (circa l'83% dei depositi è instabile, il 17% circa stabile o in via di stabilizzazione). Tale dato evidenzia una forte tendenza alla mobilità delle forme di fondo. Anche questa condizione appare come una conseguenza dovuta alla risposta del corso d'acqua alla presenza di importanti opere di regimazione e di difesa idraulica, le quali avrebbero limitato sensibilmente la possibilità di divagazione dell'alveo e la presa in carico di materiale dalle sponde.

Il tratto omogeneo E (dal canale di restituzione della centrale di Isola Serafini a confluenza Taro) risente fortemente della dinamica indotta dalla presenza dello sbarramento di Isola Serafini a monte, nonché della presenza di consistenti opere di regimazione, atte a mantenere condizioni favorevoli alla navigazione. L'alveo è monocursale sinuoso, incassato in depositi prevalentemente sabbiosi da fini a molto fini, limosi, costituenti le sponde incise. Le forme di fondo (barre) sono costituite

prevalentemente da sabbie. Si riscontra la presenza di un "substrato" sabbioso – ghiaioso nell'alveo di magra sommerso. Nonostante la litologia prevalente nelle forme di fondo sia data da sabbie, le barre sono caratterizzate da altezza relativamente elevata e fronti inclinati. Le caratteristiche sostanziali di questo tratto sono di seguito sintetizzate:

SINTESI TRATTO E - Intervallo temporale di osservazione = 2005 - 2015	
TOTALE EROSIONE (mc) =	3'111'487
TOTALE DEPOSITO (mc) =	4'494'806
BILANCIO (EROSIONE-DEPOSITO) (mc) =	-1'383'319
PERCENTUALE DI DEPOSITI STABILI O IN VIA DI STABILIZZAZIONE (%) =	78%
PERCENTUALE DEPOSITI INSTABILI (%) =	22%

Tabella 5 - Volumi dinamiche evolutive TRATTO E – intervallo 2005 – 2015

- il volume di materiale complessivamente eroso dalle sponde e attraverso la rimobilizzazione delle barre, nell'intervallo temporale esaminato (2005 – 2015), risulta pari a circa 3,11 Mm3, di cui il 95% circa deriva dalla rimobilizzazione di forme di fondo (barre). Si conferma e si rafforza l'osservazione di una decisa diminuzione degli apporti per erosione di sponda, rispetto ai segmenti fluviali situati a monte di Isola Serafini (v. PGGS), dovuta alla maggiore incidenza delle di opere di difesa idraulica e, nella fattispecie, delle opere di navigazione. Infatti, solo il 5% delle forme di erosione sono a carico delle sponde;
- il volume complessivamente depositato ammonta a 4,49 Mm3 circa. Ne risulta, complessivamente, un bilancio "erosione – deposito" negativo, pari a -1,38 Mm3 (forme di fondo in deposito), a cui corrisponde un tasso di deposito dell'ordine di 0,14 Mm3/anno, inferiore rispetto a quello relativo al periodo 1982-2005, che era pari 0,63 Mm3/anno;
- è da sottolineare l'incremento relativo dei depositi stabili o in via di stabilizzazione (78% circa) nel periodo 2005-2015, a fronte del 65% del periodo di analisi precedente (1982-2005).

Il tratto omogeneo F (da confluenza Taro a confluenza Oglio) è in continuità geomorfologica con il precedente. Infatti, anche questo tratto risente fortemente della dinamica indotta dalla presenza delle opere di navigazione. L'alveo è monocursale, da sinuoso a localmente meandriforme, incassato in depositi prevalentemente sabbiosi da fini a molto fini, limosi, costituenti le sponde incise. Le forme di fondo (barre) sono costituite prevalentemente da sabbie. La presenza di litofacies sabbioso - ghiaiose nell'alveo di magra sommerso si riscontra solo fino a confluenza Enza (progressiva 437 circa). A valle di confluenza Enza il tratto si differenzia dai precedenti per la mancanza di depositi sabbioso-ghiaiosi nell'alveo di magra sommerso. Pertanto, a partire da confluenza Enza sponde, alveo e forme di fondo risultano impostati omogeneamente in depositi prevalentemente sabbiosi e sabbioso-limosi. Le caratteristiche sostanziali di questo tratto sono di seguito sintetizzate:

SINTESI TRATTO F - Intervallo temporale di osservazione = 2005 - 2015	
TOTALE EROSIONE (mc) =	3'176'947
TOTALE DEPOSITO (mc) =	6'770'269
BILANCIO (EROSIONE-DEPOSITO) (mc) =	-3'593'322
PERCENTUALE DI DEPOSITI STABILI O IN VIA DI STABILIZZAZIONE (%) =	74%
PERCENTUALE DEPOSITI INSTABILI (%) =	26%

Tabella 6 - Volumi dinamiche evolutive TRATTO F – intervallo 2005 – 2015

- il volume di materiale complessivamente eroso dalle sponde e attraverso la rimobilizzazione delle barre, nell' intervallo temporale esaminato (2005 – 2015), risulta pari a circa 3.18 Mm3, di cui il 96% circa deriva dalla rimobilizzazione di forme di fondo (barre). Si conferma il trend di una progressiva e sensibile diminuzione degli apporti per erosione di sponda, dovuta alla maggiore

incidenza delle di opere di navigazione. Infatti, solo il 4% delle forme di erosione sono a carico delle sponde (33% nel periodo 1982-2005). Se si considera che il tratto fluviale in studio è parte di un sistema fluviale tipicamente meandriforme, tale rapporto è indicativo ed esemplificativo della scarsissima naturalità geomorfologica del corso d'acqua;

- il volume complessivamente depositato ammonta a 6,77 Mm3 circa. Ne risulta, complessivamente, un bilancio "erosione – deposito" negativo, pari a -3,59 Mm3 (forme di fondo in condizioni di deposito) a cui corrisponde un tasso di deposito dell'ordine di 0,36 Mm3/anno, a fronte di un tasso di sedimentazione di 1,14 Mm3/anno nel periodo 1982-2005. Come già esposto e argomentato nel PGGS, la condizione di deposito è da ricondurre alla risposta del sistema fluviale ai pennelli di navigazione, costituenti delle vere e proprie "trappole" sedimentarie. La sensibile riduzione del tasso di sedimentazione nel periodo 2005-2015 rispetto al periodo 1982-2005 è da attribuire, come già emerso dagli studi effettuati nell'ambito del PGGS, al progressivo raggiungimento della capacità degli "invasi" a tergo dei pennelli di navigazione. Si consideri che la capacità residua stimata nel 2002-2005 era dell'ordine del 10% - 20%. È del tutto plausibile che la stessa tenda a ridursi esponenzialmente nel tempo, fino ad annullarsi;
- si conferma il trend del tratto precedente, evidenziante una elevata incidenza percentuale dei depositi stabili o in via di stabilizzazione, rispetto a quelli instabili. Questi risultano dell'ordine del 26%, del tutto analoga a quella riscontrata nel periodo 1982-2005 (25%). Anche questo trend è indicativo di una scarsa naturalità geomorfologica, esplicantesi in una forte "staticità" dei depositi, prevalentemente a tergo dei pennelli di navigazione;

Il tratto omogeneo G (da confluenza Oglio a confluenza Secchia) costituisce la parte terminale del tratto fluviale navigabile. L'alveo, complessivamente monocursale, presenta una prima parte rettilineo-sinuosa (40% circa del tratto) ed una seconda parte meandriforme. L'evoluzione meandrica è "bloccata" dalla presenza di opere di difesa radente e da pennelli di navigazione (come avviene nei tratti descritti precedentemente). L'alveo è incassato in depositi prevalentemente sabbiosi da fini a molto fini, limosi, costituenti le sponde incise. Le forme di fondo (barre) ed il fondo alveo sono costituiti prevalentemente da sabbie. Le caratteristiche sostanziali di questo tratto sono di seguito sintetizzate:

SINTESI TRATTO G - Intervallo temporale di osservazione = 2005 - 2015	
TOTALE EROSIONE (mc) =	3'773'367
TOTALE DEPOSITO (mc) =	5'317'227
BILANCIO (EROSIONE-DEPOSITO) (mc) =	-1'543'860
PERCENTUALE DI DEPOSITI STABILI O IN VIA DI STABILIZZAZIONE (%) =	88%
PERCENTUALE DEPOSITI INSTABILI (%) =	12%

Tabella 7 - Volumi dinamiche evolutive TRATTO G – intervallo 2005 – 2015

il volume di materiale complessivamente eroso dalle sponde e attraverso la rimobilizzazione delle barre, nell'intervallo temporale esaminato (2005 – 2015), risulta pari a circa 3,77 Mm^3, di cui il 95% circa deriva dalla rimobilizzazione di forme di fondo (barre). Contrariamente a quanto riscontrato nel periodo 1982-2005, non si riscontra una ripresa significativa della dinamica erosionale di sponda rispetto al tratto precedente;

il volume complessivamente depositato ammonta a 5,32 Mm^3 circa. Ne risulta, complessivamente, un bilancio "erosione – deposito" negativo, pari a -1,54 Mm3 circa (forme di fondo in condizioni di deposito, ma in rapporto minore rispetto al tratto precedente, analogamente a quanto già emerso per il periodo 1982-2005). Ne consegue un tasso di deposito dell'ordine di 0,15 Mm^3/anno, a fronte di un tasso di sedimentazione di 0,22 Mm^3/anno nel periodo 1982-2005. Anche in questo tratto la condizione di deposito è da ricondurre alla risposta del sistema fluviale ai pennelli di navigazione, costituenti delle vere e proprie "trappole" sedimentarie. Analogamente al tratto precedente, anche in questo tratto si riscontra una riduzione del tasso di sedimentazione nel periodo 2005-2015 rispetto al periodo 1982-2005;

i depositi stabili sono l'88% rispetto al 55% del periodo 1982-2005 e risultano prevalenti nel parte iniziale del tratto.

Il tratto omogeneo H (da confluenza Secchia a Pontelagoscuro) costituisce la parte di alveo fluviale situato immediatamente a valle del tratto fluviale navigabile e immediatamente a monte dell'incile del delta. Il corso d'acqua, in questo tratto, assume progressivamente una configurazione "differenziata", che si esplica attraverso le seguenti caratteristiche morfologiche: 1) l'alveo di magra tende ad ampliarsi e ad assumere un andamento progressivamente (verso valle) pluricursale, con contestuale formazione di numerose barre longitudinali (isole), alcune delle quali molto estese e persistenti; 2) la presenza locale di pennelli di regimazione ha comportato, nel tempo (già nel 2005), la chiusura di alcuni canali laterali "forzando", localmente, una configurazione prevalentemente monocursale; 3) in planimetria l'alveo presenta alternanze di tratti accennatamente meandrici o sinuosi ad altri rettilinei. L'alveo è incassato in depositi prevalentemente limoso-sabbiosi, costituenti le sponde incise. Le forme di fondo (barre) ed il fondo alveo sono costituiti prevalentemente da sabbie e limi. Le caratteristiche sostanziali di questo tratto sono di seguito sintetizzate:

SINTESI TRATTO H - Intervallo temporale di osservazione = 2005 - 2015	
TOTALE EROSIONE (mc) =	3'545'206
TOTALE DEPOSITO (mc) =	6'071'663
BILANCIO (EROSIONE-DEPOSITO) (mc) =	-2'526'457
PERCENTUALE DI DEPOSITI STABILI O IN VIA DI STABILIZZAZIONE (%) =	85%
PERCENTUALE DEPOSITI INSTABILI (%) =	15%

Tabella 8 - Volumi dinamiche evolutive TRATTO H – intervallo 2005 – 2015

il volume di materiale complessivamente eroso dalle sponde e attraverso la rimobilizzazione delle barre, nell'intervallo temporale esaminato (2005 – 2015), risulta pari a circa 3,54 Mm^3, di cui il 78% circa deriva dalla rimobilizzazione di forme di fondo (barre). È confermato il trend di una certa ripresa della dinamica erosionale di sponda (pari al 22%) e di una ripresa della dinamicità interna al sistema;

il volume complessivamente depositato ammonta a 6,07 Mm^3 circa. Ne risulta, complessivamente, un bilancio "erosione – deposito" negativo, pari a -2,53 Mm^3 circa (forme di fondo in condizioni di deposito), a cui corrisponde un tasso di deposito dell'ordine di 0,25 Mm3/anno, in netta controtendenza rispetto al periodo 1982-2005, durante il quale il tratto in oggetto era in erosione con un tasso annuo dell'ordine di 0,41 Mm^3/anno;

anche l'incidenza percentuale dei depositi stabili o in via di stabilizzazione è in controtendenza rispetto a quanto osservato nel periodo 1982-2005. Infatti, i depositi stabili o in via di stabilizzazione incidono per l'85%, a fronte del 55% del periodo 1982-2005.

Il tratto omogeneo I (da Pontelagoscuro al Po di Goro) costituisce l'incile del delta, fino alla diramazione del canale distributore denominato "Po di Goro". L'alveo si restringe e si canalizza entro le arginature maestre, relativamente prossime alla sponda incisa (localmente in froldo). La golena è relativamente stretta e fortemente pensile. La dinamica relativa alle forme di fondo perde importanza rispetto a quella che caratterizza l'alveo canalizzato. In planimetria l'alveo presenta una configurazione prevalentemente rettilineo-sinuosa, monocursale. L'alveo è incassato in depositi prevalentemente limosi e limoso-sabbiosi, costituenti le sponde incise. Le forme di fondo (barre) ed il fondo alveo sono costituiti prevalentemente da sabbie fini, sabbie limose e limi. Le caratteristiche sostanziali di questo tratto sono di seguito sintetizzate:

SINTESI TRATTO I - Intervallo temporale di osservazione = 2005 - 2015	
TOTALE EROSIONE (mc) =	271'399
TOTALE DEPOSITO (mc) =	1'915'819
BILANCIO (EROSIONE-DEPOSITO) (mc) =	-1'644'420
PERCENTUALE DI DEPOSITI STABILI O IN VIA DI STABILIZZAZIONE (%) =	76%
PERCENTUALE DEPOSITI INSTABILI (%) =	24%

Tabella 9 - Volumi dinamiche evolutive TRATTO I – intervallo 2005 – 2015

il volume di materiale complessivamente eroso dalle sponde e attraverso la rimobilizzazione delle barre, nell'intervallo temporale esaminato (2005 – 2015), risulta pari a circa 0,27 Mm3, di cui il 100% circa deriva dalla rimobilizzazione di forme di fondo (barre), in controtendenza rispetto al trend riscontrato nel tratto precedente;

il volume complessivamente depositato ammonta a 1,92 Mm3 circa. Ne risulta, complessivamente, un bilancio "erosione – deposito" fortemente negativo, pari a -1,64 Mm3 (forme di fondo in condizioni di deposito generalizzato), a cui corrisponde un tasso di deposito annuo dell'ordine di 0,16 Mm3/anno, praticamente pari al tasso di deposito del periodo 1982-2005.

Nel grafico di Figura 47 sono riportati i volumi cumulati lungo la progressiva, con riferimento ai diversi fenomeni evolutivi in atto nelle barre, nell'intervallo temporale esaminato (2005 – 2015), per il tratto da Isola Serafini all'incile del Po di Goro. Nel medesimo grafico è riportata anche la curva di bilancio "erosioni-depositi", che mette in evidenza che lungo il tratto in esame prevalgono i fenomeni deposizionali, soprattutto a valle di foce Taro e foce Mincio.

A supporto dell'analisi condotta sono state redatte delle cartografie in scala 1:10'000, Allegato 2 – "Cartografia delle tendenze evolutive in atto nel periodo 2005-2015", dove sono riportate le unità geomorfologiche elementari, ottenute in seguito al confronto delle configurazioni relative ai due estremi temporali, 2005 e 2015, con individuazione, delimitazione e censimento delle modificazioni planimetriche delle forme di fondo (barre) e delle sponde.

Nella Figura 48 è riportata la legenda relativa alla suddetta cartografia.

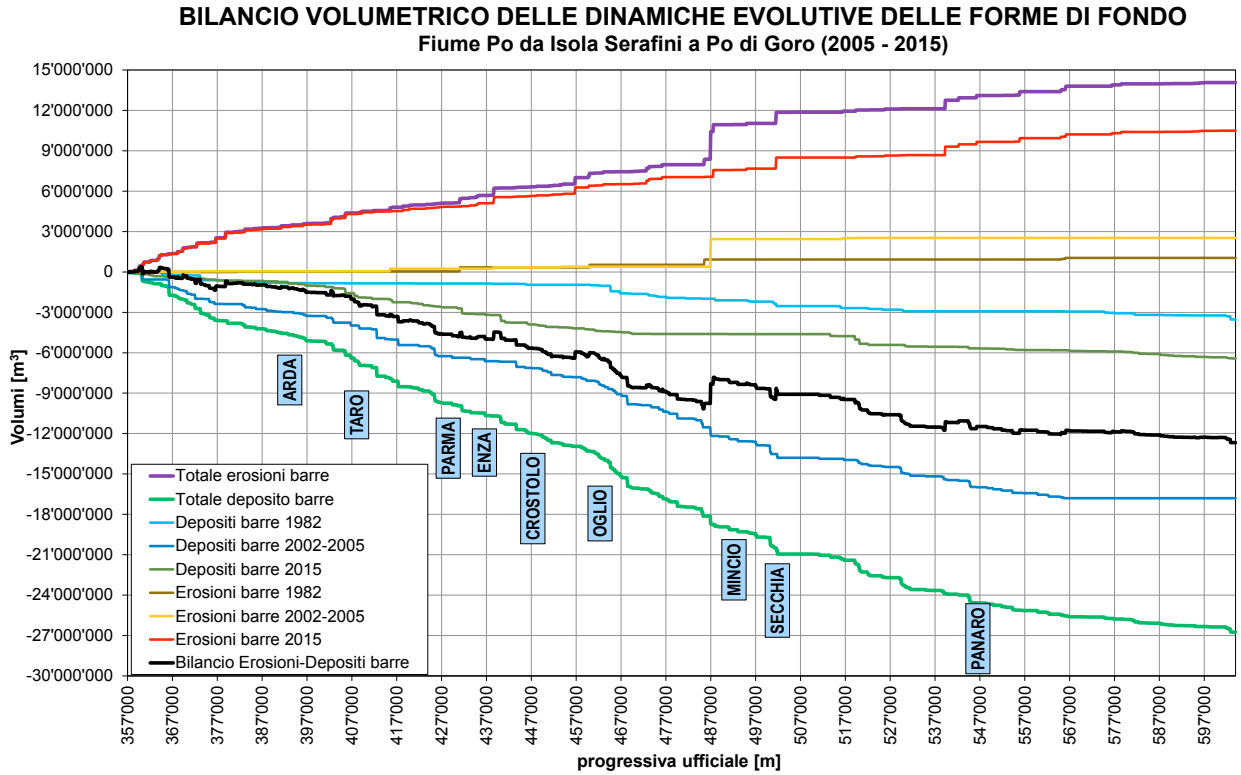


Figura 47 Bilancio delle dinamiche evolutive delle forme di fondo.



Figura 48 – Legenda della cartografia delle tendenze evolutive in atto nel periodo 2005-2015 (Allegato 2).

4.5.3 Analisi delle tendenze evolutive del fondo alveo - metodologia

Nei paragrafi precedenti è stata descritta l'analisi geomorfologica delle tendenze evolutive con riferimento alle forme di fondo (barre ed isole) e alle dinamiche in atto lungo le sponde dell'alveo inciso (erosioni ed accrescimenti). I dati utilizzati per l'analisi dell'intero tratto in esame sono

sostanzialmente le ortofoto e i rilievi laser-scanner effettuati negli anni 2005 e 2015. Tali elementi permettono di individuare ed analizzare tutte le forme poste al di sopra del pelo libero dell'acqua.

Ovviamente l'analisi descritta in precedenza nulla dice a riguardo del fondo alveo, in quanto non rilevabile da rilievi aerei ma unicamente attraverso rilievi batimetrici.

Attualmente si dispone di un unico rilievo batimetrico del fondo alveo esteso all'intero tratto compreso tra Cremona e il Po di Goro (2005), mentre nel corso del 2010 è stato effettuato un rilievo batimetrico per il tratto compreso tra Cremona e foce Mincio e nel 2015 sono stati effettuati rilievi batimetrici con ecoscandaglio solo in prossimità delle sezioni Brioschi comprese tra la n. 26 (Cremona) e la n. 44 (San Giacomo Po, a valle di Borgoforte). In funzione dei nuovi rilievi successivi al 2005 è stato quindi possibile procedere all'aggiornamento delle analisi volte a identificare le modificazioni intervenute lungo il fondo alveo solo per il tratto compreso tra la progressiva km 375 (sezione 26) e la progressiva km 482 (sezione 44), mentre ciò non è stato possibile per il tratto compreso tra la sezione 44 e l'incile del Po di Goro, a causa della mancanza di rilievi batimetrici aggiornati al 2015.

La tendenza evolutiva del fondo alveo nel periodo 2005 – 2015, è stata analizzata applicando la medesima procedura utilizzata nell'ambito degli studi a supporto del Piano Generale di Gestione dei Sedimenti del fiume Po (PGGS). In particolare la metodologia di analisi valuta l'evoluzione del fondo alveo attraverso il confronto tra i profili di pelo libero di magra nei periodi in cui si dispone di rilievi batimetrici. Per la definizione del profilo idrico si è utilizzata una portata costante pari a 100 m3/s, che rappresenta un valore particolarmente basso, se paragonato alla capacità dell'intero alveo inciso.Tali profili di pelo libero sono indicati come "profili di fondo medio", in quanto a differenza dei poco rappresentativi profili di talweg, forniscono l'andamento del pelo libero che si forma in funzione della morfologia media dell'alveo di magra.

In particolare i profili di fondo medio sono stati determinati nel seguente modo:

si sono presi in considerazione i rilievi eseguiti negli anni 2005, 2010 e 2015, ed in particolare per i tre periodi sono state ricavate le sezioni in corrispondenza delle sezioni Brioschi, in modo tale da poter effettuare valutazioni omogenee con le analisi già effettuate nei periodi precedenti (v. PGGS);

con tali sezioni sono state implementate versioni diverse del modello di calcolo idrodinamico a fondo fisso del fiume Po, utilizzando il modulo HD del codice di calcolo MIKE 11 del Danish Hydraulic Institute;

si è determinato, per ogni rilievo, il profilo di fondo medio, assunto pari al livello idrico ottenuto facendo defluire in ciascun modello dell'alveo del fiume Po una portata pari a 100 m3/s, la quale risulta particolarmente bassa se paragonata alla portata mediamente defluente anche in condizioni di magra.

Dal confronto fra i diversi profili di fondo medio si può determinare l'evoluzione in atto nel fondo alveo e individuare quindi i tratti che sono soggetti a fenomeni di sovralluvionamento o di erosione, oppure quei tratti che risultano essere sostanzialmente stabili.

4.5.4 Analisi delle tendenze evolutive del fondo alveo – risultati ottenuti tra le sezioni 26 e 44

L'applicazione della metodologia descritta nel paragrafo precedente ha portato a determinare il profilo di fondo medio per i diversi anni considerati: 2005, 2010 e 2015. Tali profili sono riportati di seguito in Figura 49 (dalla sezione 26 alla sezione 37) e in Figura 50 (dalla sezione 37 alla sezione 44). Nelle si riportano gli analoghi tratti, avendo inserito anche i profili di fondo medio già calcolati nell'ambito del PGGS, dal 1954 al 2005.

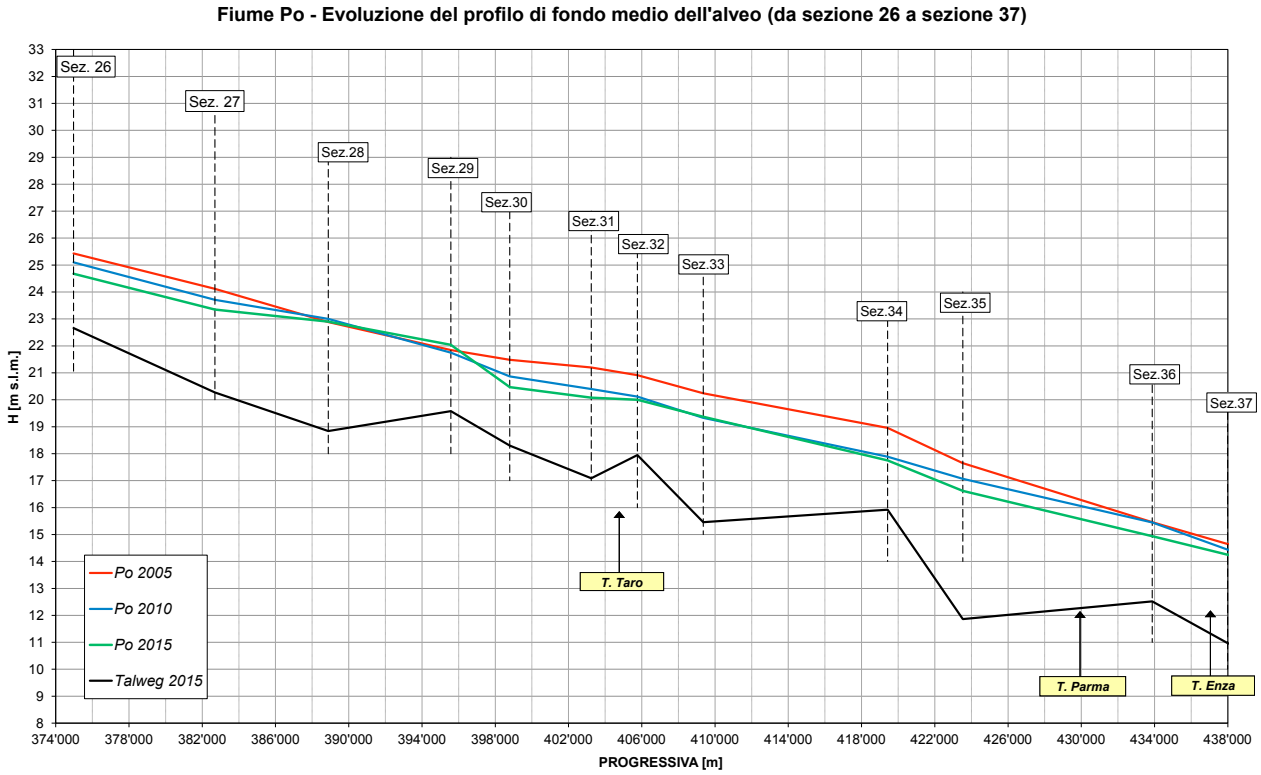


Figura 49 – Profili di fondo medio multitemporali dalla sezione 26 alla sezione 37 (dal 2005 al 2015).

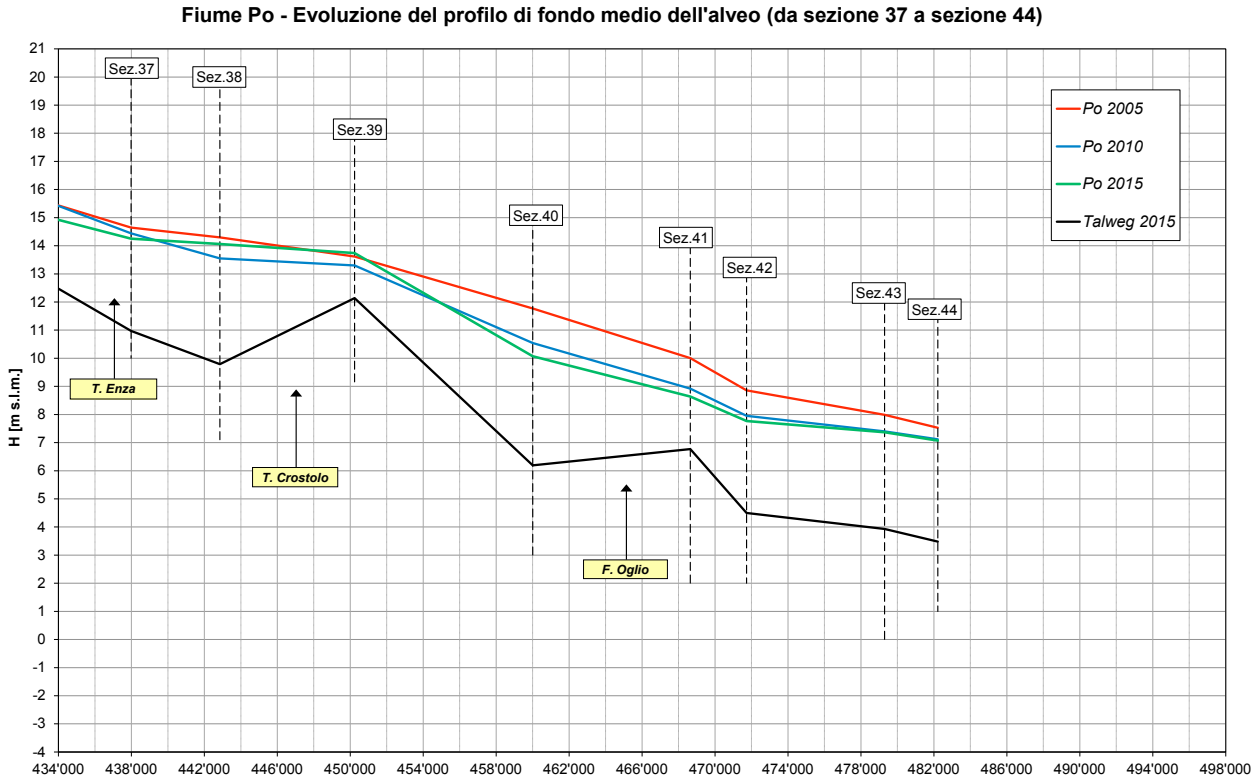


Figura 50 – Profili di fondo medio multitemporali dalla sezione 37 alla sezione 44 (dal 2005 al 2015).

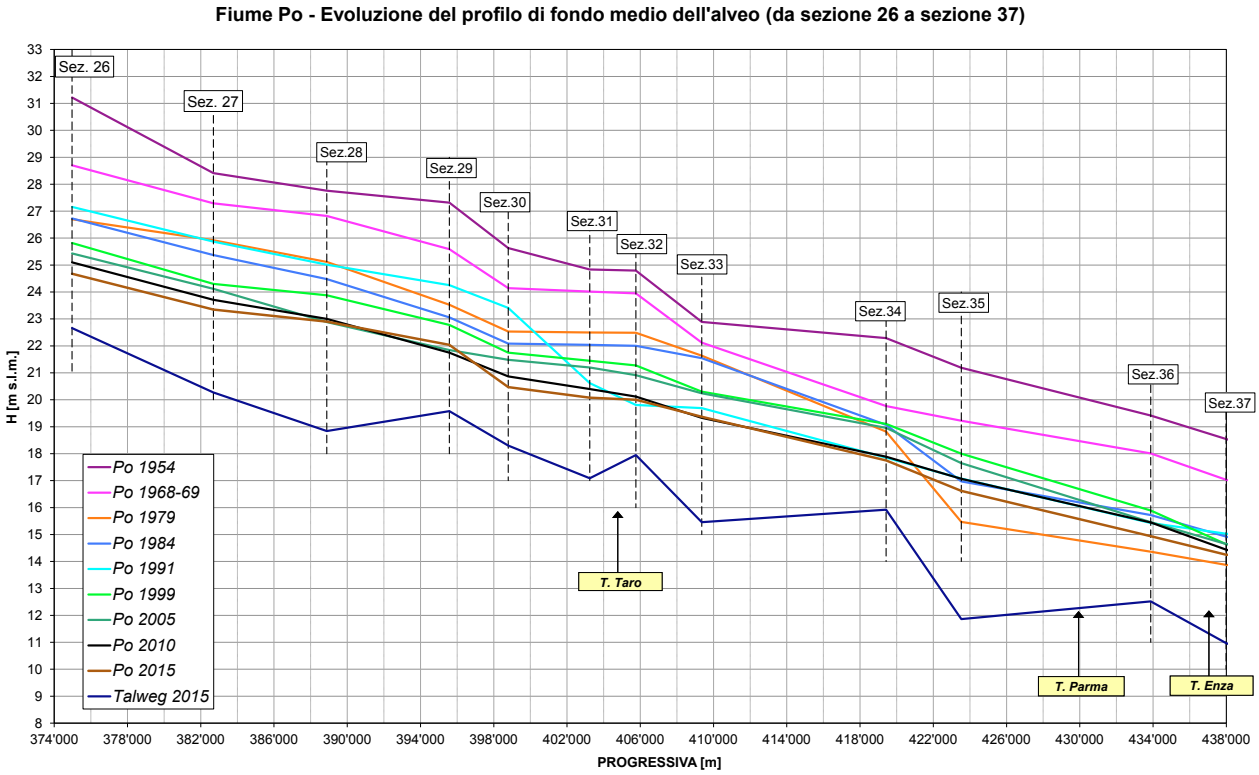


Figura 51 – Profili di fondo medio multitemporali dalla sezione 26 alla sezione 37 (dal 1954 al 2015).

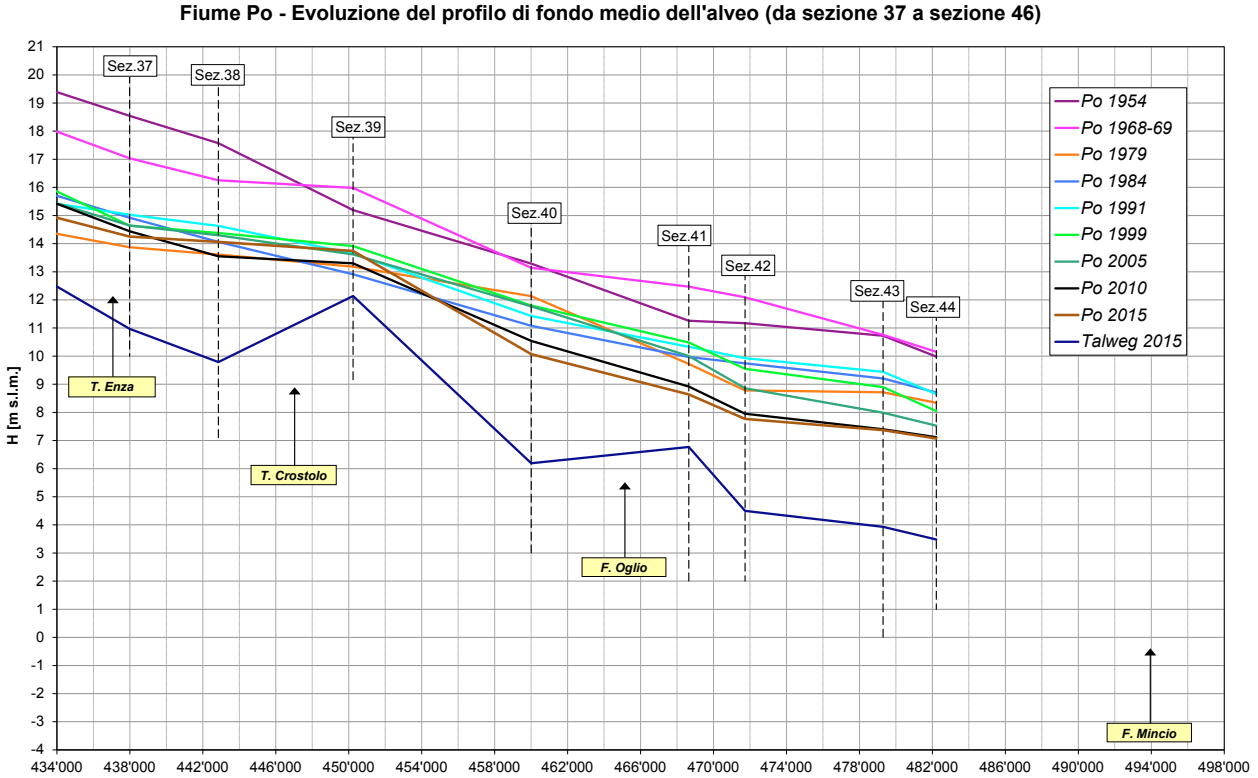


Figura 52 – Profili di fondo medio multitemporali dalla sezione 37 alla sezione 44 (dal 1954 al 2015).

Dall'analisi dei suddetti profili si può osservare che nel periodo dal 2005 al 2015 si è verificato un generale abbassamento delle quote di fondo medio dell'alveo per l'intero tratto compreso tra Cremona (sezione 26) e San Giacomo Po (sezione 44).

I tratti maggiormente interessati da fenomeni erosivi sono i seguenti:

- tra Cremona (sez. 26) e foce Arda;
- da Isola Pescaroli (sez. 30) a Casalmaggiore (sez. 35);
- da Suzzara (sez. 40) e Borgoforte (sez. 42).

Il passaggio dalle variazioni delle quote di fondo medio alla stima dei volumi complessivamente erosi e depositati sul fondo alveo è stato condotto applicando la seguente metodologia:

- si individua la superficie dell'alveo di magra compreso tra due sezioni successive, utilizzando le cartografie e le ortofoto relative al 2005 e al 2015;
- si calcola la superficie media del periodo del tronco d'alveo compreso tra due sezioni successive;
- si determina la variazione della quota del fondo medio dell'alveo in ciascuna sezione e si calcola la media tra due sezioni successive, in modo da determinare la variazione media di un tronco d'alveo compreso tra due sezioni;
- si moltiplica la superficie media e la variazione della quota di fondo media;
- la somma algebrica dei volumi così ottenuti, determina l'andamento dei volumi complessivamente movimentati sul fondo alveo nell'intero periodo di analisi 2005-2015.

L'applicazione di tale metodologia fornisce i risultati rappresentati nel grafico di Figura 53, in cui si vede che nel periodo 2005-2015 prevalgono nettamente i fenomeni erosivi rispetto a quelli deposizionali, in particolare:

- tra Cremona e foce Arda si ha un'erosione di circa 2 milioni di metri cubi (200'000 m^3/anno);
- a valle di foce Arda, fino a foce Enza, vi è un lungo tratto in erosione, con valori complessivi pari a circa 9 milioni di metri cubi (900'000 m^3/anno);
- a valle di foce Crostolo, fino a San Giacomo Po (circa 10 km a monte di foce Mincio), vi è un altro tratto interessato da erosioni, per un volume complessivo pari a circa 10 milioni di metri cubi (1'000'000 m^3/anno).

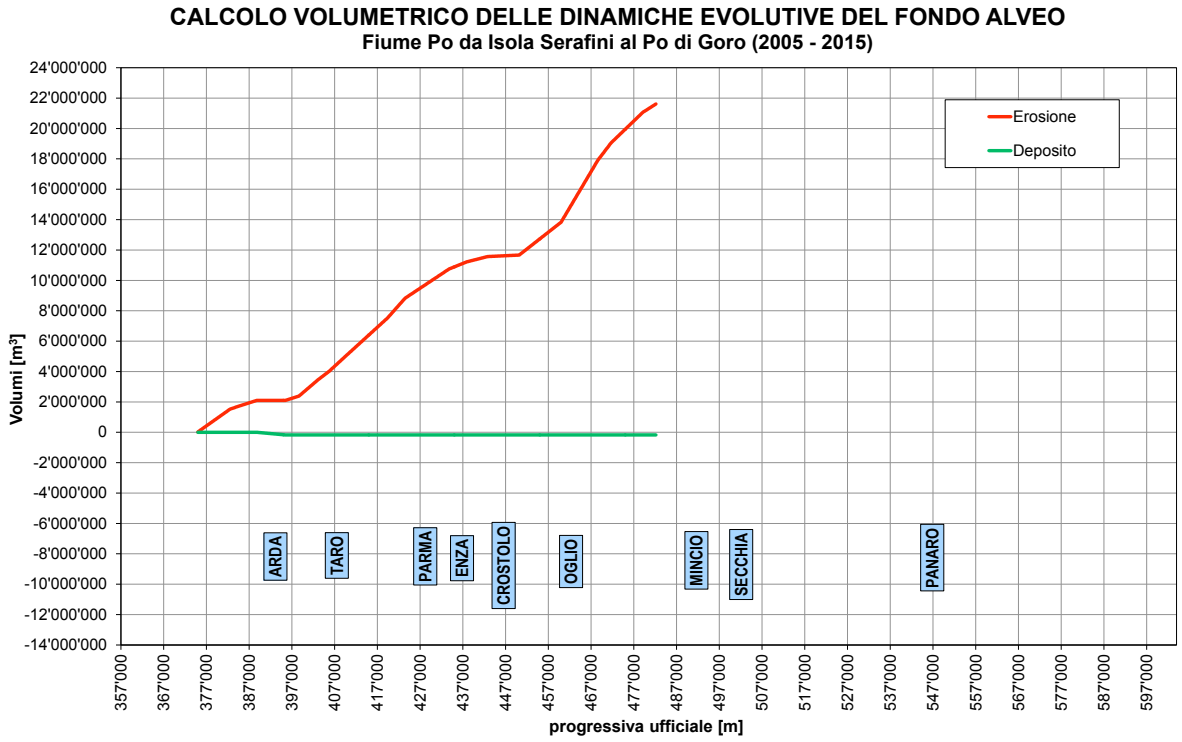


Figura 53 – Volume eroso e depositato lungo il fondo alveo (le analisi sono state condotte solo nel tratto tra Cremona e San Giacomo Po, ove erano disponibili i dati batimetrici al 2015).

4.5.5 Confronti multitemporali fra le sezioni trasversali 26 e 44

Un'ulteriore indagine condotta con i rilievi topografici a disposizione è quella relativa alla sovrapposizione fra le sezioni topografiche rilevate, già impiegate nella modellazione idraulica per la valutazione dell'evoluzione del fondo alveo. L'analisi di tali sezioni "multitemporali" consente di leggere l'evoluzione geomorfologica locale dell'alveo inciso. Ovviamente tali determinazioni sono applicabili solo agli elementi attraversati dalle sezioni, pertanto esse hanno una validità qualitativa più che quantitativa. Dall'osservazione di tali sovrapposizioni è possibile individuare depositi ed erosioni di barra, erosione e avanzamenti di sponda, innalzamenti e abbassamenti del fondo alveo, ecc.

Per la presente elaborazione, che aggiorna di fatto quanto già elaborato nell'ambito del PGGS, le sezioni sono state sovrapposte prendendo come riferimento punti fissi (es. argini, sistemi di protezione spondali, etc.) di sufficiente certezza.

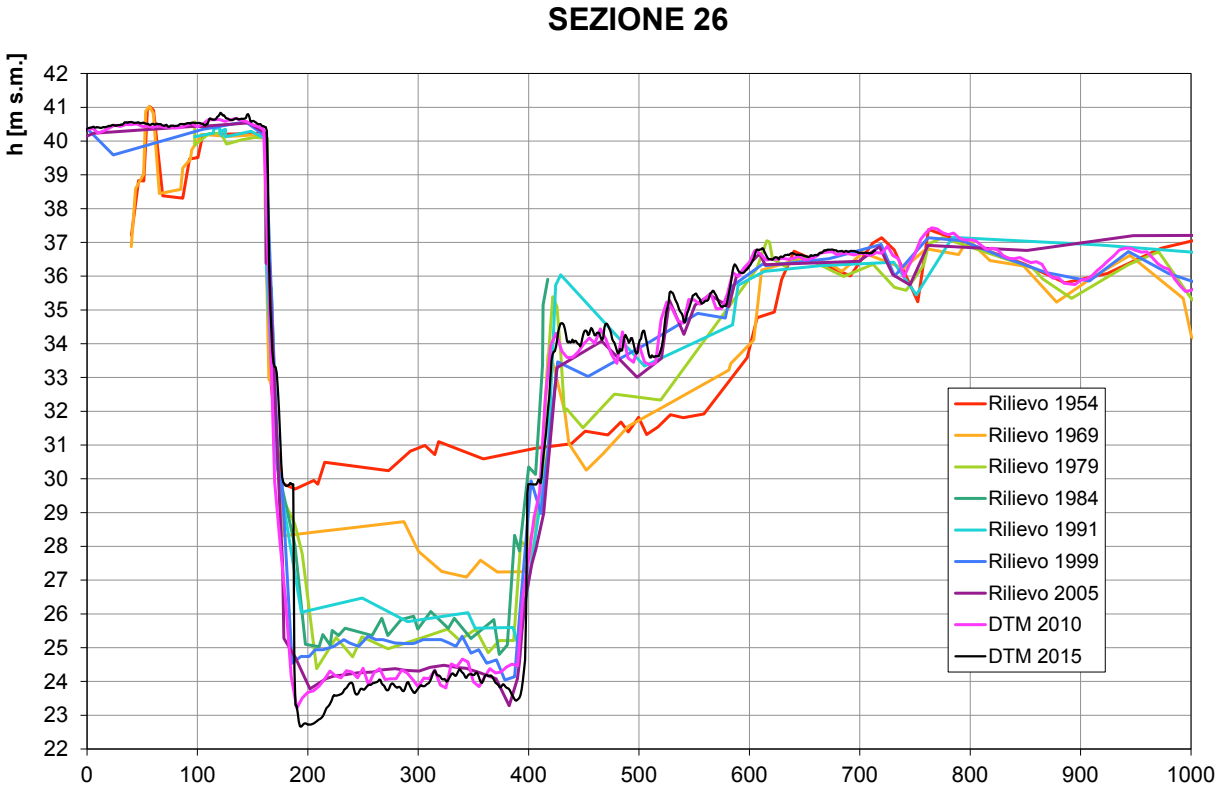
Nella parte in alto di ogni figura si confrontano i rilievi eseguiti a varie date dal 1954 al 2015, mentre nel particolare dell'alveo inciso (parte in basso della figura) sono confrontati solo i rilievi 2005 (rilievo e DTM), 2010 e 2015. Per quanto riguarda il rilievo del 2015, disponibile solo per le sezioni dalla n. 26 alla n. 44, per la parte emersa il dato è relativo al DTM ricavato dal rilievo aereo laser-scanner, mentre le quote di fondo sono relative ai rilievi batimetrici effettuati in altra data rispetto al volo, ma sempre nel 2015. I raccordi tra i due rilievi sono indicati da tratti verticali.

Già il solo esame visivo del fondo alveo (parte bassa delle figure) mostra come quasi ovunque sia proseguito nel decennio 2005 – 2015 l'abbassamento del fondo alveo. Risulta inoltre più pronunciato l'abbassamento del quinquennio 2005 – 2010 che non quello del quinquennio 2010 – 2015, in relazione alle diverse vicende idrologiche dei due periodi. Quindi non risulta vera l'affermazione più volte ascoltata che sia ormai terminata la tendenza alla canalizzazione ed abbassamento dell'alveo di magra. Per una misura quantitativa di tale tendenza è possibile confrontare le quote di fondo medie di ogni sezione, in corrispondenza dei tre rilievi disponibili, 2005, 2010 e 2015. Dal confronto tra i valori riportati nella tabella seguente si confermano come in generale si sia verificato nel decennio un abbassamento sensibile delle quote di fondo alveo, a conferma di quanto già ottenuto con le analisi esposte nel precedente paragrafo.

N. Sezione	*Quota media fondo rilievo 2005 [m s.m.]*	*Quota media fondo DTM 2005* [m s.m.]	*Quota media fondo DTM 2010* [m s.m.]	*Quota media fondo DTM 2015* [m s.m.]
26	24.28	24.20	24.13	23.76
27	23.19	22.94	22.68	22.22
28	21.17	20.69	21.31	20.49
29	21.22	22.41	21.72	22.2
30	20.06	20.57	20.4	20.07
31	19.58	19.28	19.31	18.15
32	20.47	20.16	20.41	19.90
33	18.64	18.86	18.17	17.70
34	18.37	18.20	17.88	17.49
35	16.33	17.17	16.0	15.64
36	14.31	14.40	14.13	14.31
37	13.71	14.44	14.40	12.93
38	13.67	12.61	12.81	-
39	12.6	12.20	12.55	13.32
40	10.38	9.18	9.25	8.37
41	9.8	10.18	9.35	9.13
42	8.21	10.24	7.47	6.57
43	6.55	6.67	5.64	5.36
44	7.03	7.49	7.70	6.91

Tabella 10 – Valori delle quote medie di fondo alveo rilevate nel 2005, 2010, 2015

Di seguito si riportano i sopracitati confronti multitemporali delle sezioni del fiume Po comprese tra la n. 26 e la n. 44.



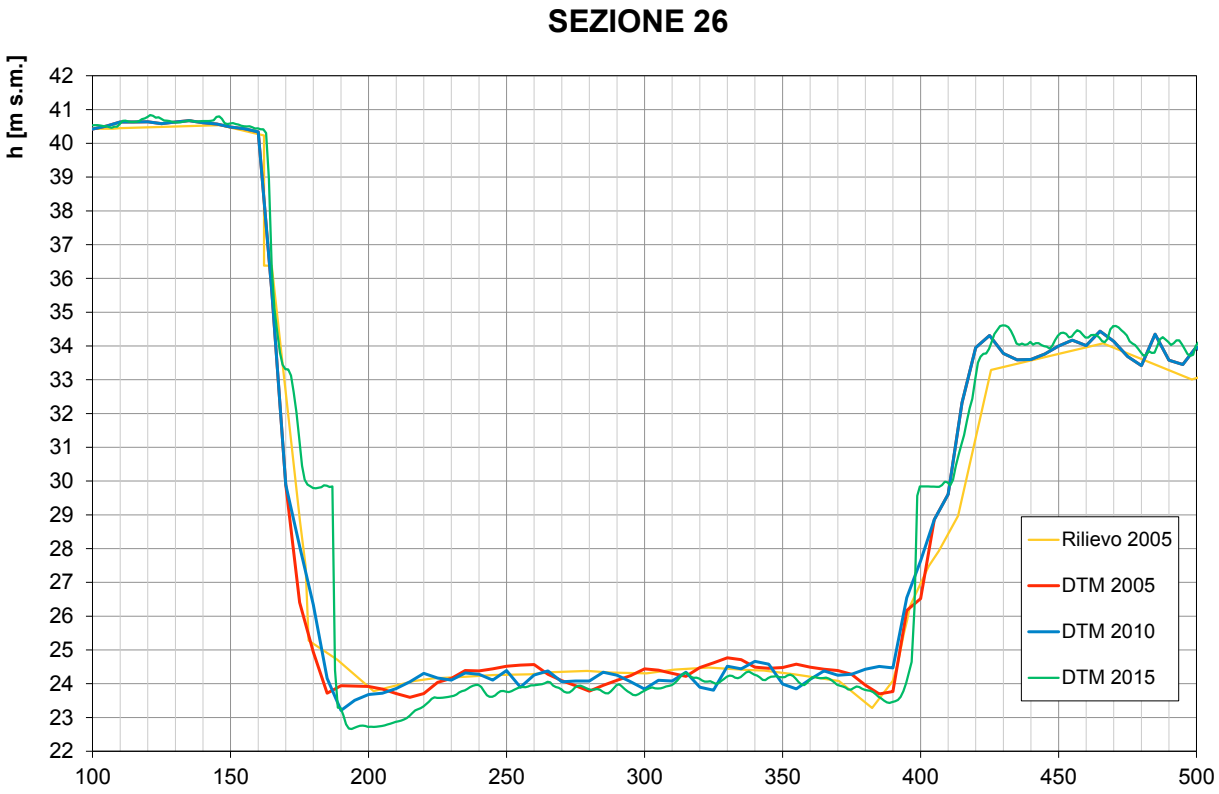
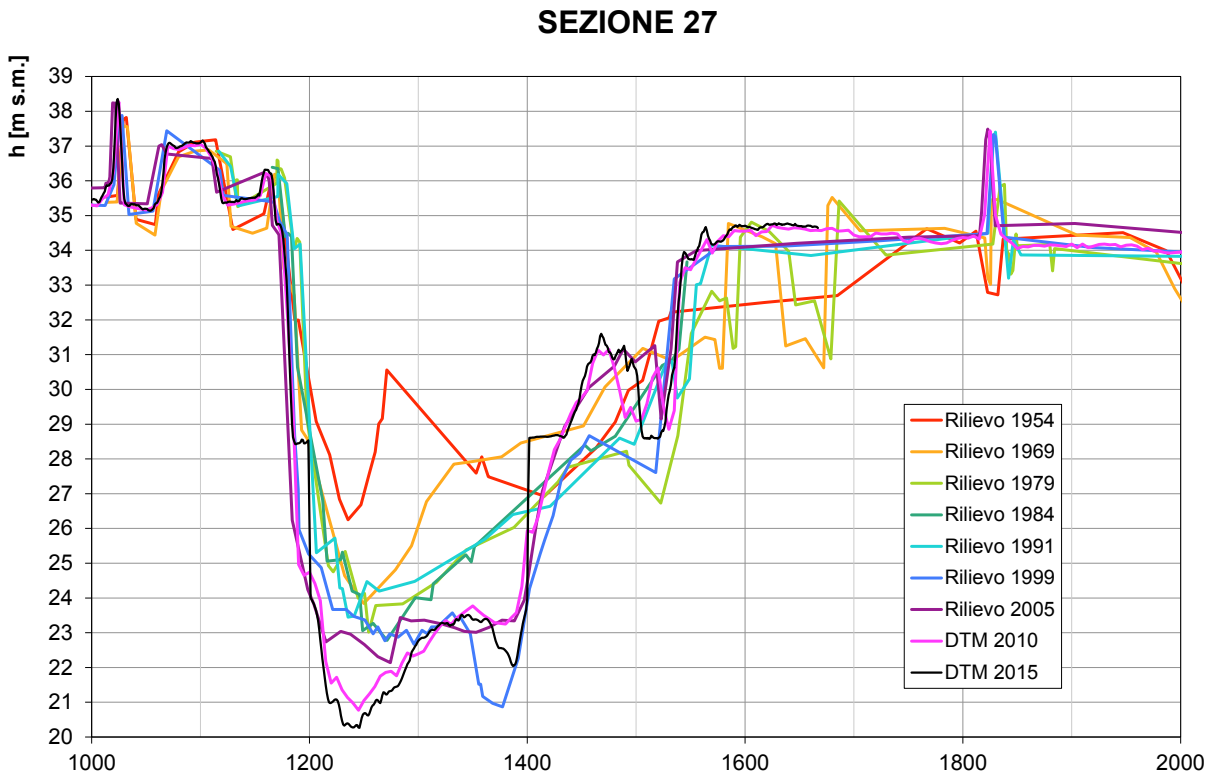


Figura 54 – Confronto multitemporale sezione n. 26.



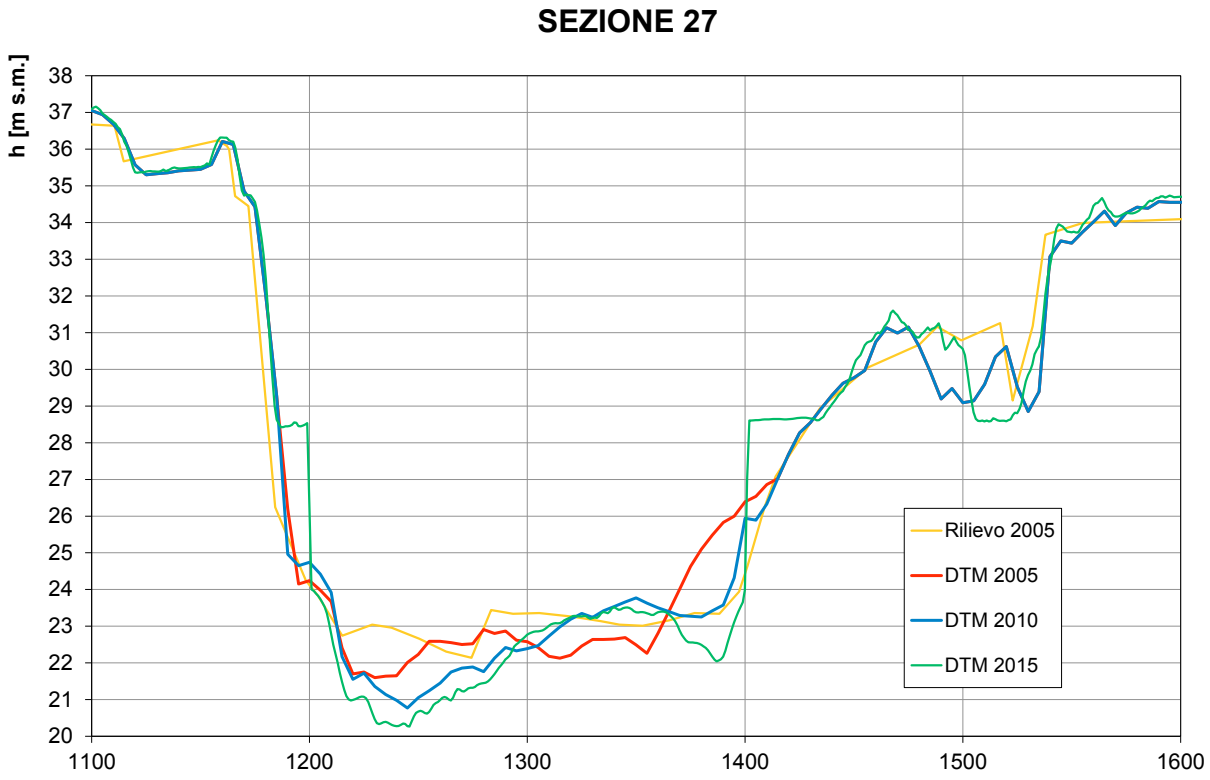
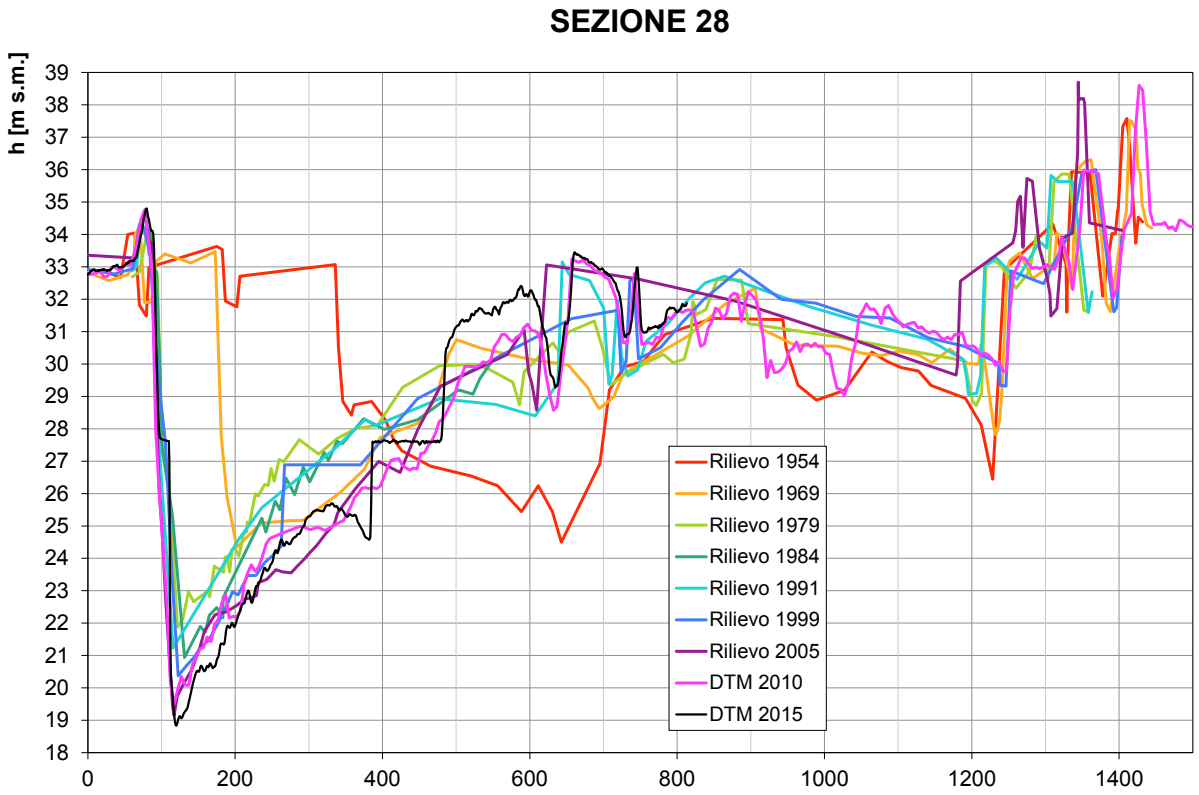


Figura 55 – Confronto multitemporale sezione n. 27.



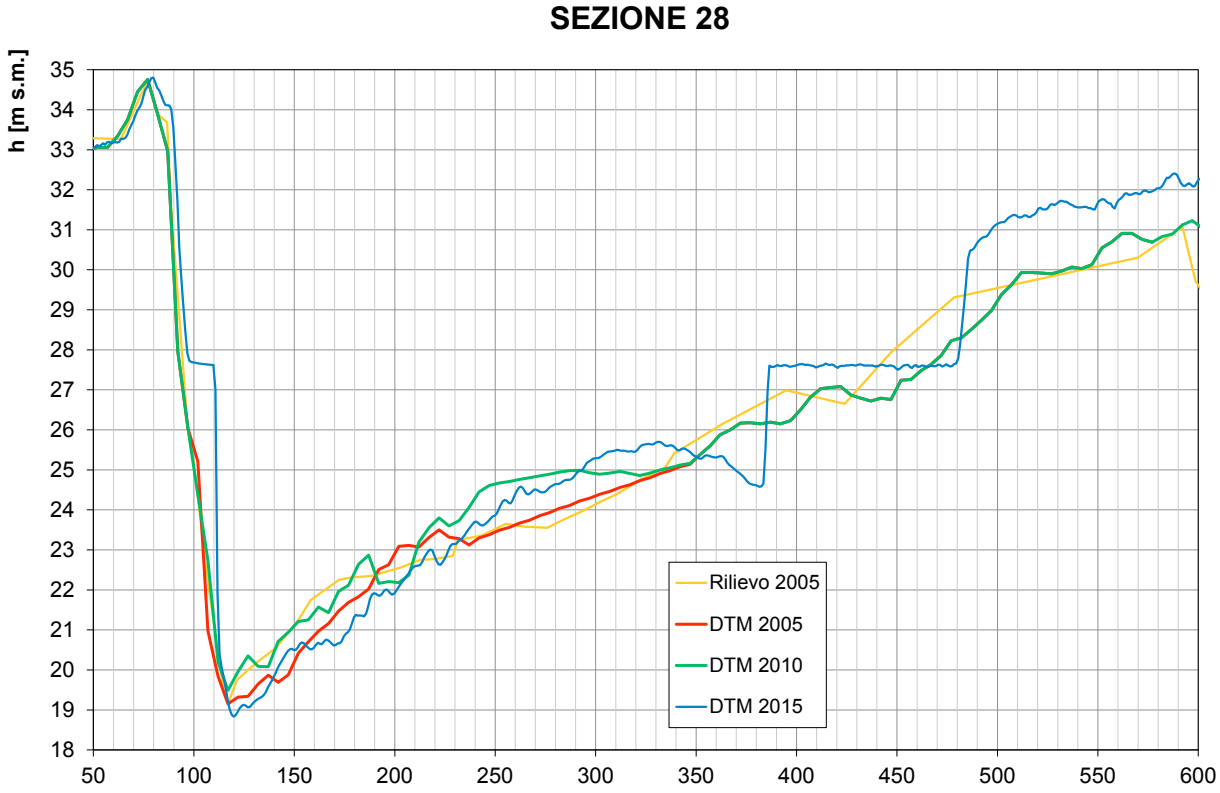
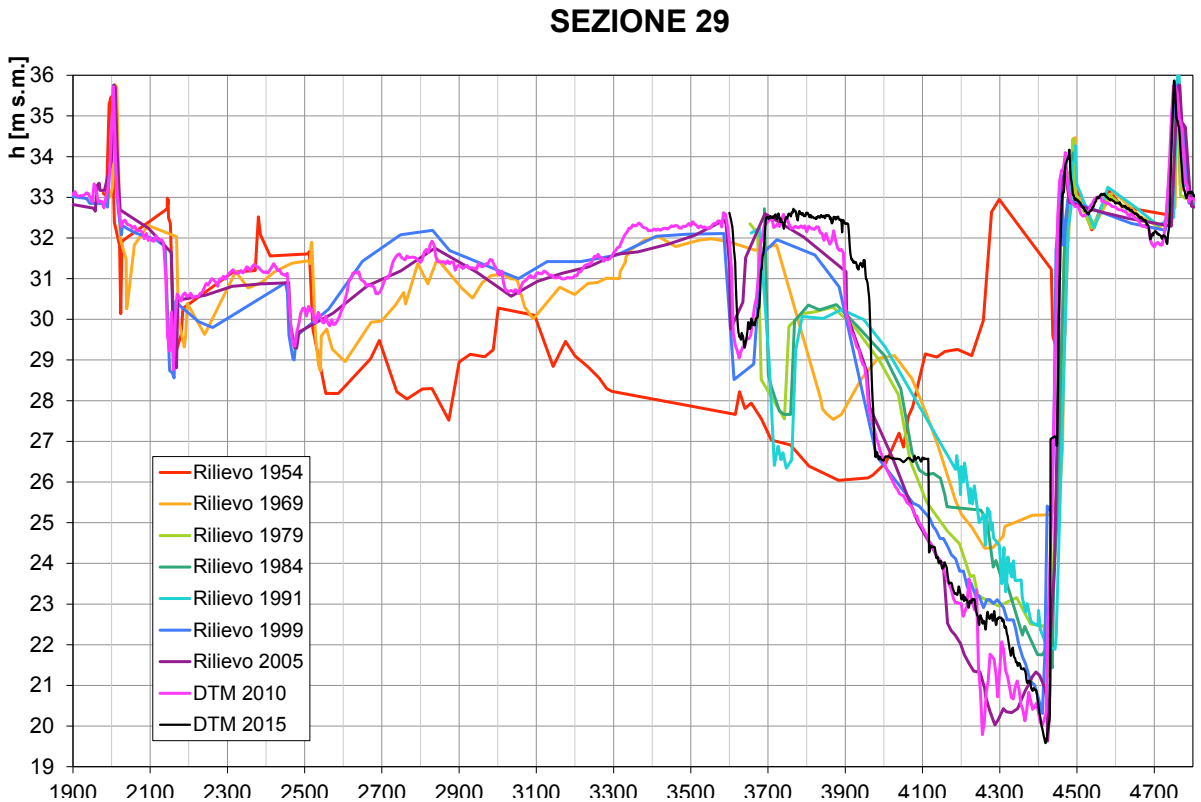


Figura 56 – Confronto multitemporale sezione n. 28.



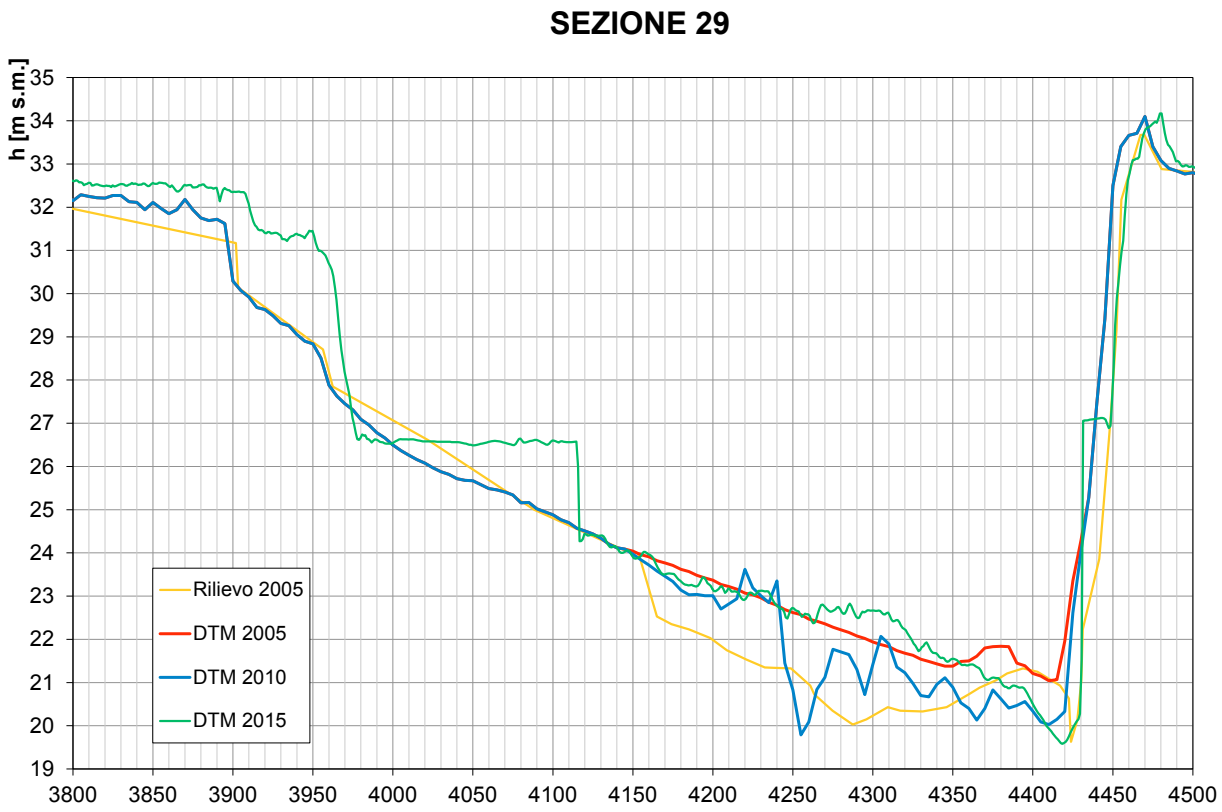
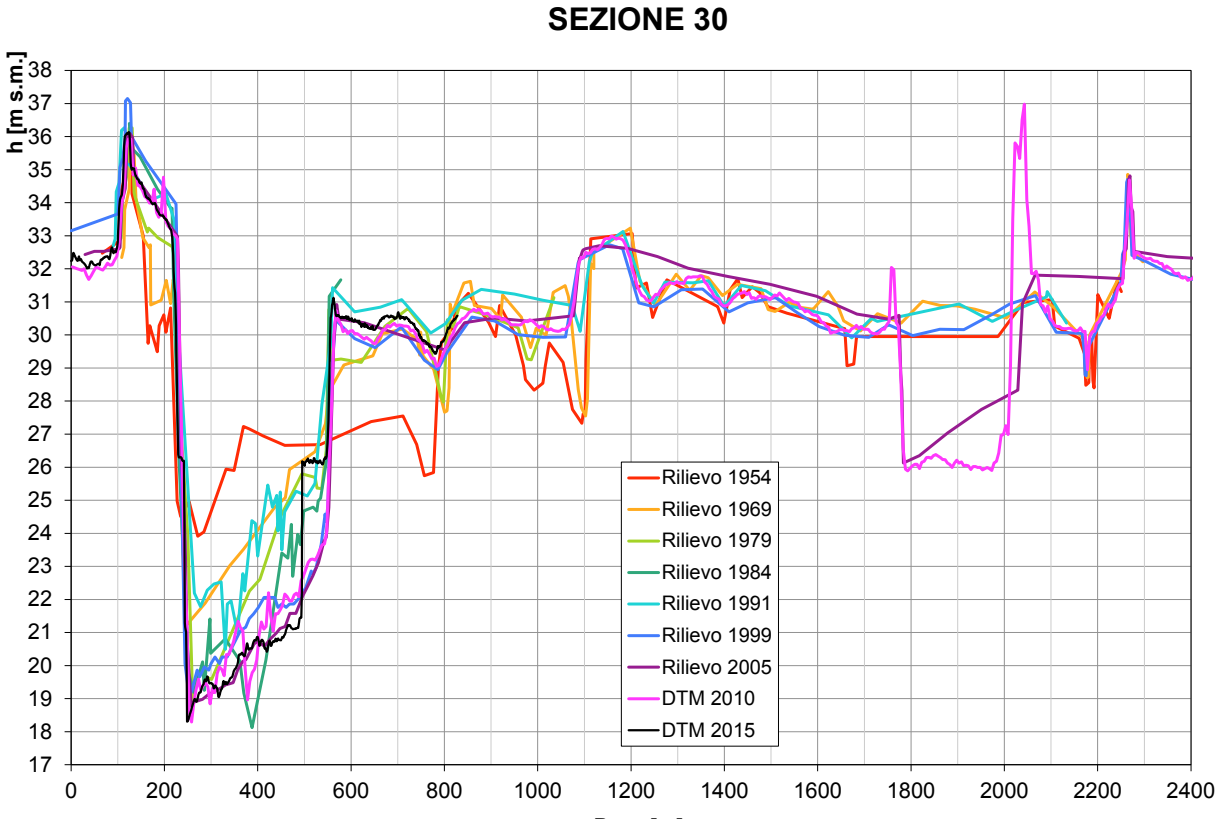


Figura 57 – Confronto multitemporale sezione n. 29.



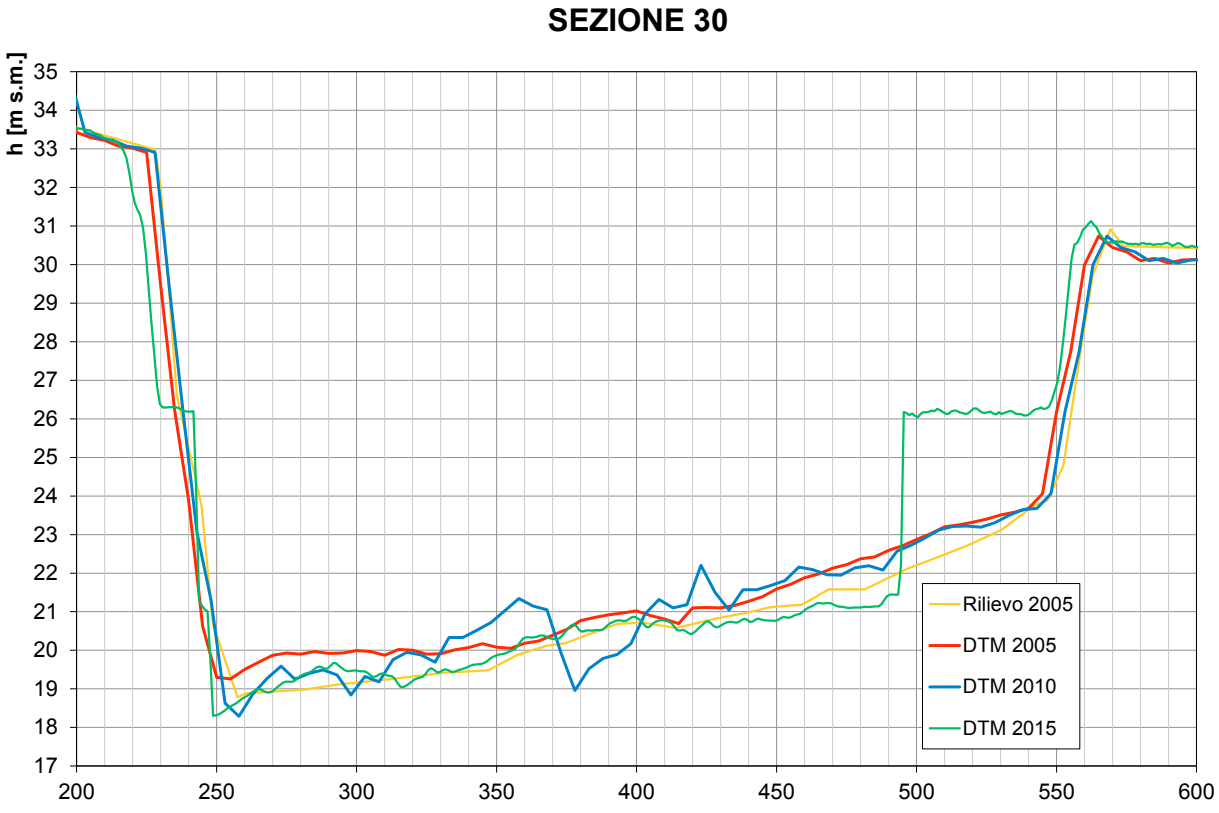
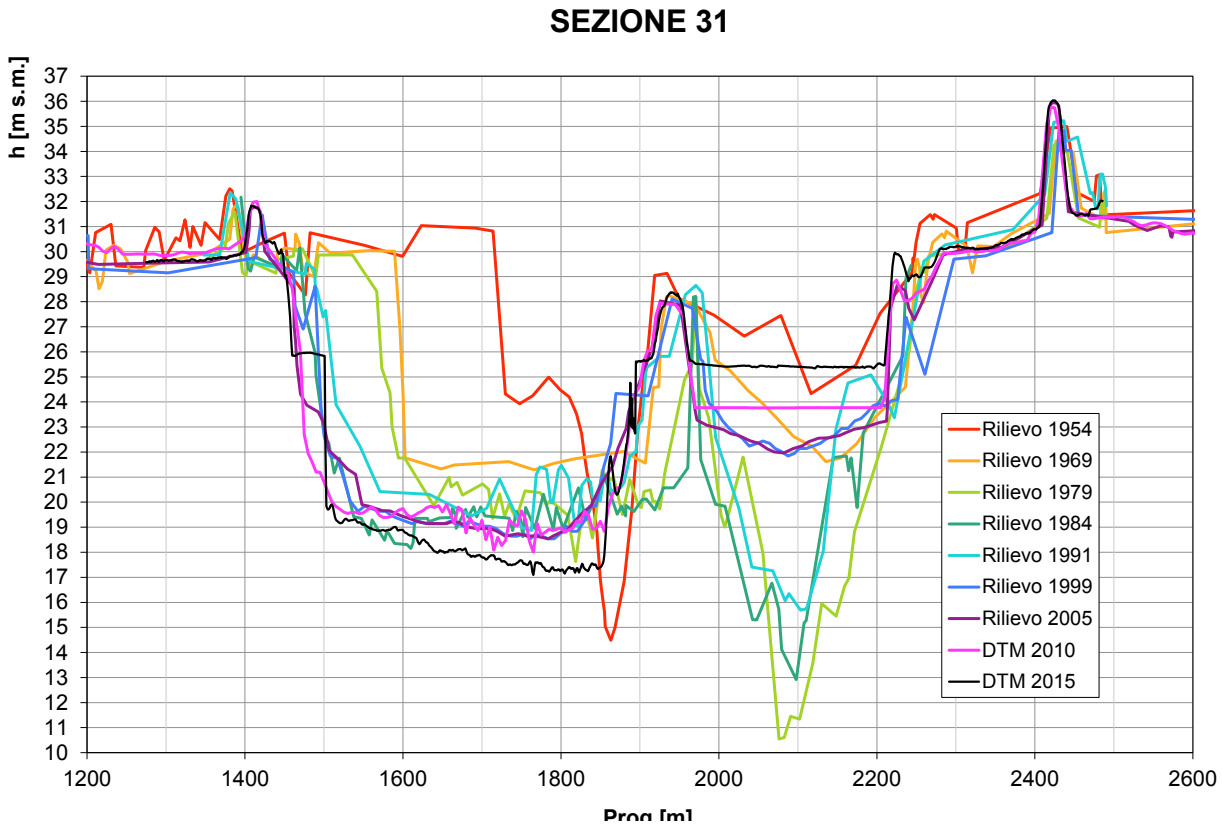


Figura 58 – Confronto multitemporale sezione n. 30.



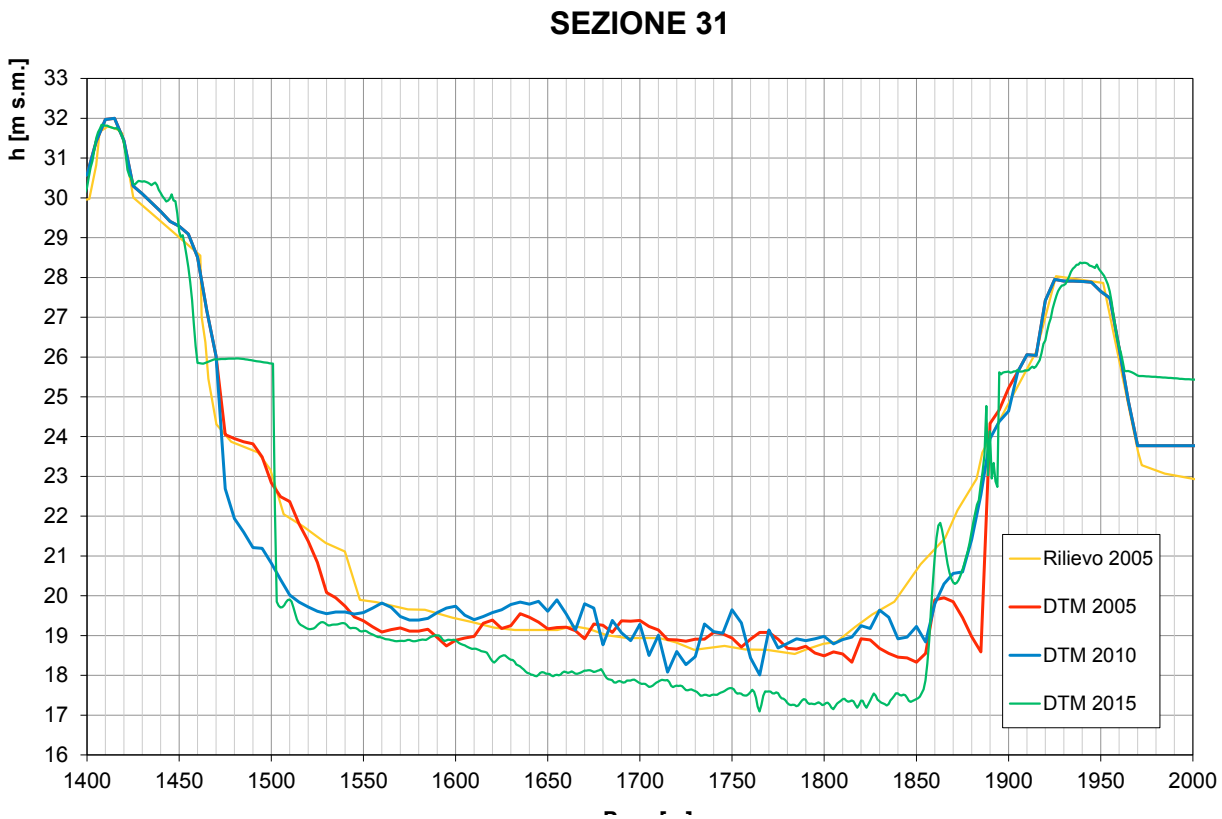
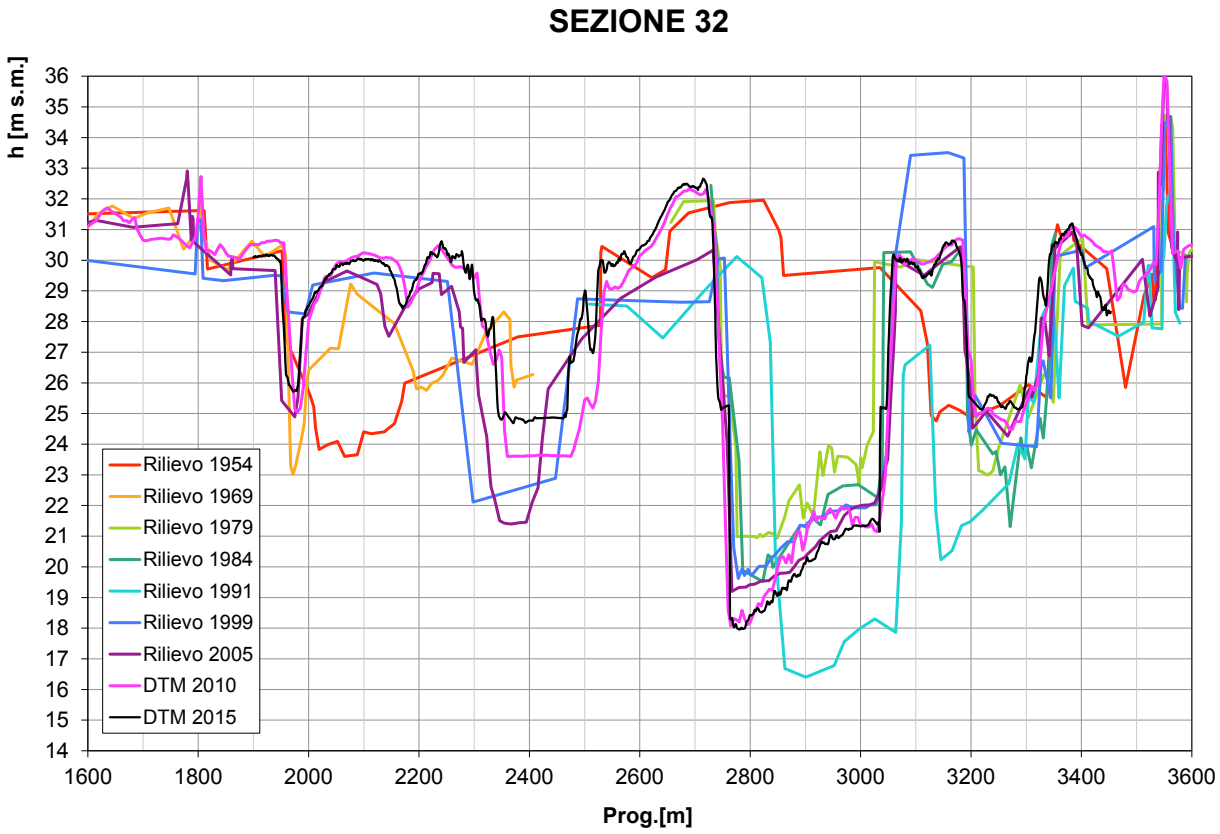


Figura 59 – Confronto multitemporale sezione n. 31.



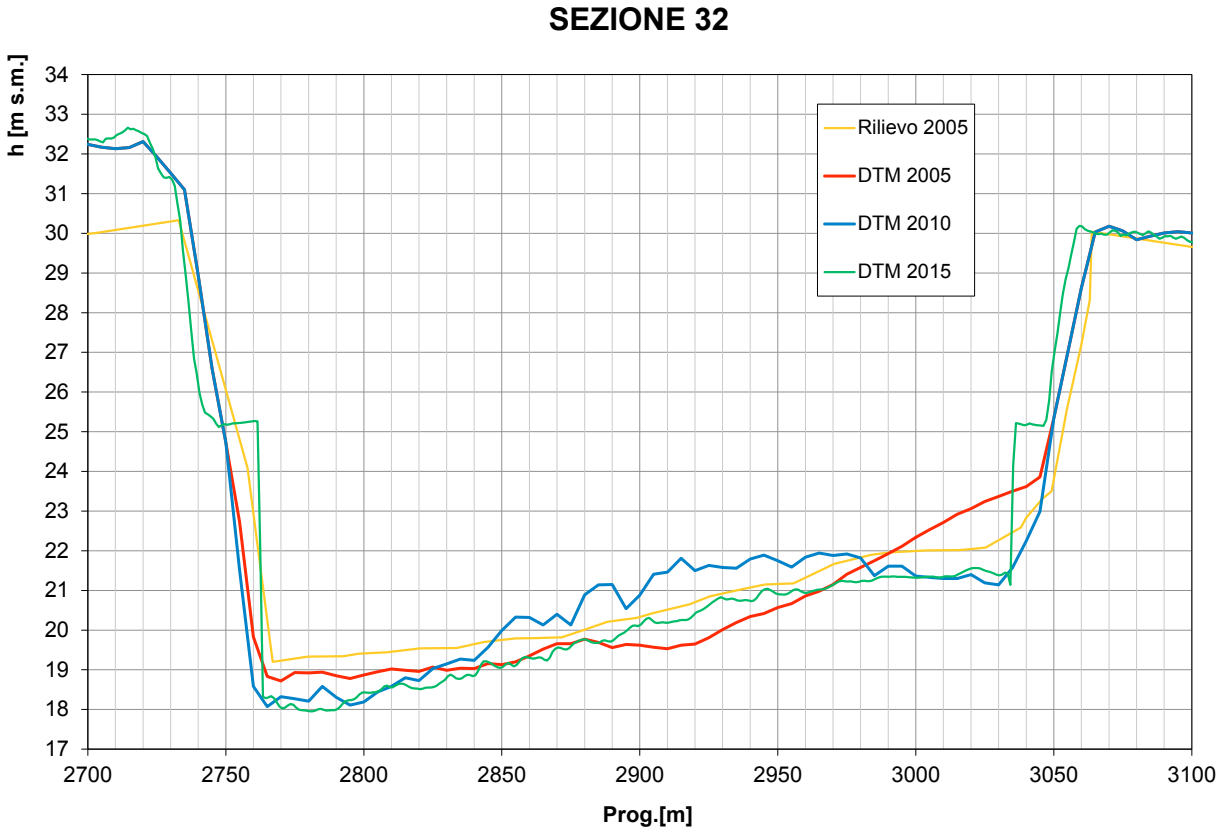
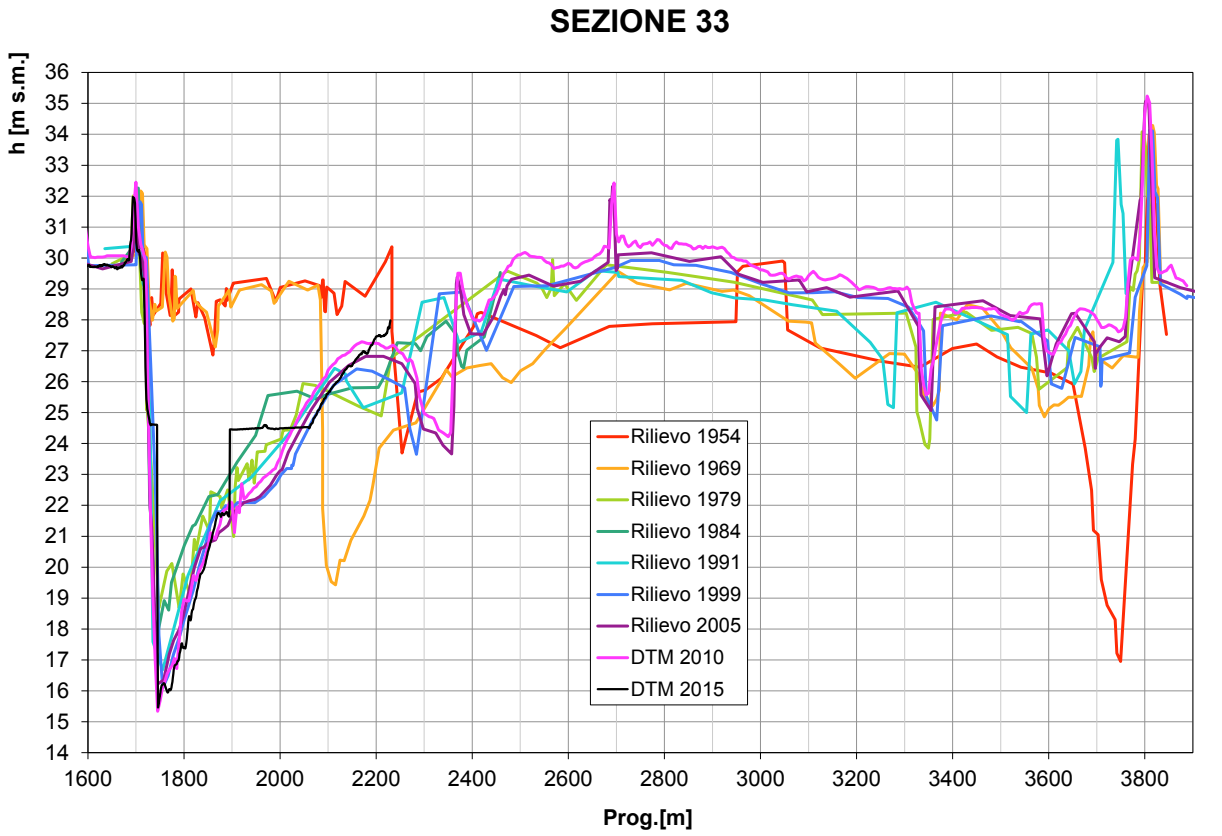


Figura 60 – Confronto multitemporale sezione n. 32.



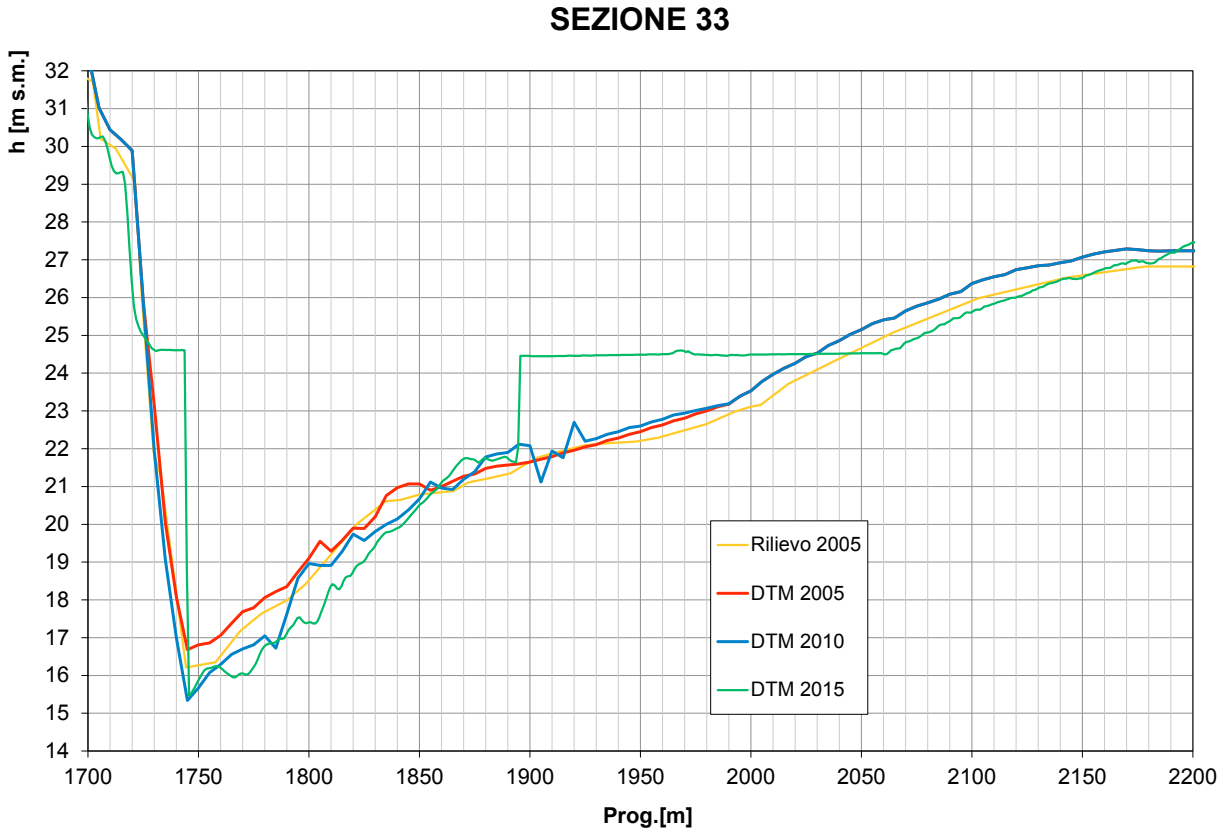
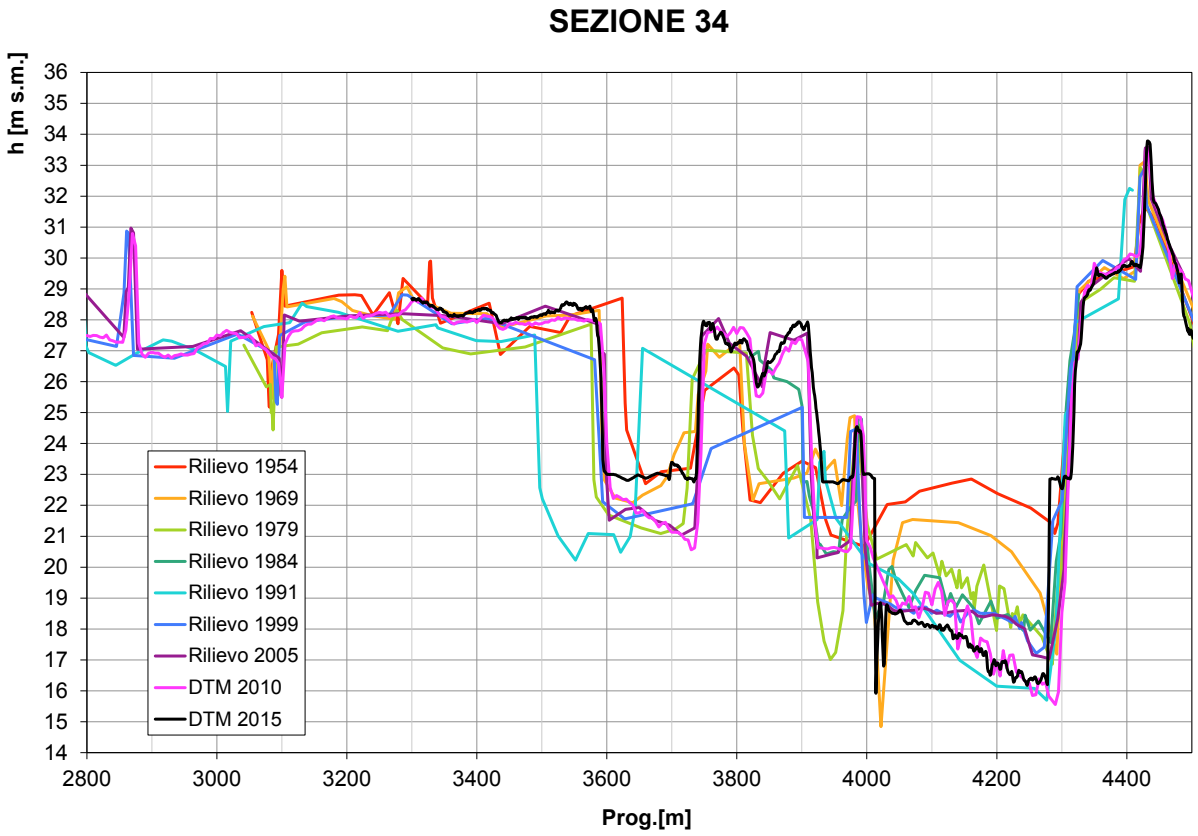


Figura 61 – Confronto multitemporale sezione n. 33.



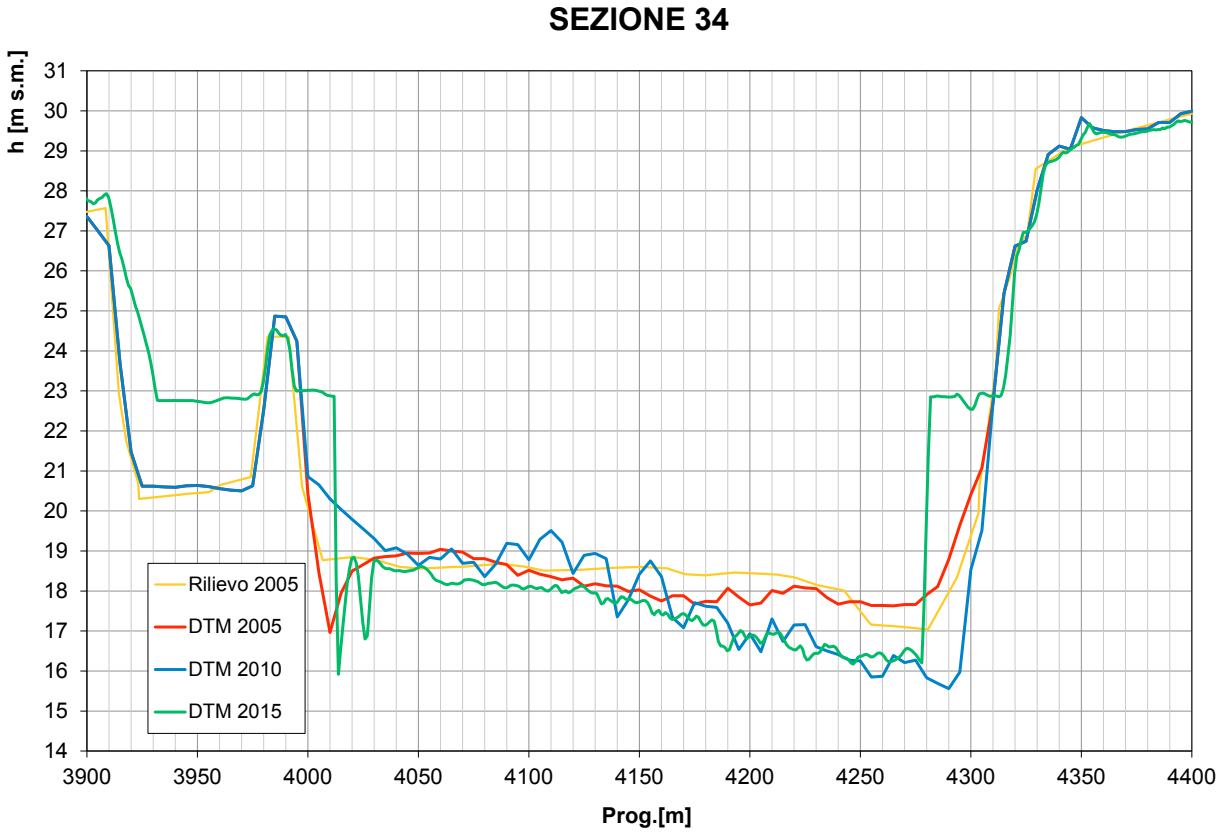
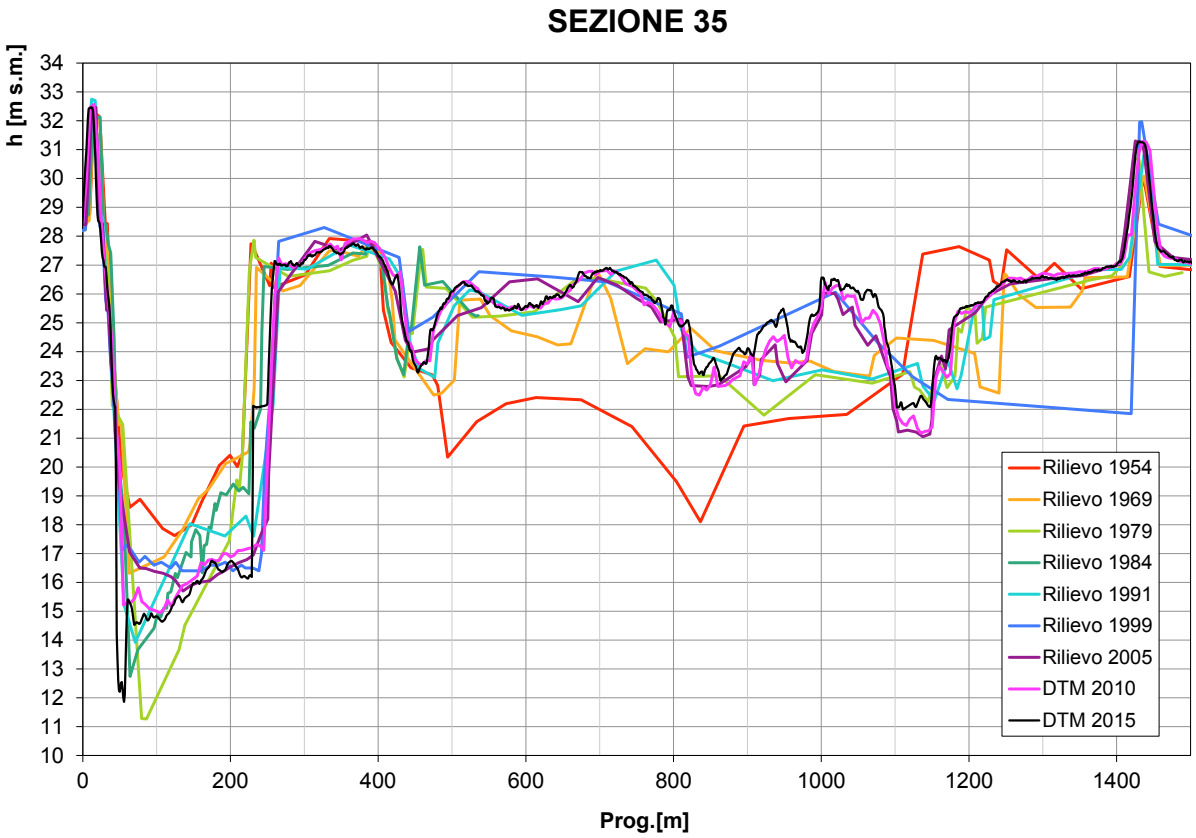


Figura 62 – Confronto multitemporale sezione n. 34.



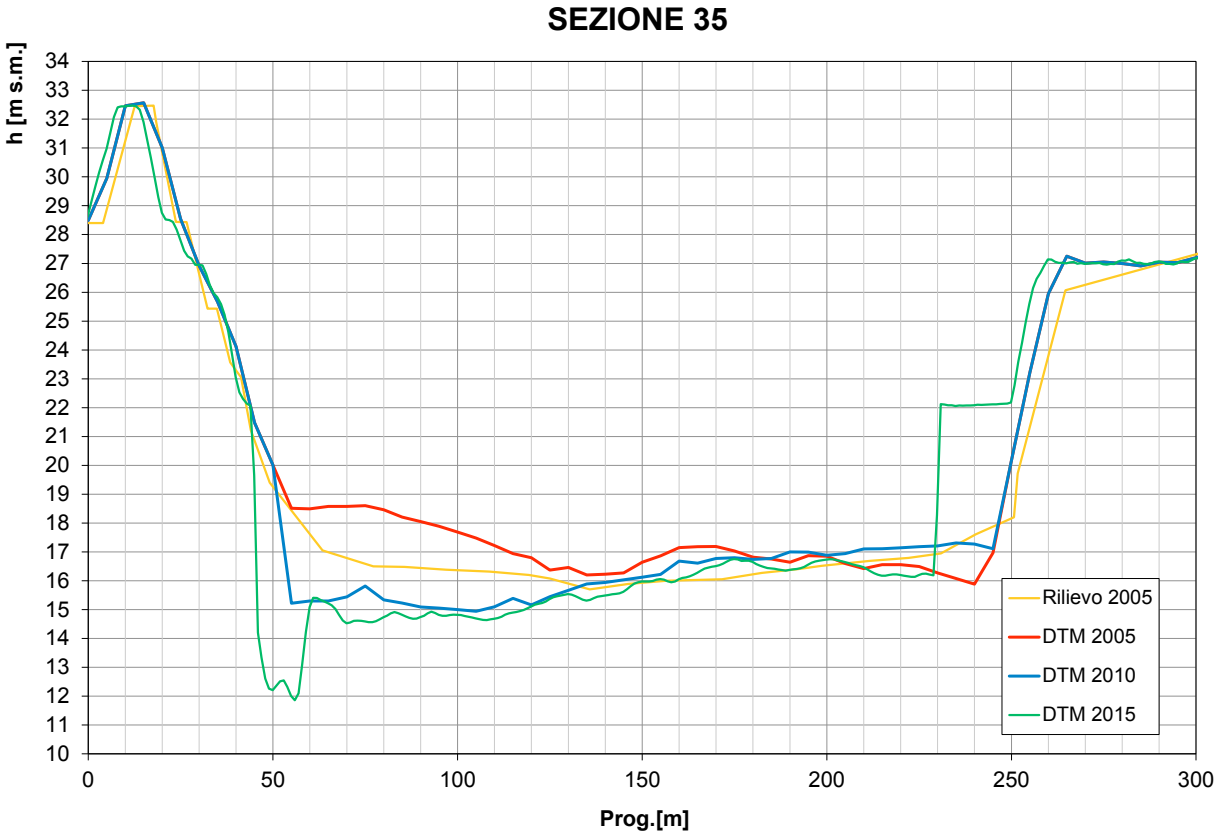
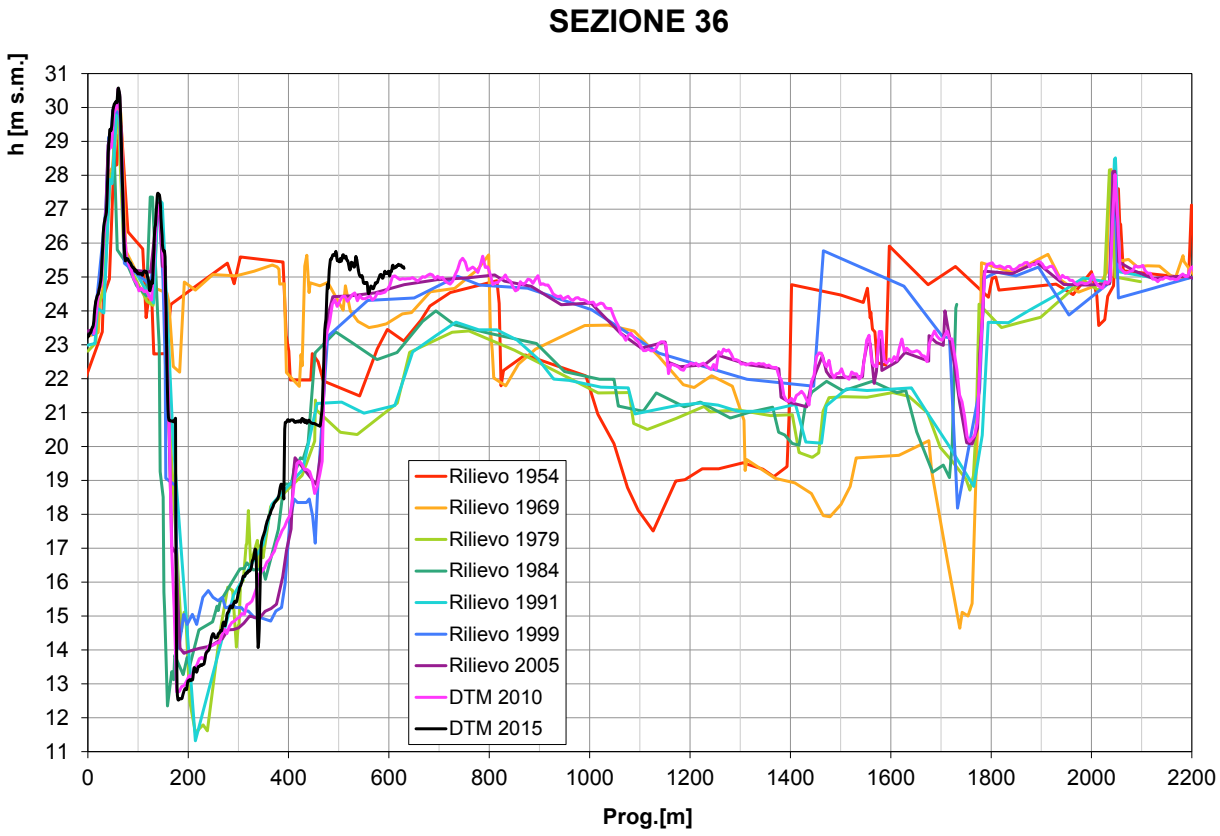


Figura 63 – Confronto multitemporale sezione n. 35.



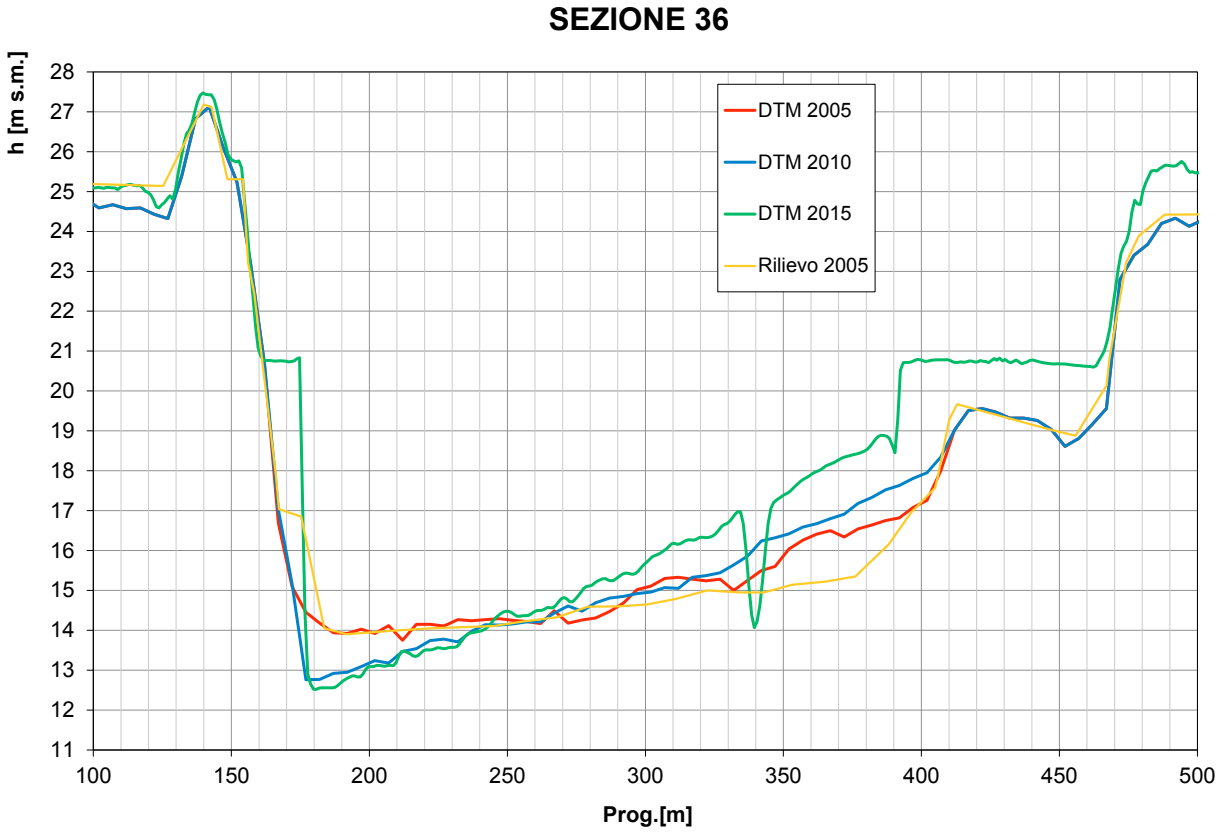
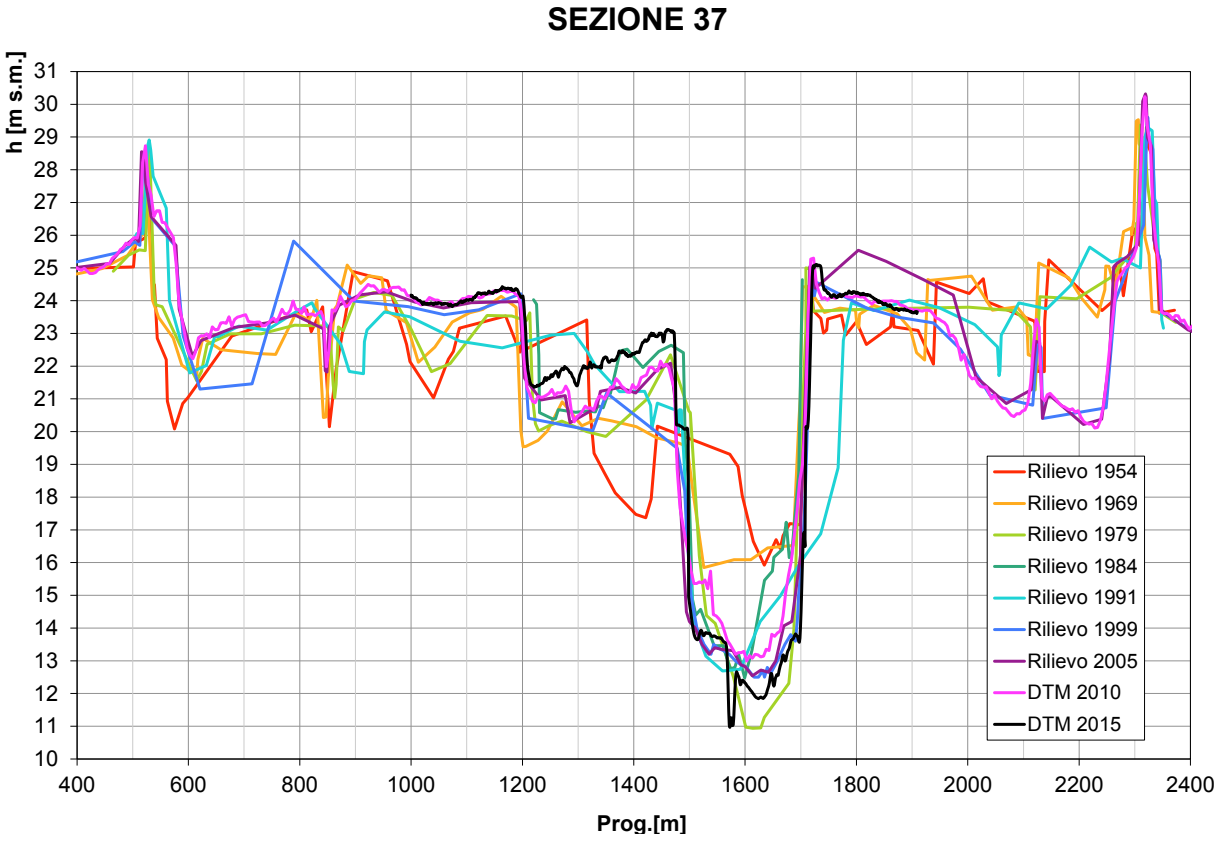


Figura 64 – Confronto multitemporale sezione n. 36.



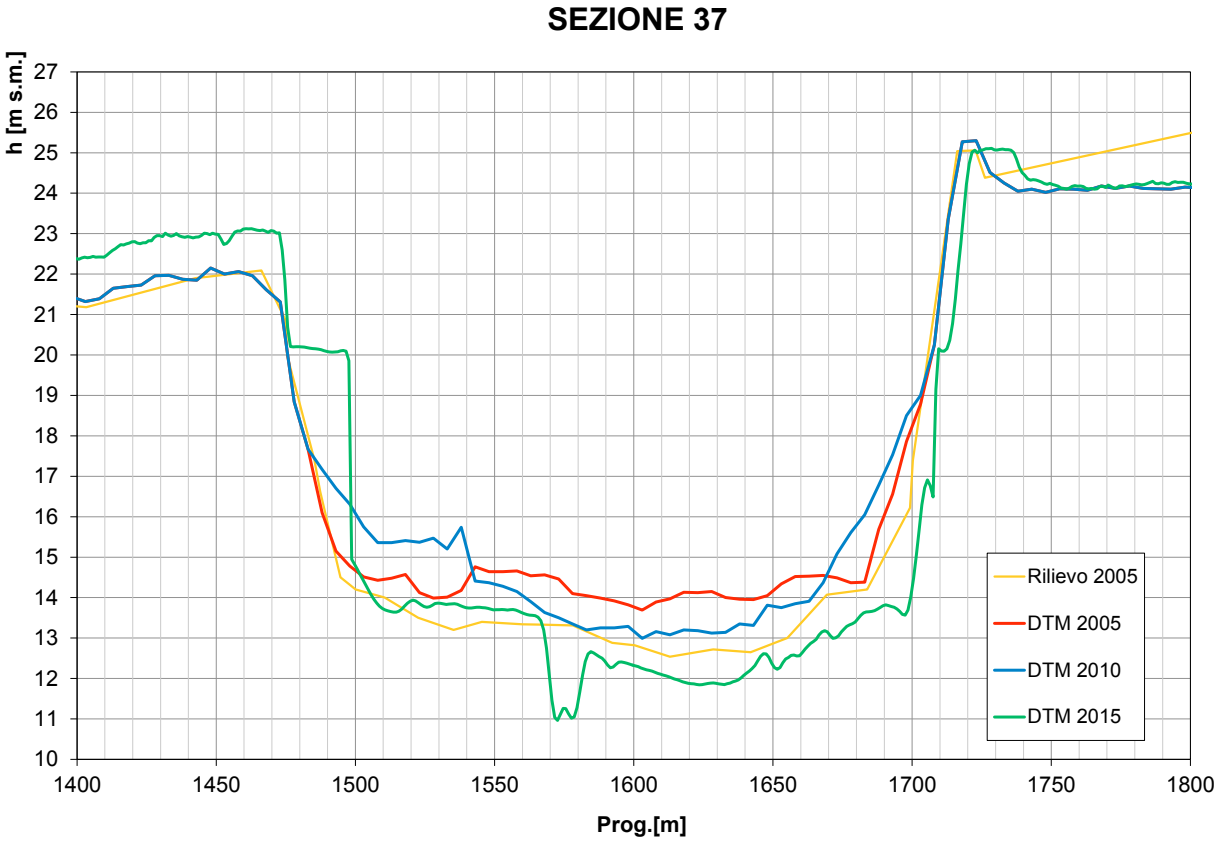
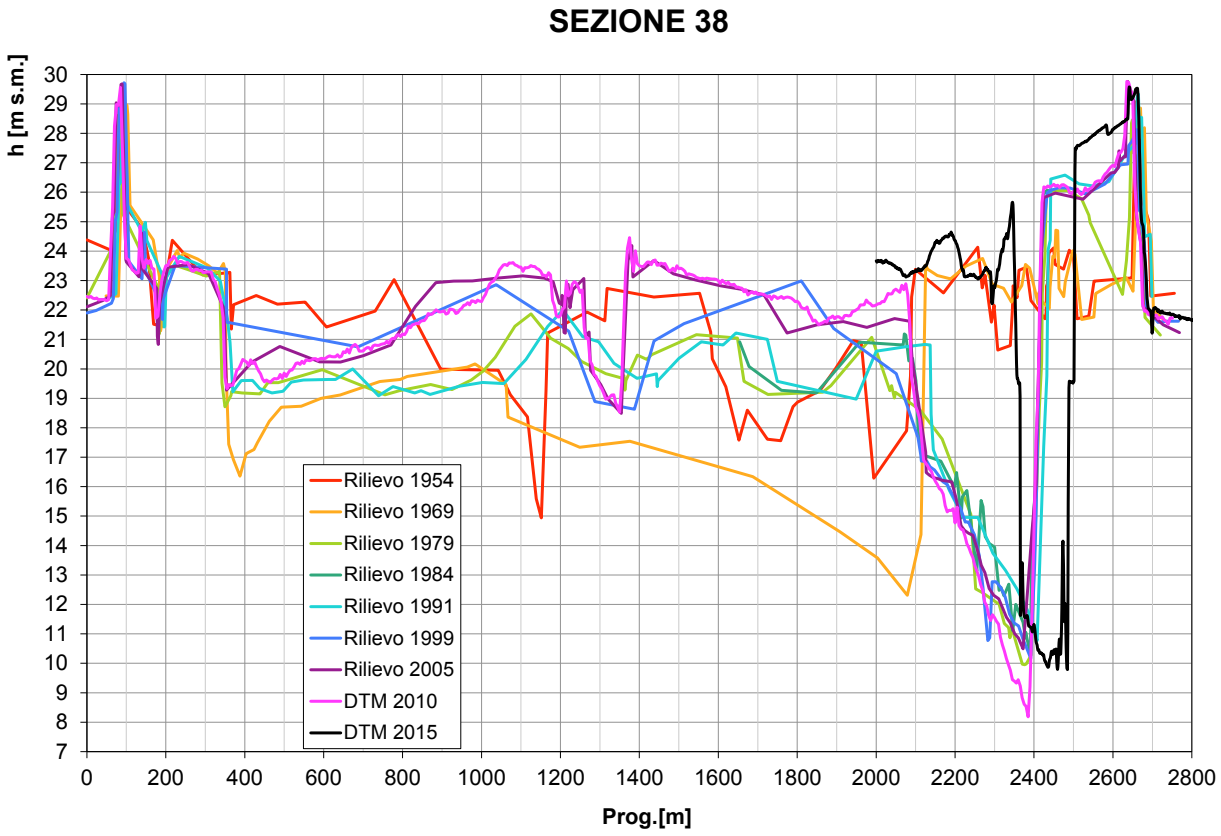


Figura 65 – Confronto multitemporale sezione n. 37.



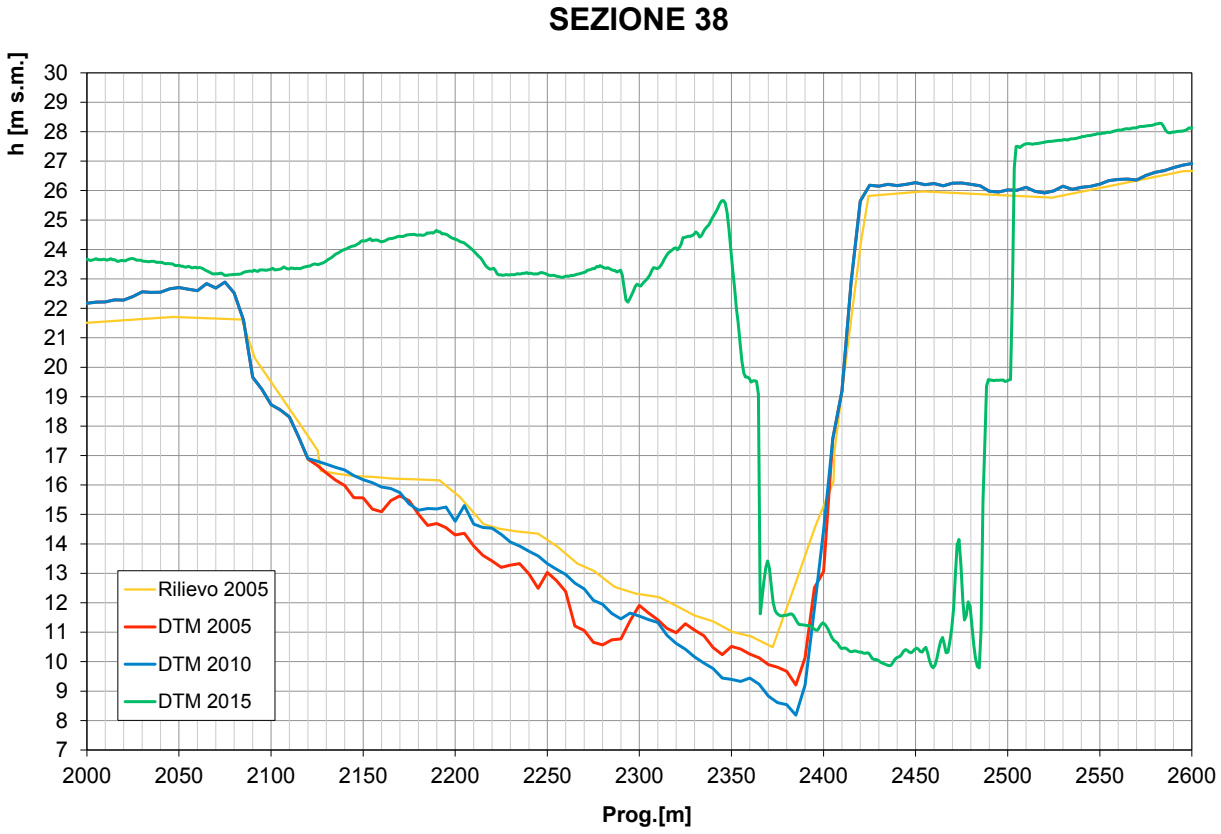
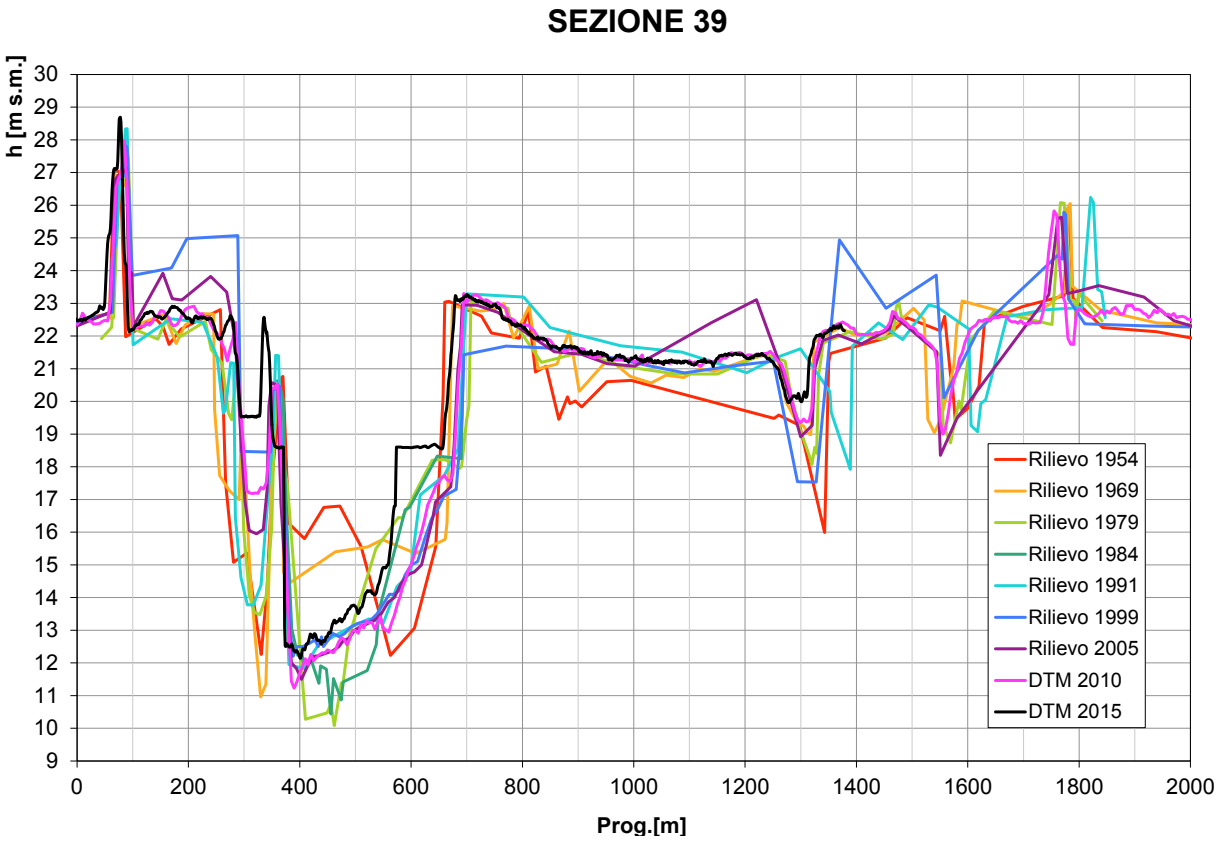


Figura 66 – Confronto multitemporale sezione n. 38. Il rilievo della sezione del 2015 non è stato effettuato lungo l'allineamento della sezione ufficiale 38



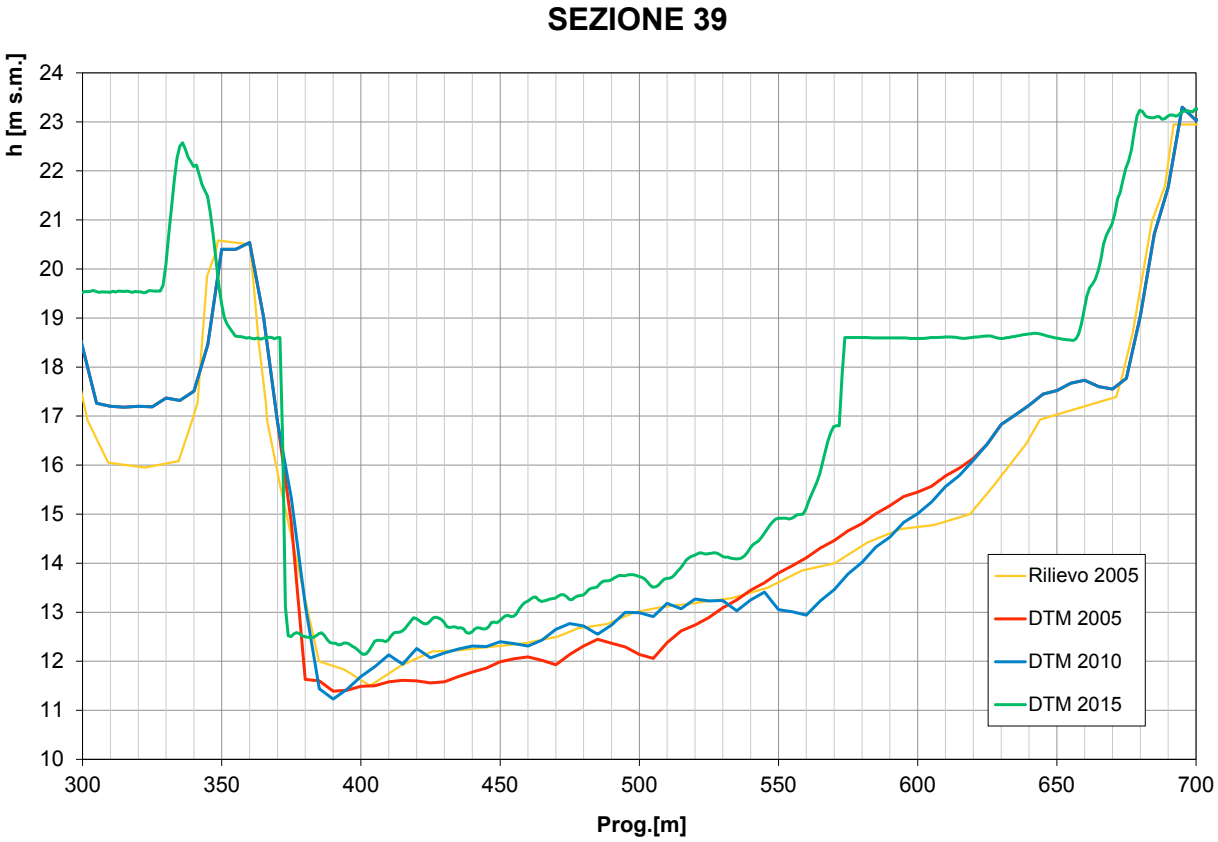
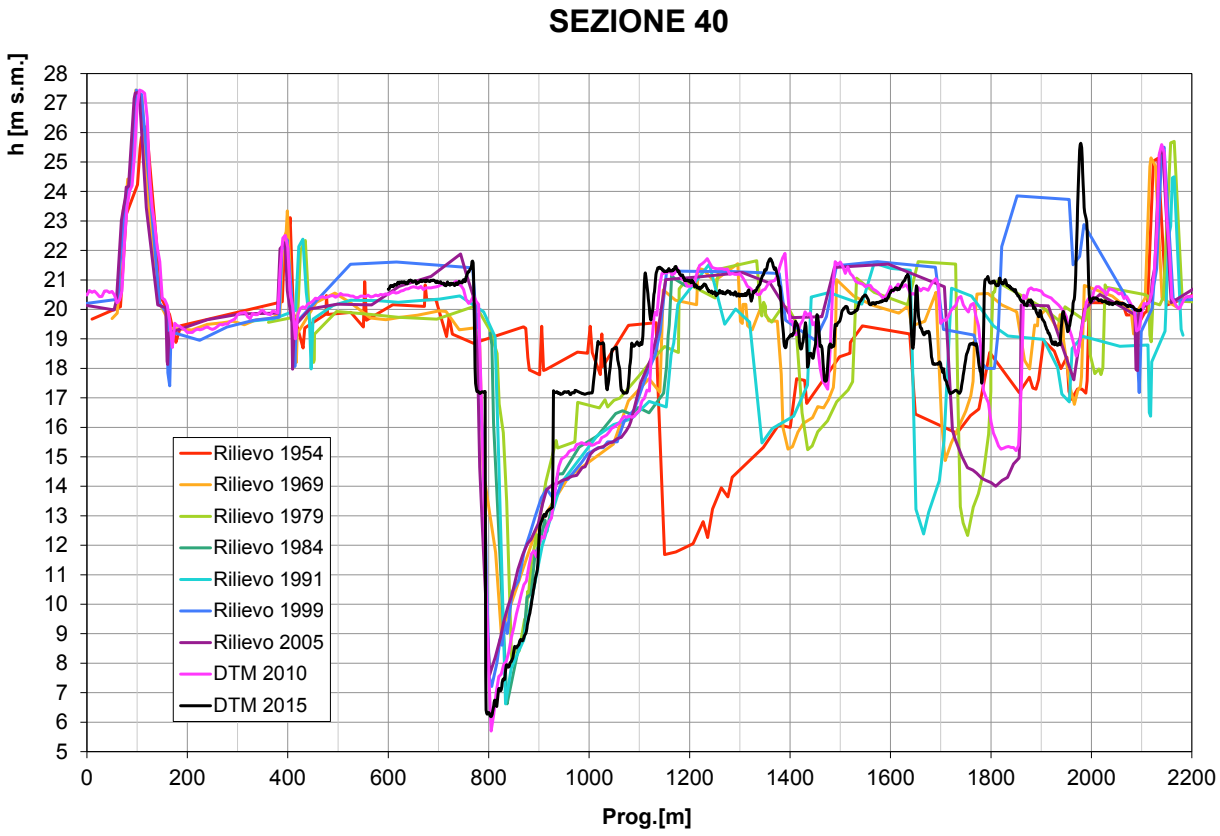


Figura 67 – Confronto multitemporale sezione n. 39.



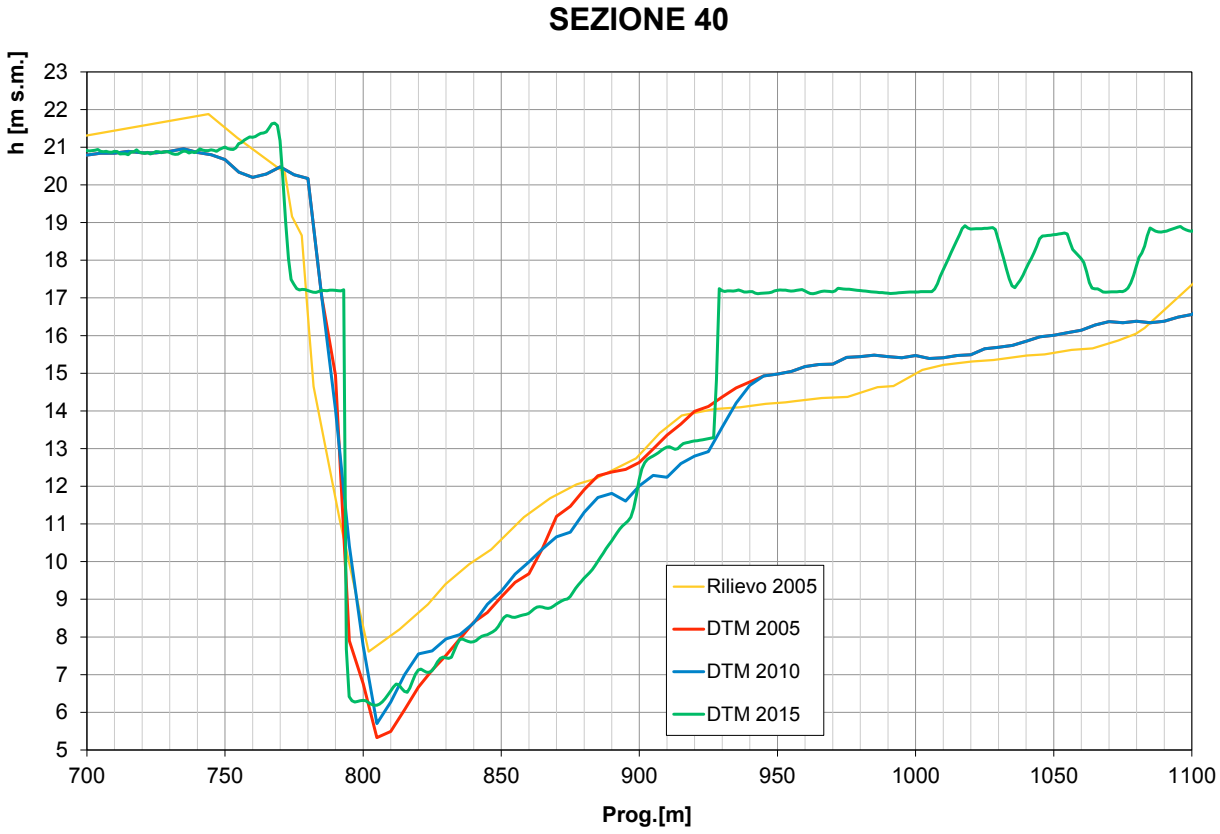
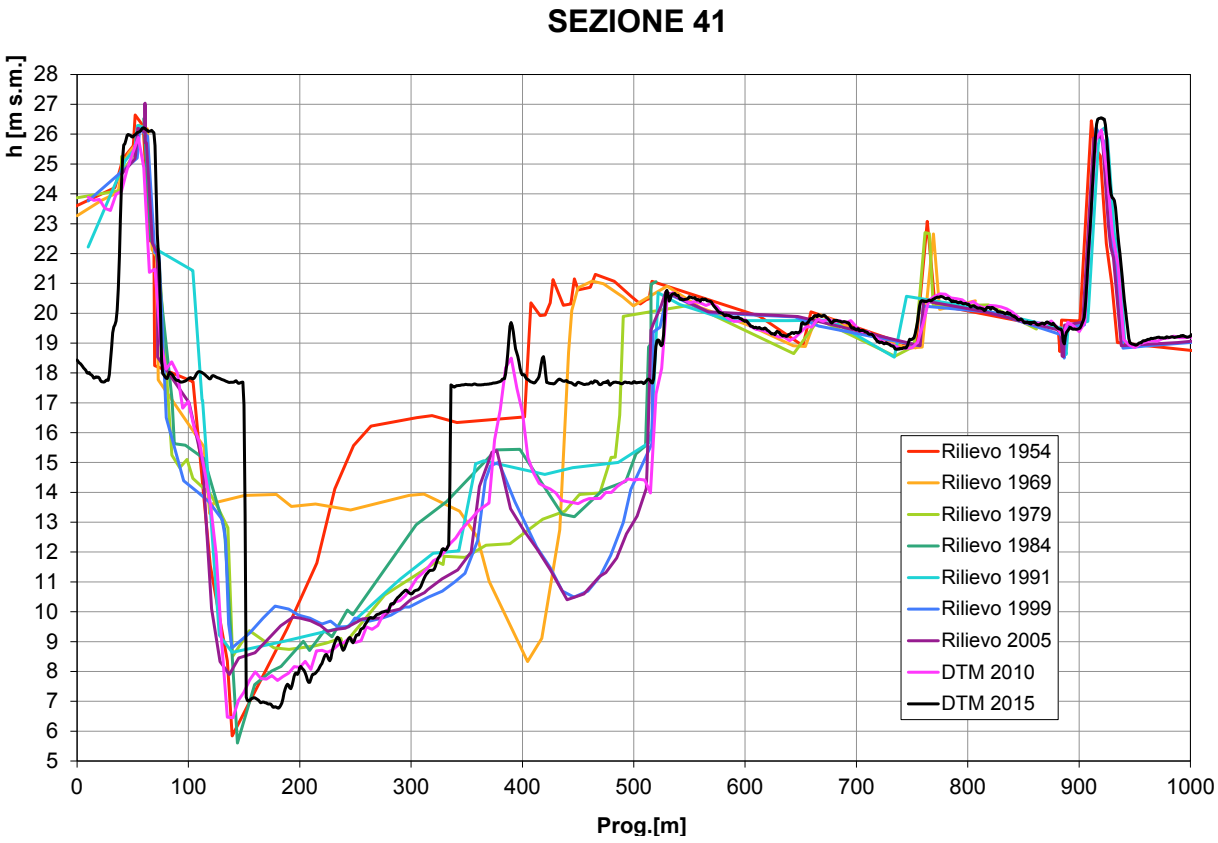


Figura 68 – Confronto multitemporale sezione n. 40.



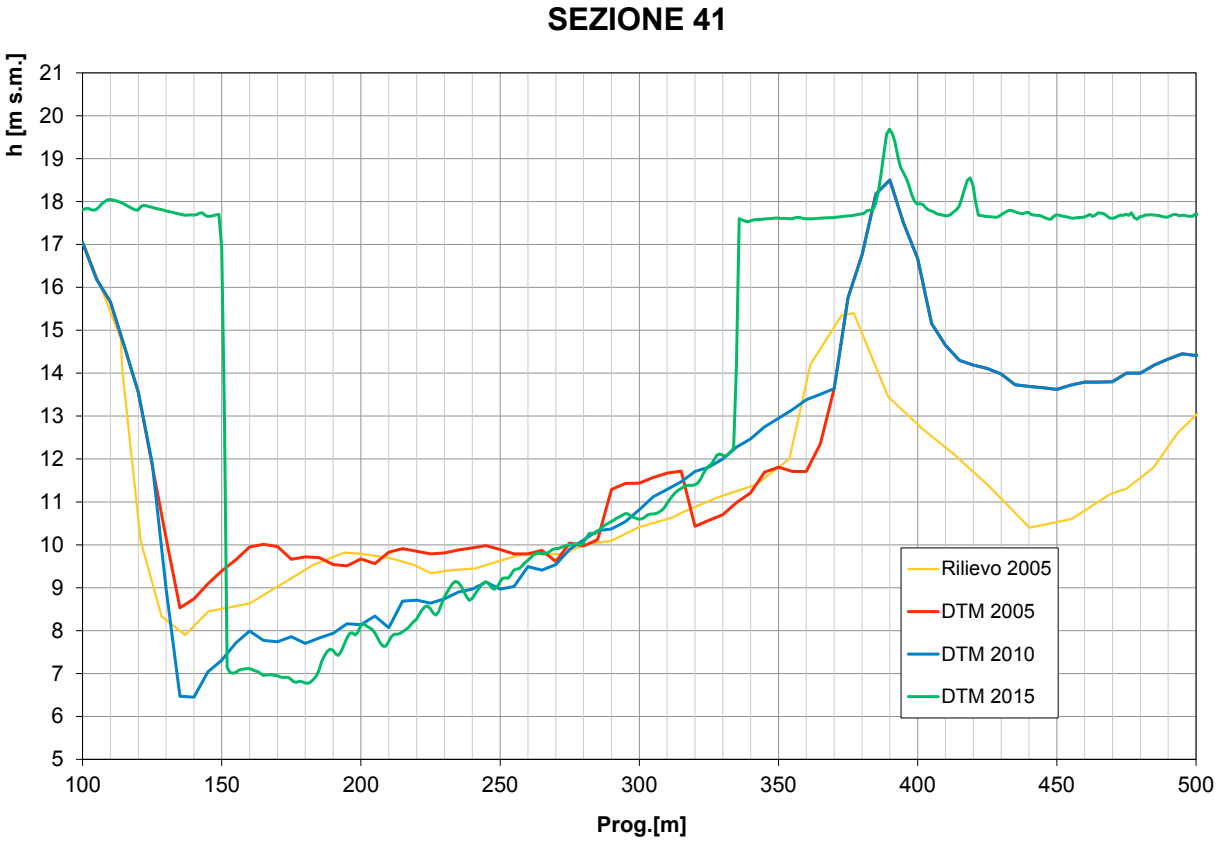
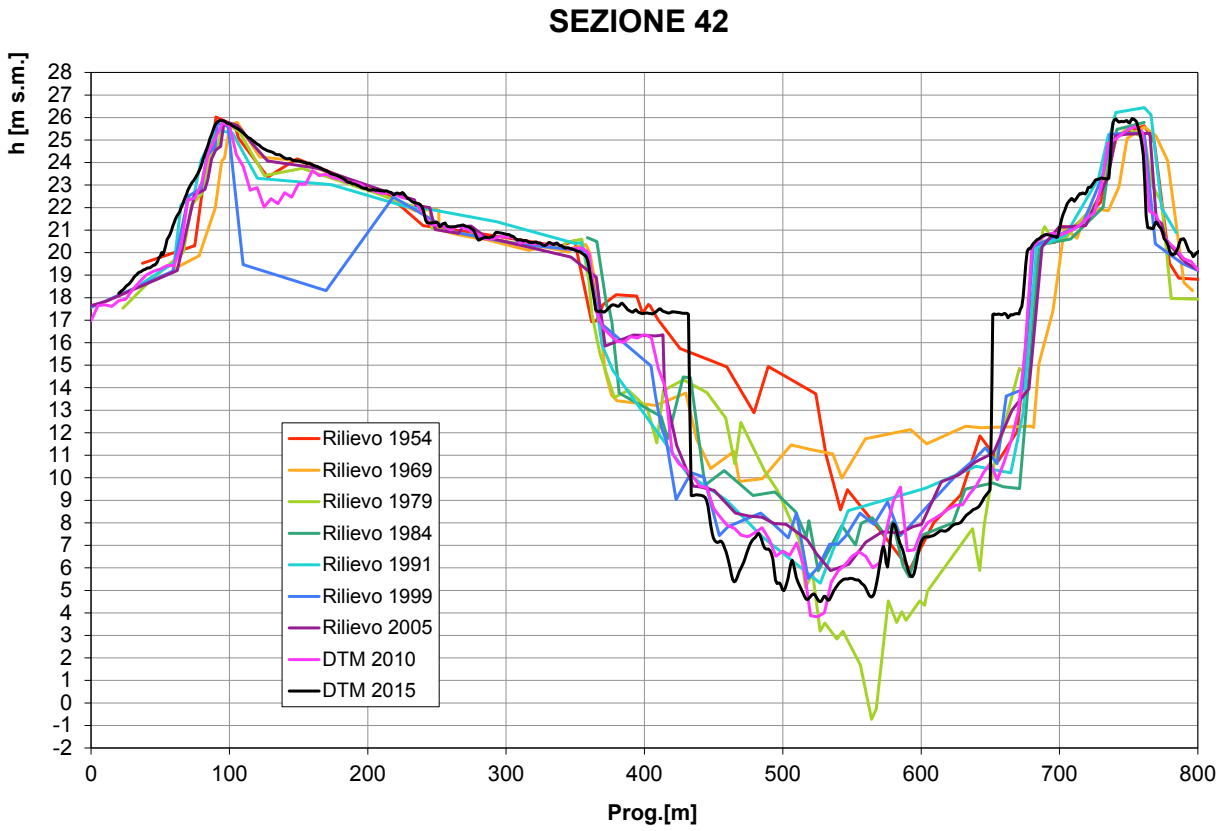


Figura 69 – Confronto multitemporale sezione n. 41.



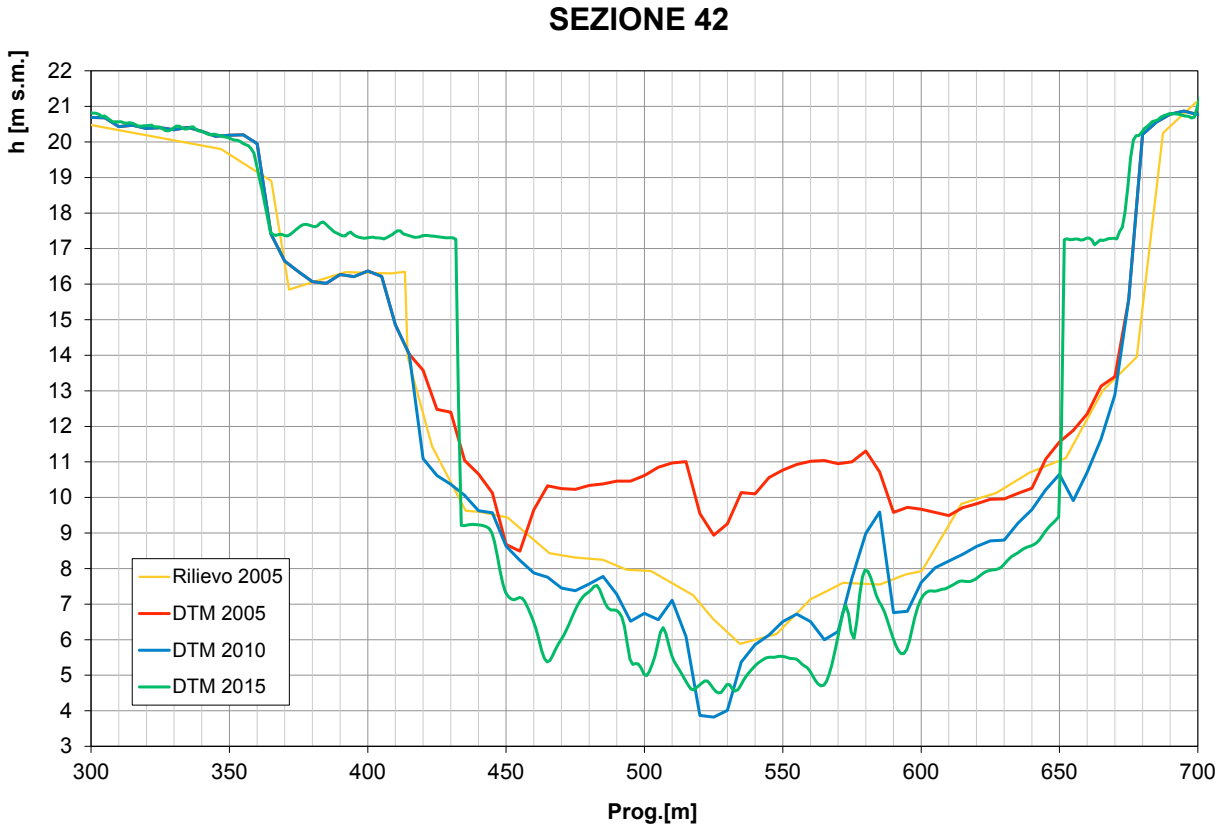
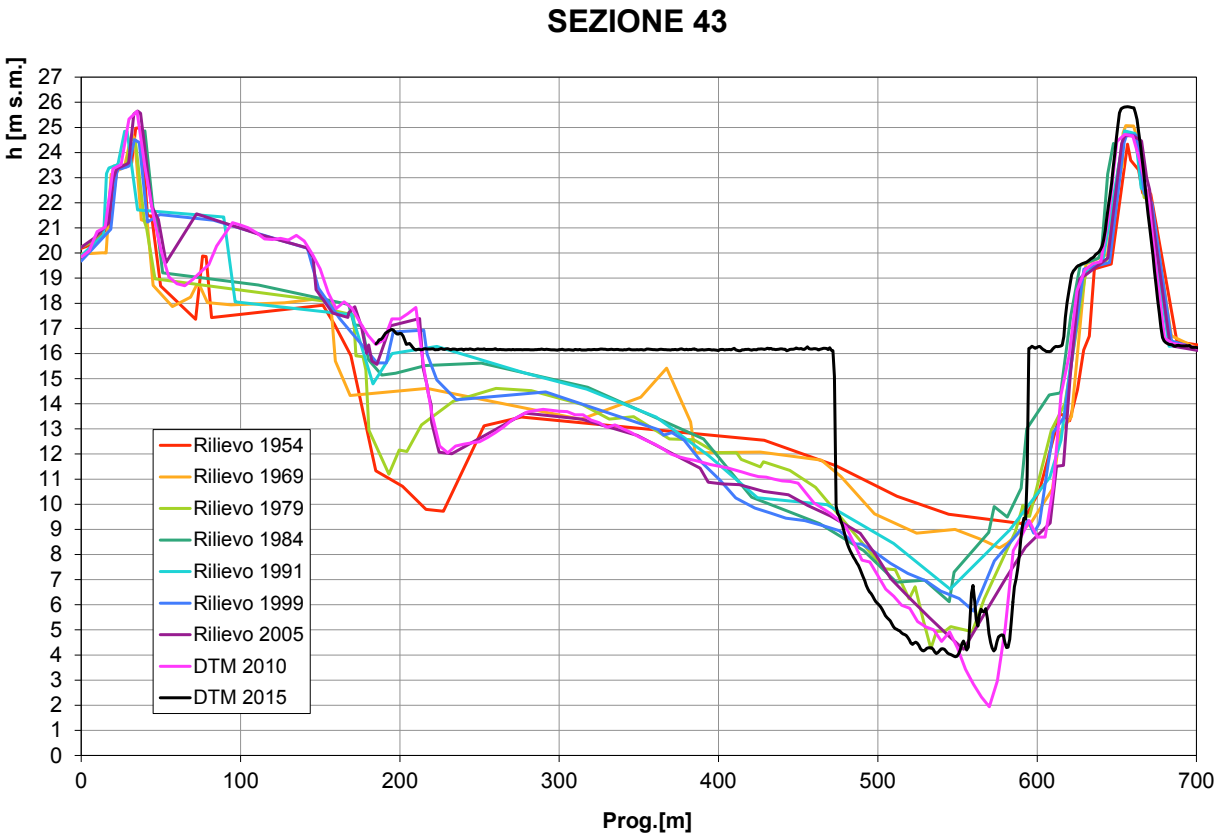


Figura 70 – Confronto multitemporale sezione n. 42.



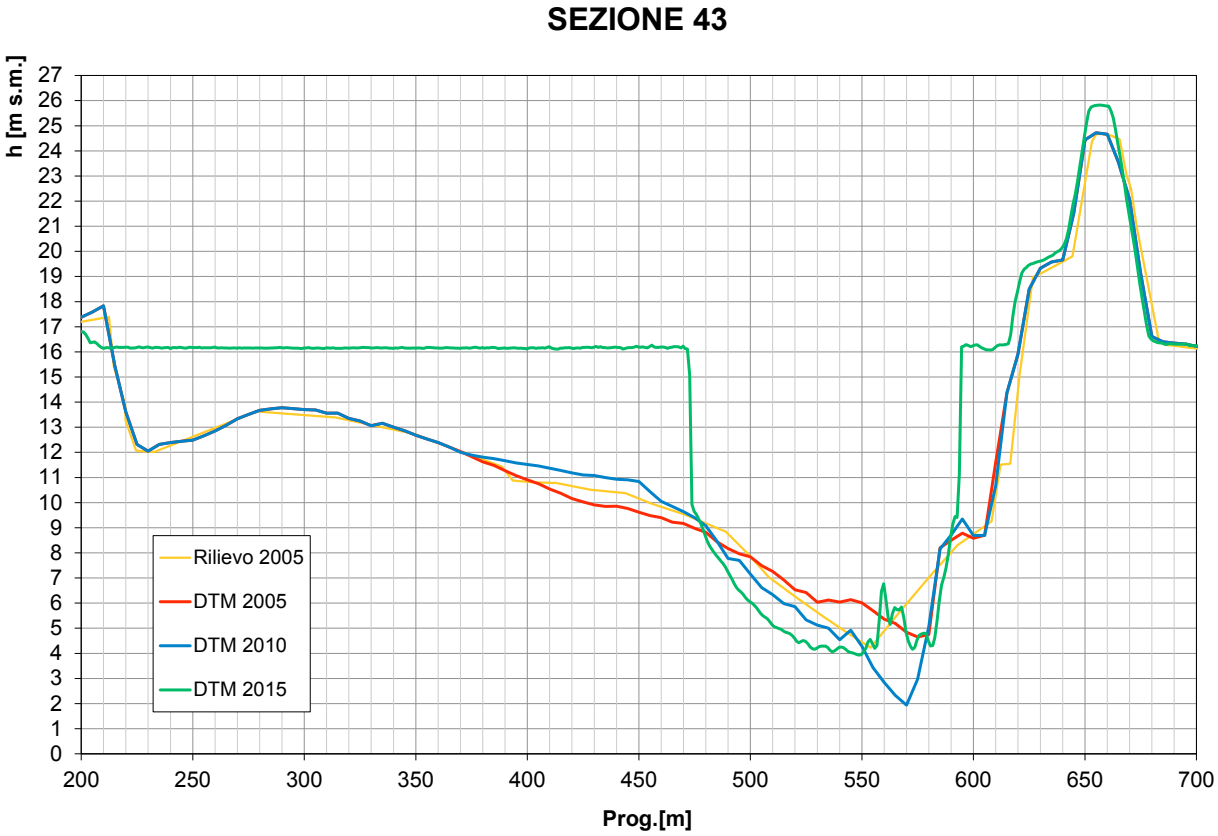
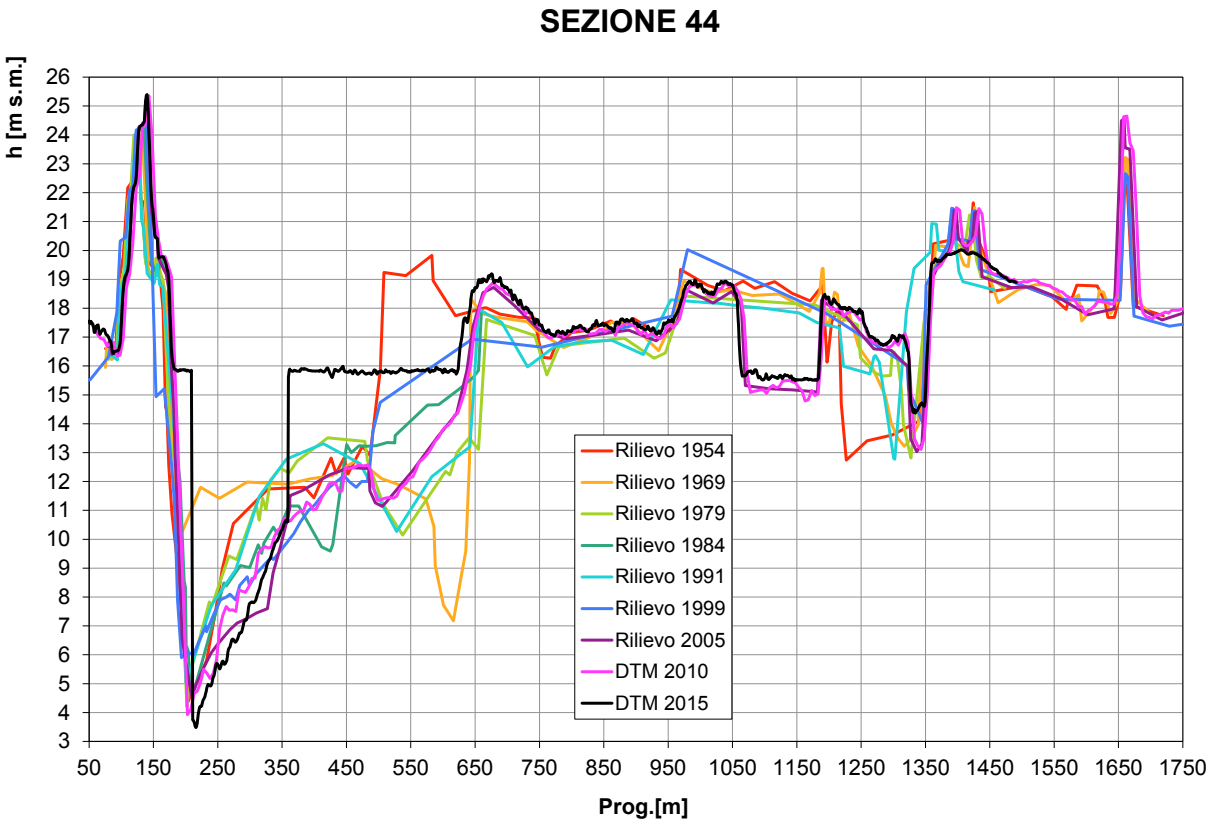


Figura 71 – Confronto multitemporale sezione n. 43.



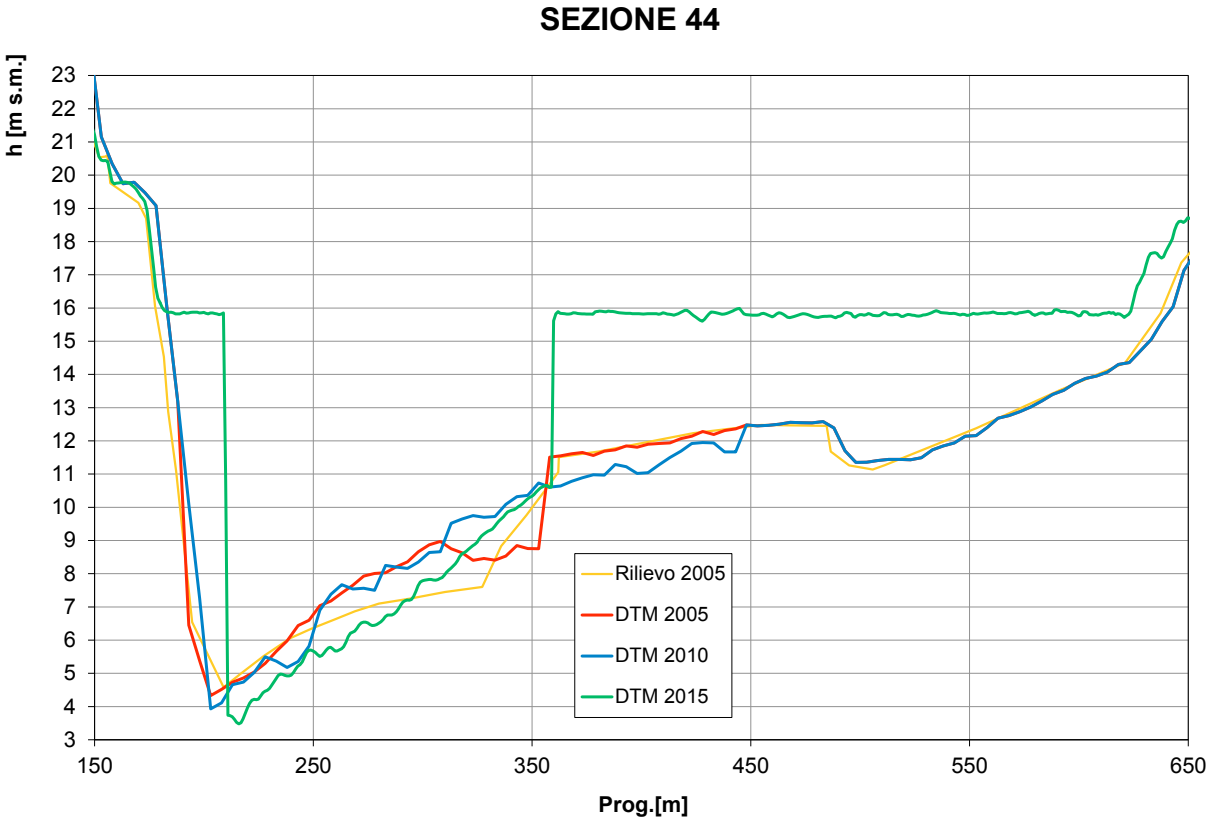


Figura 72 – Confronto multitemporale sezione n. 44.

4.5.6 Andamento delle altezze idrometriche degli eventi di magra

Per ulteriore verifica della suddetta tendenza del fondo alveo, nelle figure seguenti sono riportate le altezze idrometriche minime stagionali aggiornate fino al 2015 negli idrometri di Cremona, Casalmaggiore, Boretto, Borgoforte, Pontelagoscuro. La dispersione dei punti è ovviamente legata ai differenti valori di portata minima, ma la dinamica di abbassamento è ben chiara, non solo per il periodo 1960-2000, in cui si sono verificati gli abbassamenti più rilevanti, ma anche nel periodo successivo al 2000, soprattutto in corrispondenza degli idrometri di Cremona e Casalmaggiore.

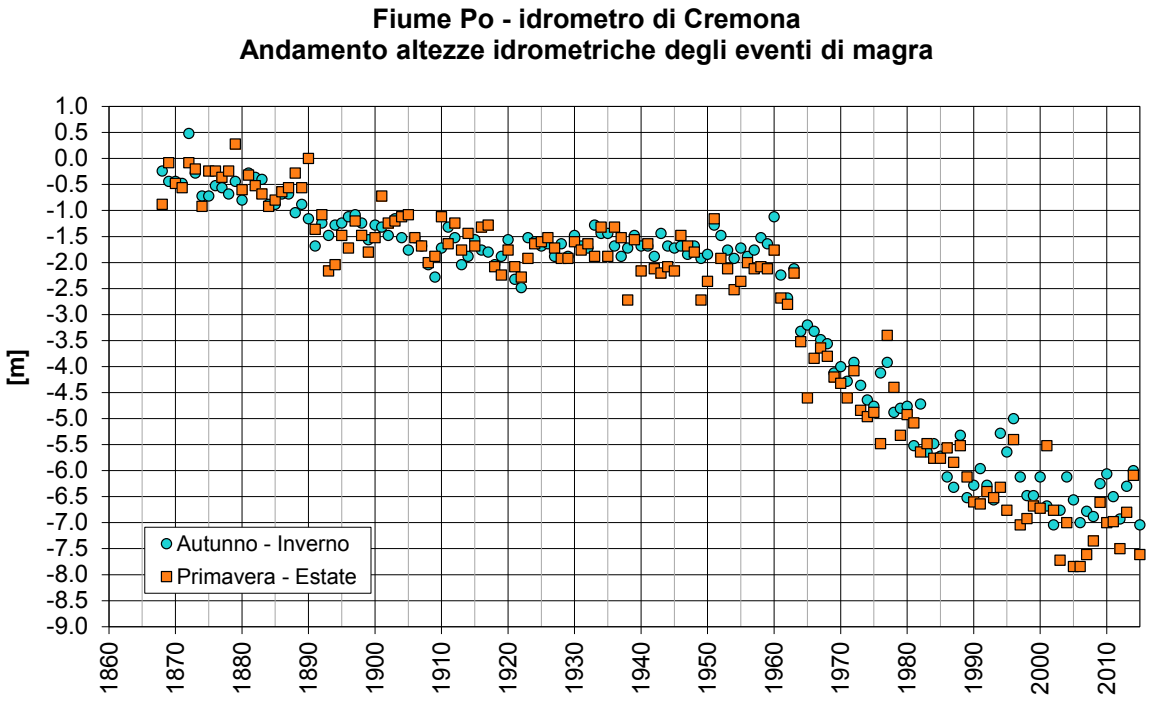


Figura 73 – idrometro di Cremona.

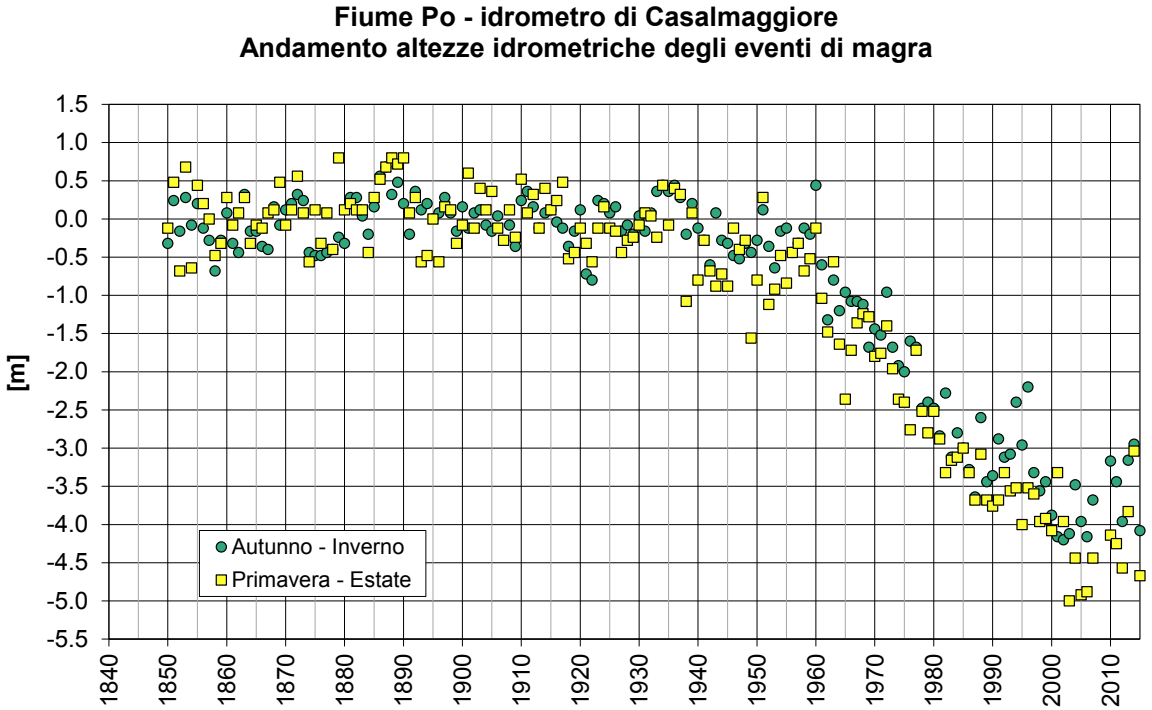


Figura 74 – idrometro di Casalmaggiore.

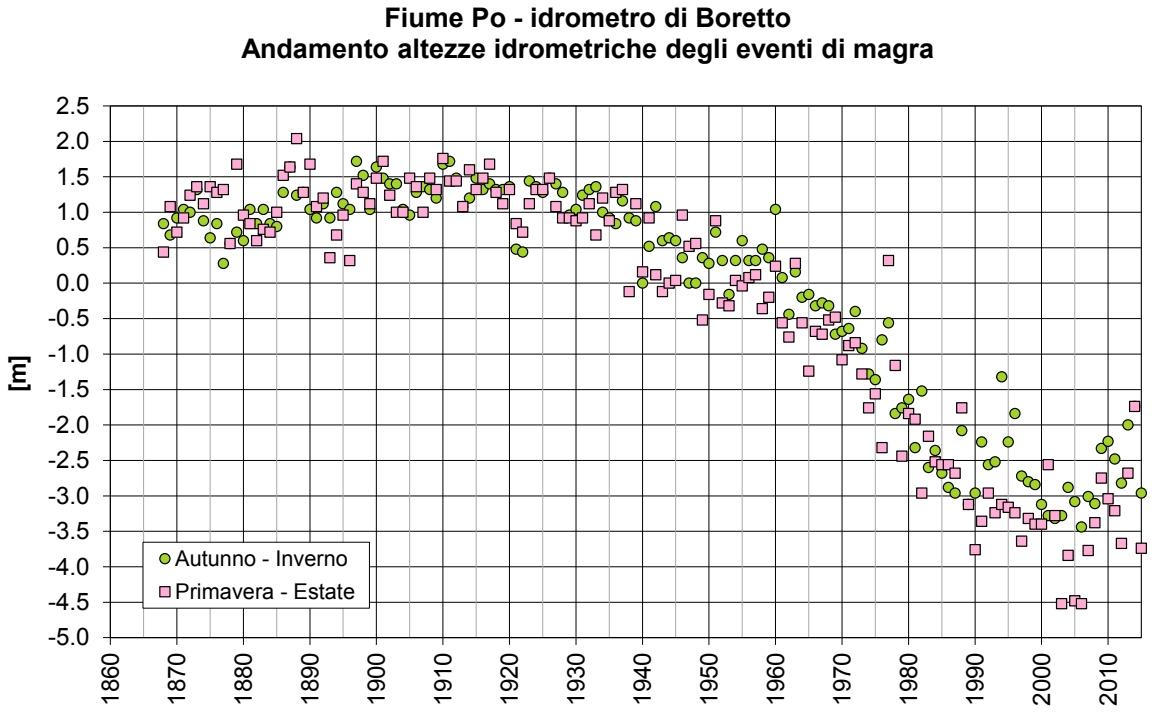


Figura 75 – idrometro di Boretto.

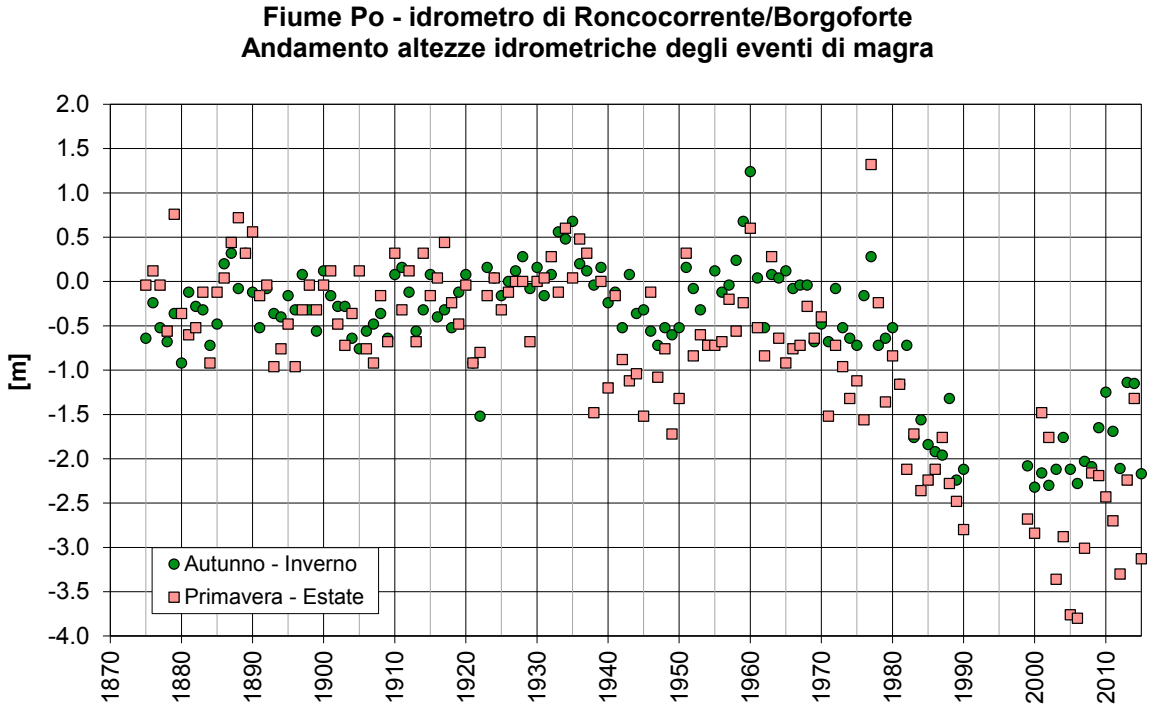


Figura 76 – idrometro di Borgoforte.

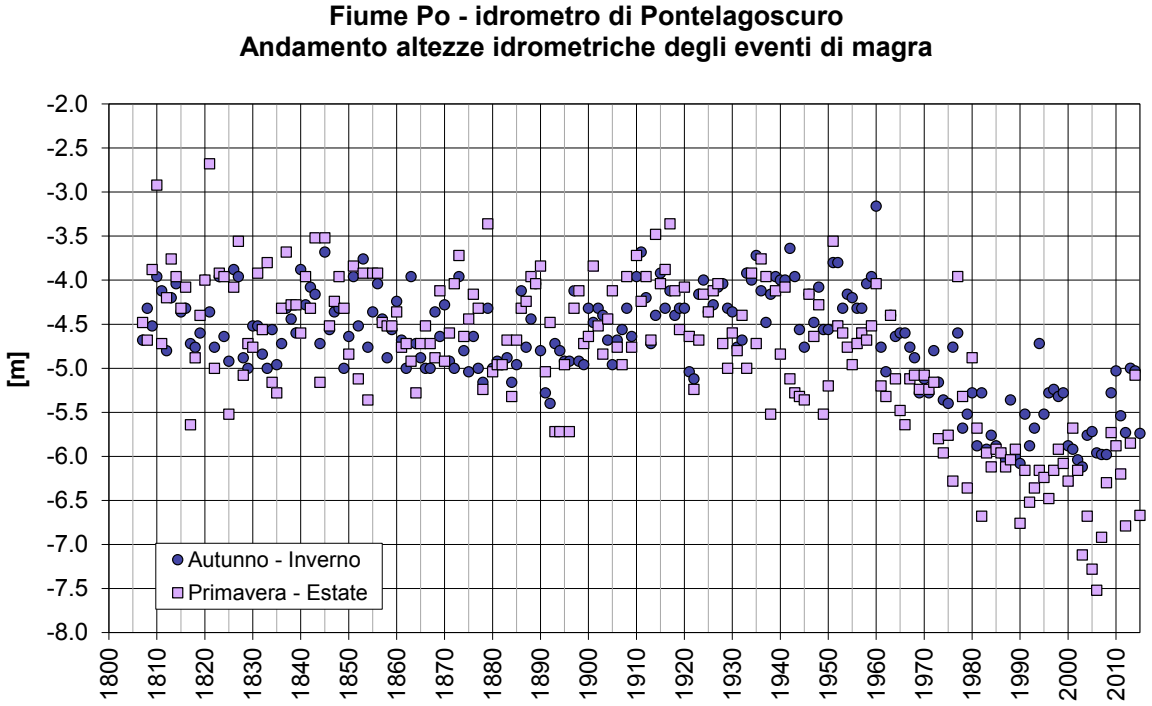


Figura 77 – idrometro di Pontelagoscuro.

4.5.7 Analisi delle tendenze evolutive del fondo alveo dalla sezione 44 (progr. km 482) al Po di Goro (progr. Km 603)

Come più volte esposto, le tendenze evolutive del fondo alveo dal 2005 al 2014 sono state analizzate nei paragrafi precedenti solo per il tratto compreso tra la progressiva km 375 (sezione 26) e la progressiva km 482 (sezione 44), mentre ciò non è stato possibile per il tratto compreso tra la sezione 44 e l'incile del Po di Goro, a causa della mancanza di rilievi batimetrici aggiornati al 2015.

È tuttavia possibile procedere ad una stima di tale evoluzione, sia pure approssimata e indiretta, mediante l'analisi dei livelli idrometrici registrati negli anni dal 2005 al 2015 in condizioni di magra o comunque di portata limitata. In proposito la documentazione ufficiale, costituita per gli anni dal 2005 al 2014 dagli Annali Idrologici Parte II pubblicati da ARPA Emilia Romagna e per l'anno 2015 da quanto inserito nel sito di ARPA Lombardia, fornisce i dati delle seguenti cinque stazioni[1]:

[1] Per quanto riguarda la stazione di Sermide si deve osservare che il corrispondente zero idrometrico è riportato negli Annali con il valore 7,63 m s.m. fino al 2007, mentre dal 2008 è indicato il valore 5,51 m s.m.. Quest'ultimo valore è anche quello riportato nella apposita scheda monografica descrivente questa stazione. Si tratta evidentemente di una variazione non indifferente che potrebbe ingenerare qualche confusione nel caso in cui non se ne tenesse conto. Per accertare la reciproca congruità dei dati idrometrici pubblicati fino al 2007 e dal 2008 in poi, si sono analizzate le scale di portata pubblicate anno per anno, verificandone la sostanziale congruità al passare del tempo. Infatti, a parità di valore idrometrico rispetto allo zero, sono del tutto analoghe le corrispondenti portate indicate anno per anno dalle scale di portata, anche se ovviamente differenti di anno in anno a causa delle ricalibrazioni della scala stessa. Quindi le due serie idrometriche rispetto allo zero pubblicate fino al 2007 e dal 2008 in poi sono reciprocamente congruenti, confermando con ciò che la suddetta variazione della quota assoluta dello zero idrometrico è legata solo al controllo topografico del medesimo.

Stazione	*Progr. km*	*Annate pubblicate*	*Dati pubblicati*
Borgoforte	471,8	tutte dal 2005 al 2015	dati idrometrici giornalieri, scale di portata annuali e portate giornaliere
Sermide	528,5	tutte dal 2005 al 2015	dati idrometrici giornalieri, scale di portata annuali e portate giornaliere
Ficarolo	543,5	dal 2007 al 2014	dati idrometrici giornalieri, scale di portata annuali e portate giornaliere
Pontelagoscuro	563,5	tutte dal 2005 al 2015	dati idrometrici giornalieri, scale di portata annuali e portate giornaliere
Polesella	579,5	tutte dal 2005 al 2015	solo dati idrometrici giornalieri

Esaminando i suddetti dati si sono in particolare ricercati i valori dei livelli idrometrici registrati nelle varie sezioni, annata per annata, corrispondenti ad un valore prefissato di portata sufficientemente ridotto per dare testimonianza delle variazioni del fondo alveo.

Individuati quindi i valori di portata minimi assoluti per ogni anno si è evidenziato che la portata di magra di 400 m3/s poteva ben rappresentare l'evoluzione del fondo alveo dal momento che essa si è verificata in tutte le stazioni, sia pure in date differenti, negli anni 2005, 2006, 2007, 2012 e 2015 caratterizzati da magre significative. Negli altri anni invece si sono verificate portate minime alquanto maggiori; pertanto si è scelta la portata di 1.000 m3/s per verificare ulteriormente l'evoluzione del corrispondente profilo idrico e quindi indirettamente del fondo alveo.

Dunque facendo riferimento agli Annali Idrologici Parte II, Sezione C "Portate e bilanci idrologici", che riportano per ogni anno le tabelle delle portate giornaliere nelle varie stazioni, e trovato quindi in queste tabelle il giorno di ogni anno in cui era presente la portata di 400 o di 1000 mc/s, è stata individuata dalla Sezione B "Idrometria, Tabella I" la corrispondente altezza idrometrica rispetto allo zero idrometrico dello stesso giorno; quest'ultima è poi stata espressa in quota assoluta (in m s.m.) tenendo conto della quota assoluta dello zero idrometrico.

Nelle seguenti Tabella 11 e Tabella 12 sono riportati i suddetti dati idrometrici.

Come si osserva, i livelli idrici indicati nelle tabelle non differiscono significativamente nelle diverse stazioni al passare del tempo come mostra anche la Figura 78 che riporta i profili idrici da Borgoforte a Polesella registrati per le portate 400 e 1.000 m3/s nelle diverse annate. Solo nella stazione di Borgoforte si evidenzia per la portata di 400 m3/s un abbassamento del livello idrico di circa 20÷40 cm a conferma dell'abbassamento del fondo alveo precedentemente discusso.

In conclusione questa analisi, che si ricorda è di tipo indiretto dal momento che non si è potuta basare su rilievi batimetrici del fondo alveo al 2015, da confrontare con le batimetrie rilevate nel 2005, ma solo sui livelli registrati dalle suddette cinque stazioni idrometriche, sembra mostrare come il fondo alveo non abbia subito nel decennio sostanziali modifiche da foce Mincio al Po di Goro.

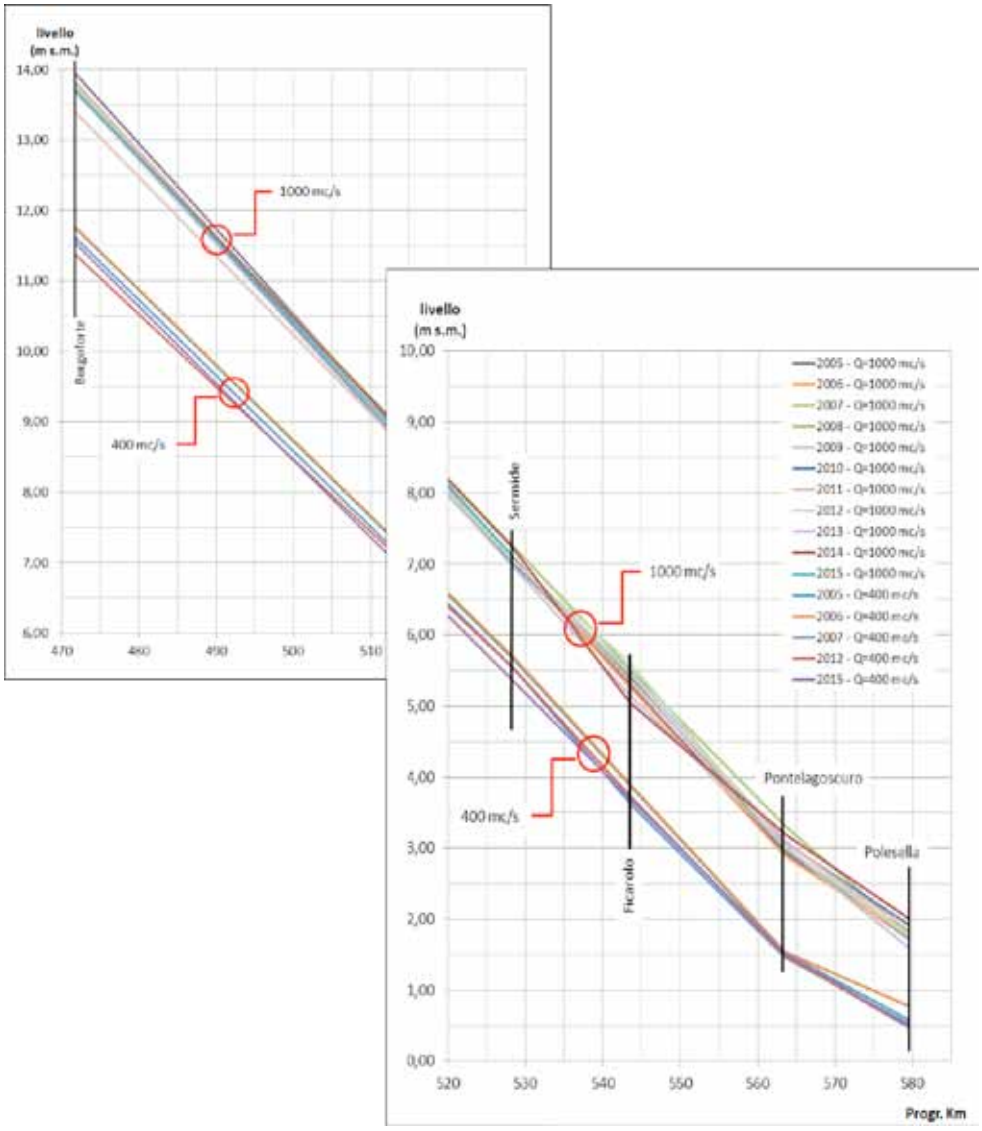


Figura 78 - Profili idrici annui da Borgoforte a Polesella per portate di 400 e 1.000 m3/s.

Anno	Borgoforte				Sermide				Ficarolo				Pontelagoscuro				Polesella			
	data	Q	hsu zero	h msm	data	Q	hsu zero	h msm	data	Q	hsu zero	h msm	data	Q	hsu zero	h msm	data	Q	hsu zero	h msm
2005	09-giu	397	-2,76	11,74	09-giu	406	0,15	5,66					21-giu	408	-6,6	1,52	21-giu		-0,58	0,59
2006	10-lug	408	-2,74	11,76	14-ago	401	0,17	5,68					07-giu	406	-6,59	1,53	07-giu		-0,39	0,78
2007	17-lug	407	-2,89	11,61	18-lug	401	0,01	5,52	19-lug	403	-6,62	3,63	17-lug	390	-6,66	1,46	17-lug		-0,64	0,53
2008																				
2009																				
2010																				
2011																				
2012	21-lug	401	-3,13	11,37	04-ago	400	0,02	5,53	03-ago	415	-6,51	3,74	27-lug	394	-6,64	1,48	27-lug		-0,69	0,48
2013																				
2014																				
2015	15-lug	400	-2,97	11,53									17-lug	400	-6,60	1,52	17-lug		-0,68	0,49

Tabella 11 - Dati idrometrici degli Annali Idrologici per la portata di circa 400 m3/s.

Anno	Borgoforte				Sermide				Ficarolo				Pontelagoscuro				Polesella			
	data	Q	hsu zero	h msm	data	Q	hsu zero	h msm	data	Q	hsu zero	h msm	data	Q	hsu zero	h msm	data	Q	hsu zero	h msm
2005	26-mag	1000	-0,56	13,94	09-mag	1010	1,57	7,08					11-mag	998	-5,18	2,94	11-mag		0,56	1,73
2006	10-mar	1000	-0,68	13,82	11-mar	1000	1,54	7,05					15-apr	1000	-5,23	2,89	15-apr		0,59	1,76
2007	26-ago	1010	-0,79	13,71	24-ago	1010	1,73	7,24	27-giu	1000	-4,73	5,52	02-set	1030	-4,81	3,31	02-set		0,64	1,81
2008	08-lug	997	-0,82	13,68	08-lug	1020	1,5	7,01	07-set	1000	-4,83	5,42	04-ott	1010	-5,14	2,98	04-ott		0,62	1,79
2009	24-lug	1000	-0,71	13,79	31-ago	1010	1,54	7,05	31-ago	1010	-4,76	5,49	01-set	1010	-5,01	3,11	01-set		0,59	1,76
2010	05-lug	996	-0,8	13,7	10-lug	1000	1,49	7	10-lug	1010	-4,86	5,39	08-set	1010	-5,04	3,08	08-set		0,75	1,92
2011	05-mag	1010	-1,11	13,39	06-mag	1020	1,53	7,04	19-mag	1010	-4,88	5,37	27-giu	1020	-5,03	3,09	27-giu		0,68	1,85
2012	23-ott	1010	-0,75	13,75	24-ott	1020	1,52	7,03	05-gen	1000	-4,64	5,61	15-set	1010	-5,10	3,02	15-set		0,61	1,78
2013	20-set	1020	-0,81	13,69	08-set	1000	1,44	6,95	05-set	1000	-5,1	5,15	17-lug	1020	-5,10	3,02	17-lug		0,43	1,60
2014	11-giu	1000	-0,85	13,7	10-giu	1000	1,7	7,21	25-giu	1030	-4,96	5,05	24-giu	1030	-4,93	3,19	24-giu		0,76	2,01
2015	15-lug	400	-2,97	11,53	25-giu	1000	1,59	7,10					26-giu	1000	-5,17	2,95	26-giu		0,70	1,95

Tabella 12 - Dati idrometrici degli Annali Idrologici per la portata di circa 1.000 m3/s.

4.5.8 Bilancio del trasporto solido di fondo

Successivamente all'aggiornamento delle analisi delle tendenze evolutive in atto nell'alveo inciso, si è proceduto al calcolo del bilancio del trasporto solido di fondo del Po con riferimento al periodo 2005-2015, utilizzando la metodologia utilizzata negli studi a supporto del Programma Generale di Gestione dei Sedimenti.

La determinazione del bilancio del trasporto solido di fondo del corso d'acqua è stata condotta attraverso l'aggregazione lungo la progressiva, a passo di 100 m, delle diverse componenti derivanti dagli studi geomorfologici, idraulici e tenendo conto degli apporti esterni e dei volumi estratti. In particolare, il bilancio della portata media di trasporto solido (valutata in termini di volume di trasporto nel periodo di riferimento) è fornito dall'espressione:

$$Gi = Gi\text{-}1 + Af - Estr + \Sigma Ebar - \Sigma Dbar + \Sigma Esp - \Sigma Dsp + \Sigma Efondo - \Sigma Dfondo$$

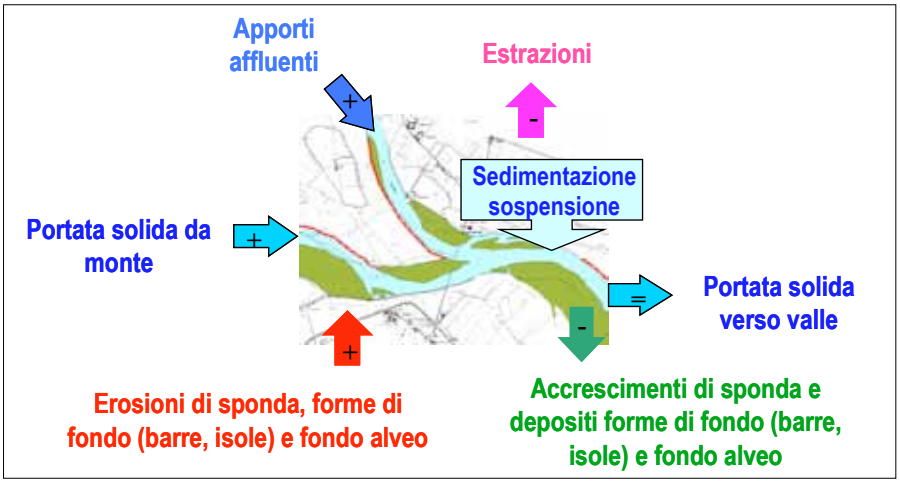


Figura 79 – Schema modello di analisi del bilancio del trasporto solido di fondo.

in cui:

Gi, Gi-1 = portate solide medie nelle sezioni rispettivamente i di valle e i-1 di monte del tratto considerato;

Af = portata solida proveniente dagli affluenti e dall'apporto di sedimentazione di materiali veicolati in sospensione;

Estr = portata solida media estratta;

ΣEbar = sommatoria delle portate solide rese disponibili dalle erosioni di barra;

ΣDbar = sommatoria delle portate solide arrestatesi nei depositi di barra;

ΣEsp = sommatoria delle portate solide rese disponibili dalle erosioni di sponda;

ΣDsp = sommatoria delle portate solide arrestatesi nei depositi di sponda;

ΣEfondo = sommatoria delle portate solide rese disponibili dalle erosioni di fondo alveo;

ΣDfondo = sommatoria delle portate solide arrestatesi nei depositi di fondo alveo.

I volumi erosi e depositati delle forme di fondo e del fondo alveo derivano dalle analisi descritte in precedenza. Gli apporti da monte e dagli affluenti sono desunti da studi precedenti e da specifiche valutazioni condotte nell'ambito del presente studio.

Di seguito, dopo aver descritto le singole componenti che concorrono al calcolo del bilancio di trasporto solido al fondo, viene presentata la curva di bilancio relativa al periodo 2005-2015.

4.5.8.1 Erosioni di barra

Le erosioni di barra riscontrate nel periodo 2005 – 2015 derivano dall'analisi geomorfologica descritta nel precedente par. 4.5.2. L'andamento dei volumi delle erosioni di barra è riportato nel grafico di Figura 80.

Nel complesso le erosioni di barra ammontano a circa 14 milioni di metri cubi nel periodo 2005-2015.

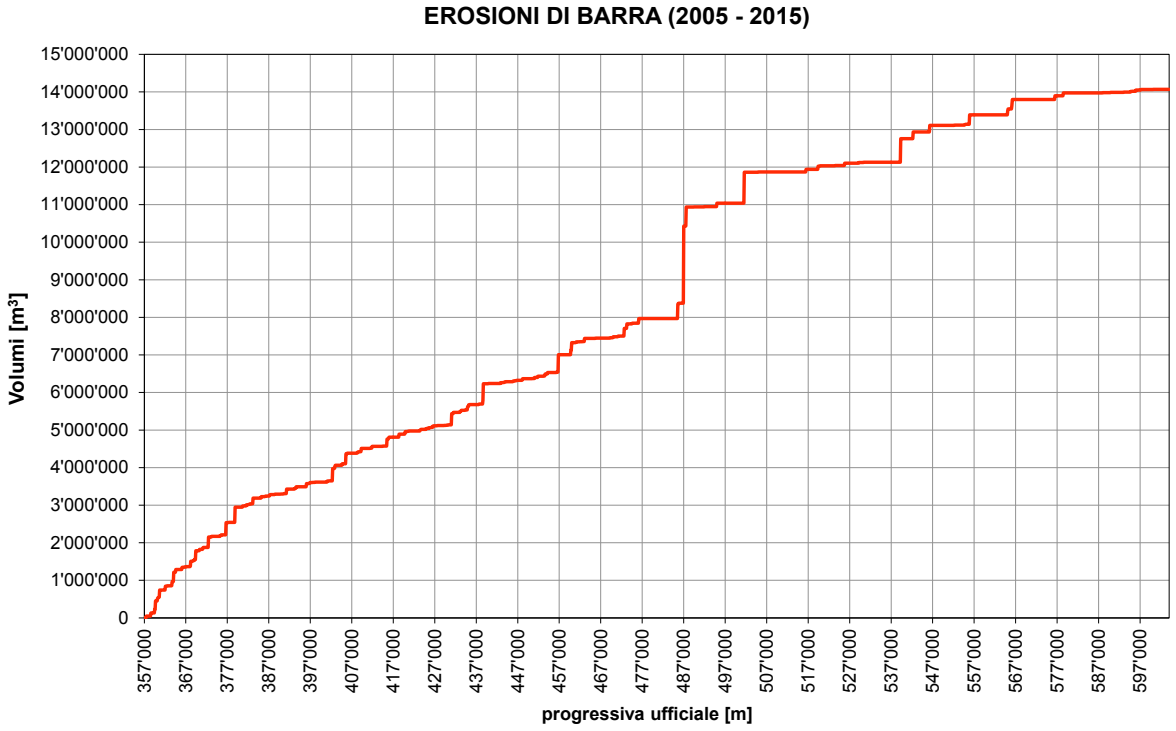


Figura 80 – Andamento dei volumi cumulati delle erosioni di barra.

4.5.8.2 Depositi di barra

I depositi di barra riscontrati nel periodo 2005 – 2015 derivano dall'analisi geomorfologica descritta nel precedente par. 4.5.2. L'andamento dei volumi dei depositi di barra è riportato nel grafico di Figura 81.

Nel complesso i depositi di barra ammontano a circa 26 milioni di metri cubi nel periodo 2005-2015.

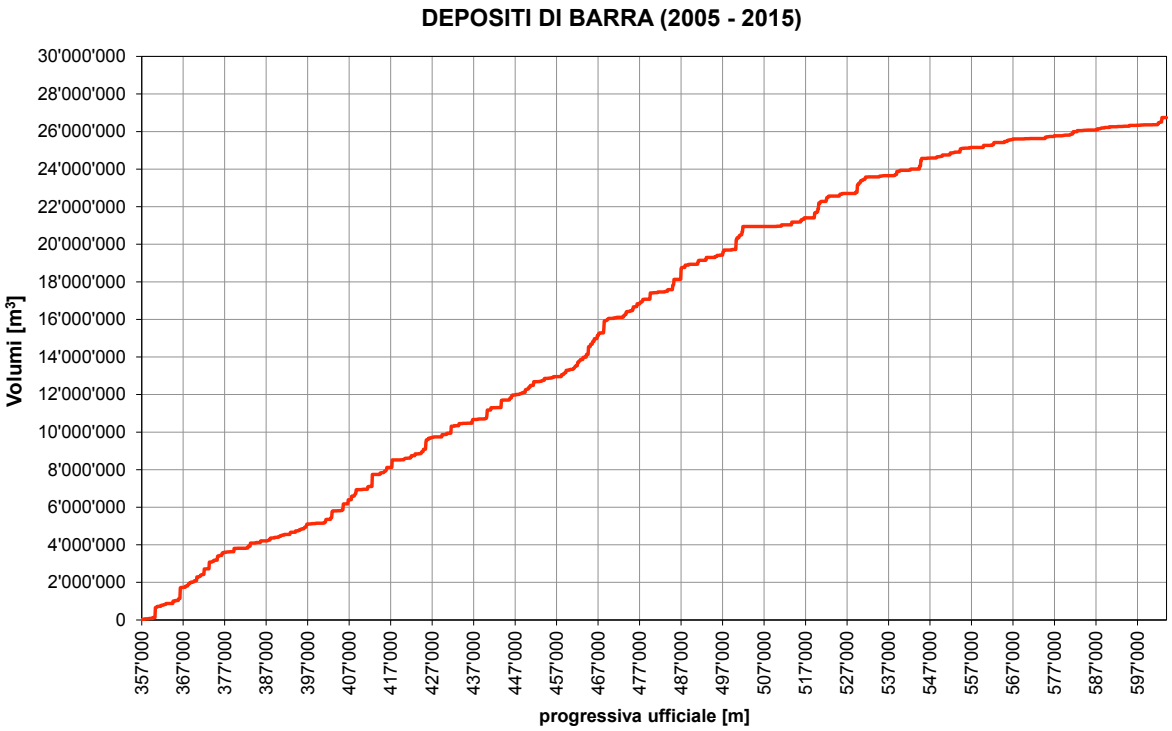


Figura 81 – Andamento dei volumi cumulati dei depositi di barra.

4.5.8.3 Erosioni di sponda

Le erosioni di sponda riscontrate nel periodo 2005 – 2015 derivano dall'analisi geomorfologica descritta nel precedente par. 4.5.2. L'andamento dei volumi delle erosioni di barra è riportato nel grafico di Figura 82.

Nel complesso le erosioni di barra ammontano a circa 1,7 milioni di metri cubi nel periodo 2005-2015.

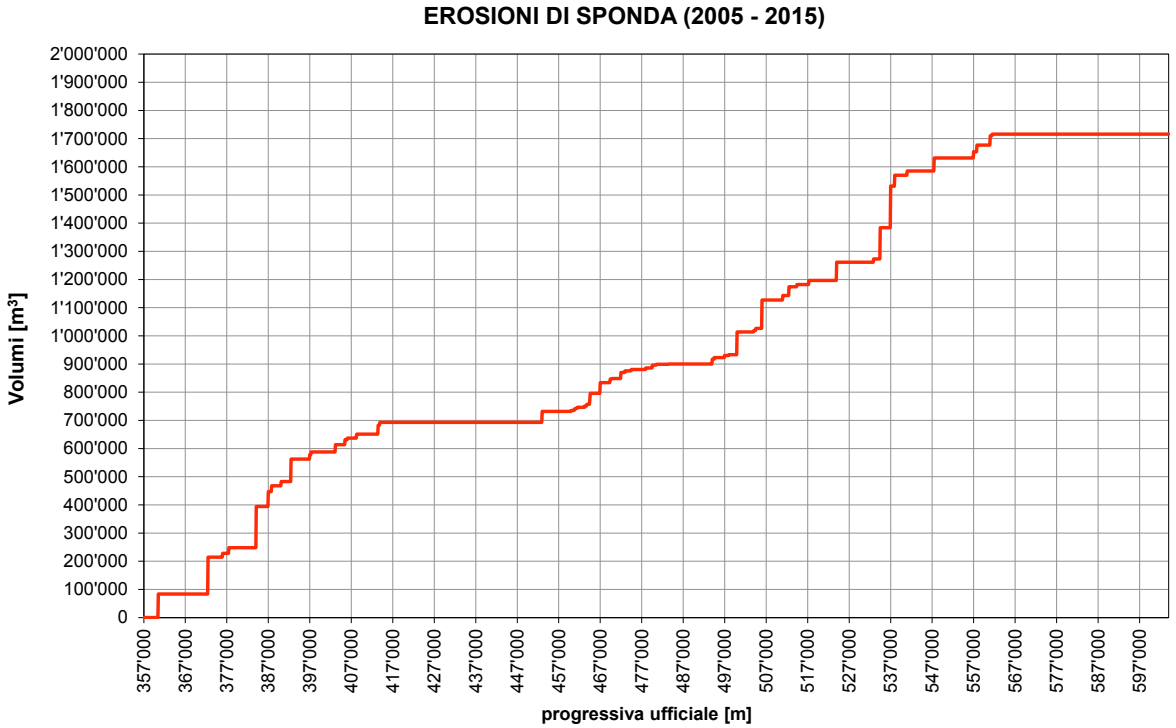


Figura 82 – Andamento dei volumi cumulati delle erosioni di sponda.

4.5.8.4 Depositi di sponda

I depositi di sponda riscontrati nel periodo 2005 – 2015 sono praticamente nulli (117'000 m3).

4.5.8.5 Erosioni di fondo alveo

Le erosioni di fondo alveo riscontrate nel periodo 2005 – 2015 derivano dall'analisi geomorfologica descritta nel precedente par. 4.5.4. L'andamento dei volumi delle erosioni di fondo alveo è riportato nel grafico di Figura 83.

Nel complesso le erosioni di fondo alveo, valutate solo tra Cremona (sez. 26) e San Giacomo Po (sez. 44) ammontano a circa 22 milioni di metri cubi nel periodo 2005-2015.

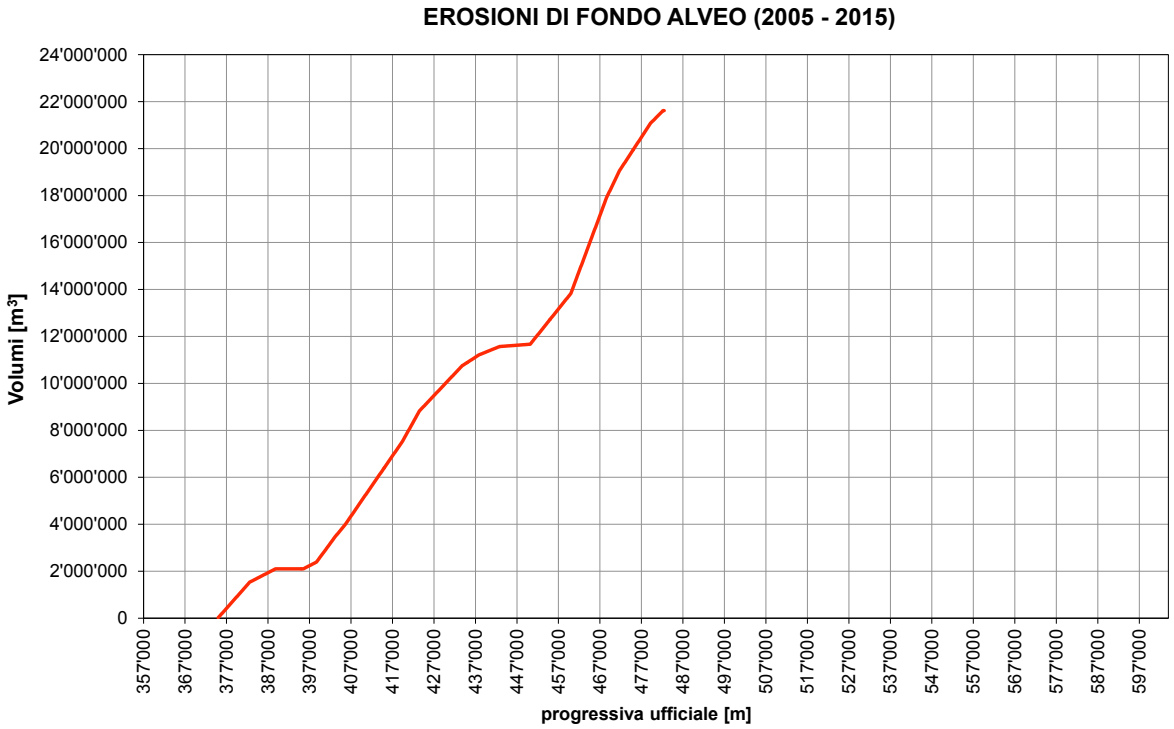


Figura 83 – Andamento dei volumi cumulati delle erosioni di fondo alveo.

4.5.8.6 Depositi di fondo alveo

I depositi di fondo alveo riscontrati nel periodo 2005 – 2015 derivano dall'analisi geomorfologica descritta nel precedente par. 4.5.4. Nel complesso i depositi di fondo alveo, valutati solo tra Cremona (sez. 26) e San Giacomo Po (sez. 44) ammontano a soli 173'000 metri cubi nel periodo 2005-2015.

4.5.8.7 Apporti dagli affluenti

L'ambito di studio risulta circoscritto all'asta principale del fiume Po da Isola Serafini fino al Po di Goro. E' escluso pertanto dallo studio sia tutto il bacino sotteso dagli affluenti ed il bacino sotteso dal fiume Po a monte di Isola Serafini, per il quale però si considera quanto determinato attraverso gli studi dell'Autorità di bacino del fiume Po a supporto del Programma Generale di Gestione dei Sedimenti, risultato pari a 4'072'924 Mm3/anno in media.

Per quanto riguarda gli affluenti Taro, Parma, Enza, Oglio, Secchia e Panaro del tratto qui di interesse, i valori di apporto sono stati ricavati dalle analisi condotte nel presente studio (cfr. par. 9.5.2.6), mentre per quanto riguarda Adda, Crostolo e Mincio, sono stati considerati gli apporti medi annui già utilizzati nell'ambito del PGGS (valori ricavati dallo Sottoprogetto SP4 "Compatibilità delle attività estrattive" dell'Autorità del Bacino del fiume Po - 1995)

Nel seguito è riportata la tabella con l'apporto medio annuo di ciascun affluente e il grafico con la curva cumulata riferita al periodo 2005 – 2015 (Figura 84).

CORSO D'ACQUA	PROG. PO	APPORTO ANNUO
	[mc]	[mc]
PO monte	357'000	4'072'924
ADDA	362'300	136'892
ARDA	388'500	3'012
TARO	407'500	376'000
PARMA	429'600	25'000
ENZA	437'200	256'000
CROSTOLO	447'300	11'232
OGLIO	463'500	64'000
MINCIO	494'500	26'891
SECCHIA	496'500	162'000
PANARO	545'700	141'000

Tabella 13 - Apporto solido medio annuo proveniente dagli affluenti e dal Po a monte del tratto di interesse

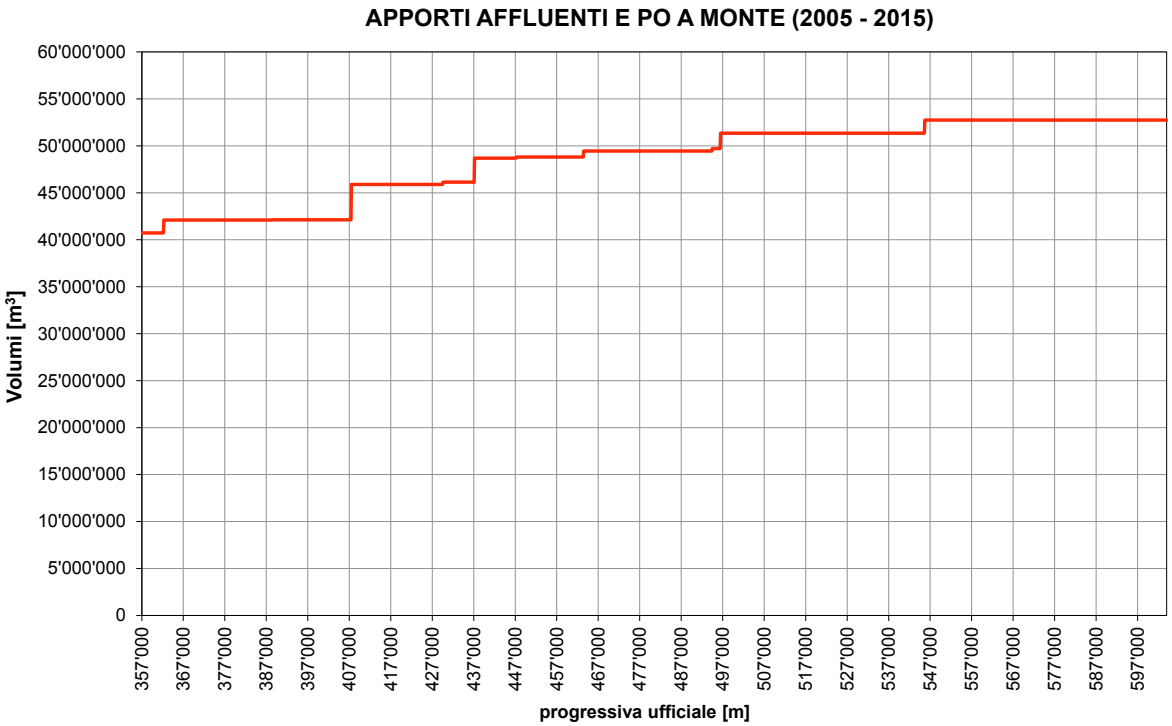


Figura 84 – Andamento dei volumi cumulati degli apporti degli affluenti e del Po a monte del tratto di interesse.

4.5.8.8 Apporto da sospensione

Negli studi a supporto del PGGS e nel presente studio sono state effettuate analisi granulometriche e litologiche su molteplici campioni prelevati lungo il corso del Po. I risultati di tali analisi e delle osservazioni di campagna hanno evidenziato che i depositi delle forme di fondo presenti lungo il Po sono costituiti anche da materiali fini che verosimilmente, specialmente nelle fasi parossistiche di un evento di piena, vengono immessi nel sistema e trasportati in sospensione per poi essere "abbandonati" insieme al trasporto di fondo durante le fasi "discendenti" delle piene stesse.

La presente ipotesi trova conferma nella letteratura specifica (v. ad es.: CATI L. (1981) – "Idrografia e Idrologia del bacino del Po". Pubbl. n. 19 dell'Ufficio Idrografico del Po), da cui risulta che il trasporto in sospensione del Po interessa le particelle più fini che, a causa dei moti turbolenti, possono essere

trasportate in sospensione senza contatto diretto con il fondo. I suddetti Autori hanno stimato il limite granulometrico al di sotto del quale si ha trasporto in sospensione, indicando un valore pari a 0,35 mm. Tale valore è ritenuto rappresentativo per tutta l'asta del Po, da Stura di Lanzo al mare. Considerato che sabbie di dimensioni minori di 0,35 mm sono generalmente presenti anche nei depositi di barra (talora in percentuale relativamente elevata), va da sé che parte del carico sospeso alimenti in parte le forme di fondo, specialmente durante la fase discendente di una piena.

I risultati delle analisi eseguite sui molteplici campioni prelevati hanno consentito di quantificare il limite dimensionale tra il materiale che subisce trasporto sul fondo (per fenomeni trattivi e per saltazione) e quello che subisce trasporto essenzialmente in sospensione. Il valore ottenuto dalle nuove analisi, valido lungo l'intera asta fluviale esaminata, risulta pari a 0,25 mm.

Sempre attraverso le analisi granulometriche condotte si è riscontrata la presenza di sedimenti di diametro inferiore a 0,25 mm nei depositi di barra (sabbie minori di 0,25 mm circa), nei canali (limi e limi sabbiosi) e come incremento volumetrico per innalzamento del piano campagna delle barre alte, in continuità morfologica con la golena (in generale limi e limi sabbiosi).

Sulla base di tali risultati, si rende necessaria la quantificazione del "termine di bilancio" relativo agli apporti al fondo dovuti alla sedimentazione di materiale che in determinate fasi della piena viene veicolato in sospensione.

Per quanto riguarda i depositi di barra, nella seguente figura è riportato l'andamento delle percentuali di materiale caratterizzato da dimensioni inferiori a 0,25 mm, da cui è possibile ricavare, moltiplicando tale percentuale per i volumi depositatisi nel periodo di riferimento, l'apporto solido da carico sospeso.

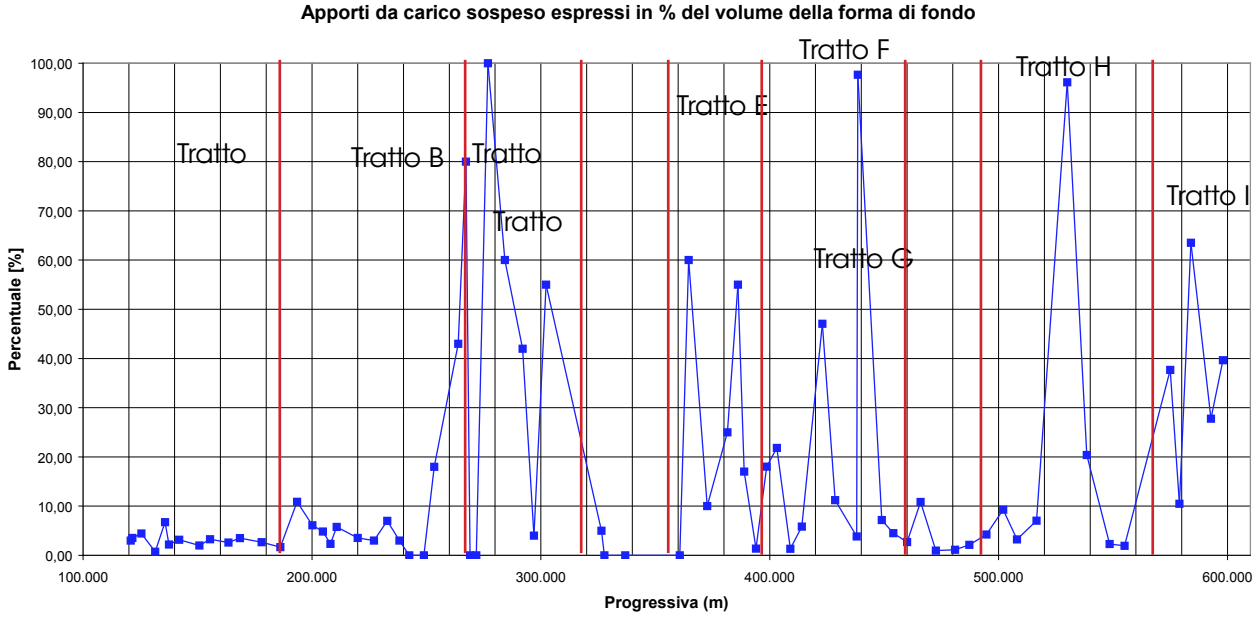


Figura 85 – Variazione degli apporti solidi da carico sospeso lungo la progressiva, espressi come frazione percentuale del volume della forma di fondo (fonte: AdBPo)

Con riferimento, invece, ai depositi verificatisi al di sopra di barre già esistenti prima del 1982, è verosimile, data la notevole altezza di tali forme rispetto al livello idrico ordinario, che la sedimentazione in queste zone (di fatto in continuità morfologica con la golena), avvenga attraverso il deposito di materiali "fini", nel campo delle sabbie molto fini e dei limi; pertanto in questo caso si è assunto che l'apporto solido da carico sospeso sia pari all'intero volume depositatosi nel periodo di riferimento.

Nella Figura 85 è riportata la curva cumulata riferita agli apporti solidi da carico sospeso nel periodo 2005 – 2015.

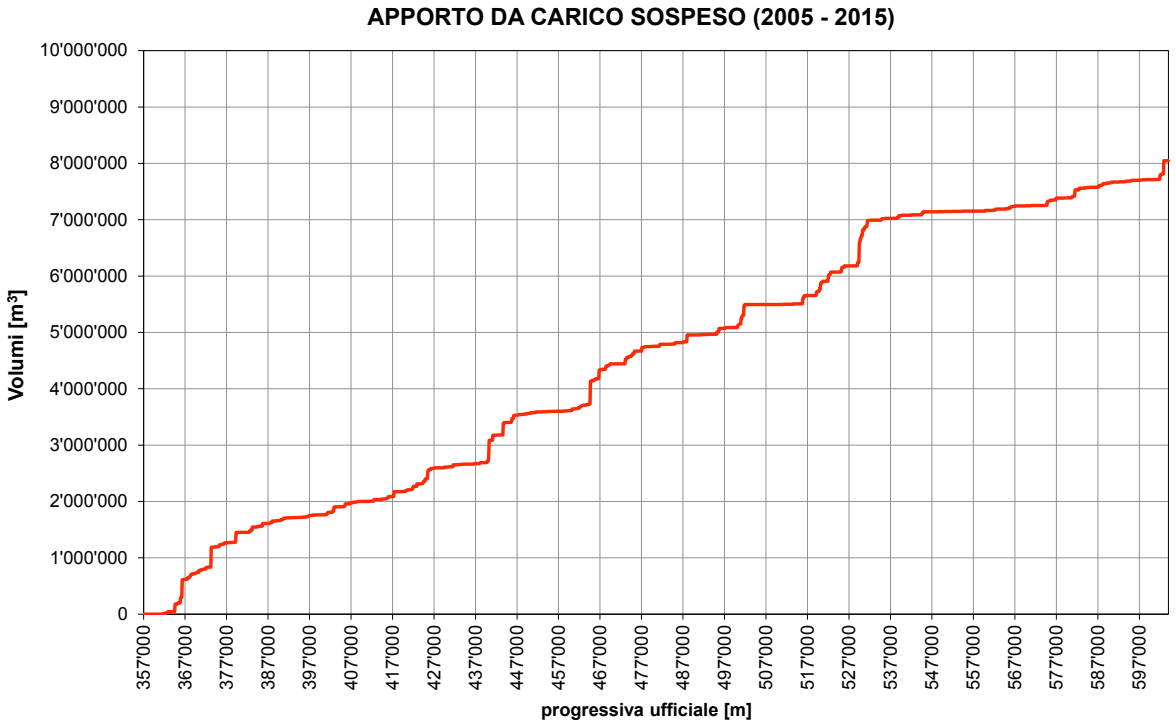


Figura 86 – Andamento dei volumi cumulati degli apporti provenienti dalla sedimentazione di materiale in sospensione.

4.5.8.9 Calcolo del bilancio del trasporto solido

In base a quanto descritto in precedenza, il bilancio del trasporto solido deriva dall'aggregazione lungo la progressiva, secondo lo schema sotto riportato (all'interno delle frecce sono riportati i segni con i quali vengono considerate le diverse componenti rispetto alla determinazione della portata solida che prosegue verso valle), delle informazioni derivanti dagli studi geomorfologici, idraulici e tenendo conto degli apporti esterni.

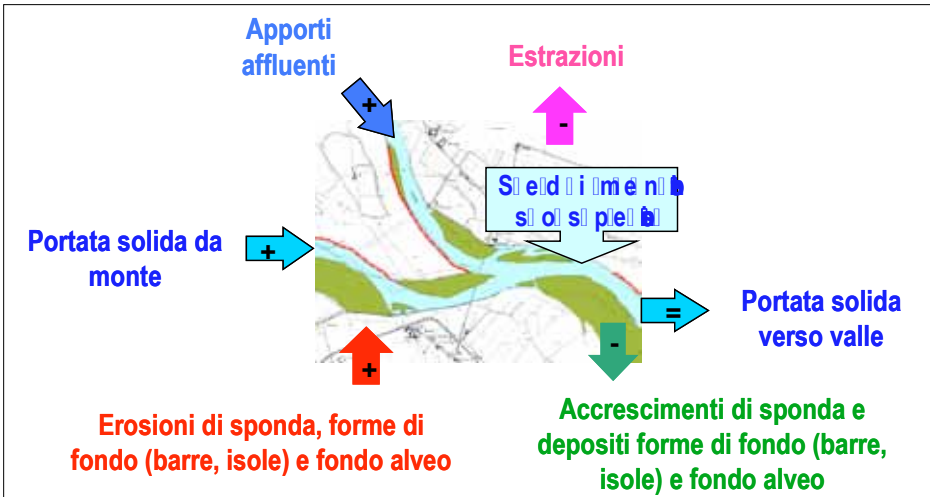


Figura 87 – Schema modello di analisi del bilancio del trasporto solido.

La somma algebrica lungo la progressiva di ogni singola voce determina la portata di trasporto solido (in termini di metri cubi nell'anno medio del periodo di analisi considerato) che è transitata in un dato punto (l'intervallo spaziale di riferimento lungo l'asse fluviale è pari a 100 m).

Il bilancio del trasporto solido è stato condotto con riferimento all'intervallo temporale 2005 – 2015. Siccome le analisi delle dinamiche evolutive del fondo alveo sono state effettuate, in relazione ai dati disponibili, solo nel tratto compreso tra Cremona (sezione 26, progressiva km 375) e San Giacomo Po (sezione 44, progressiva km 482), la curva di bilancio del trasporto solido al fondo medio annuo è stata calcolata solo fino alla progressiva km 482 (Figura 88).

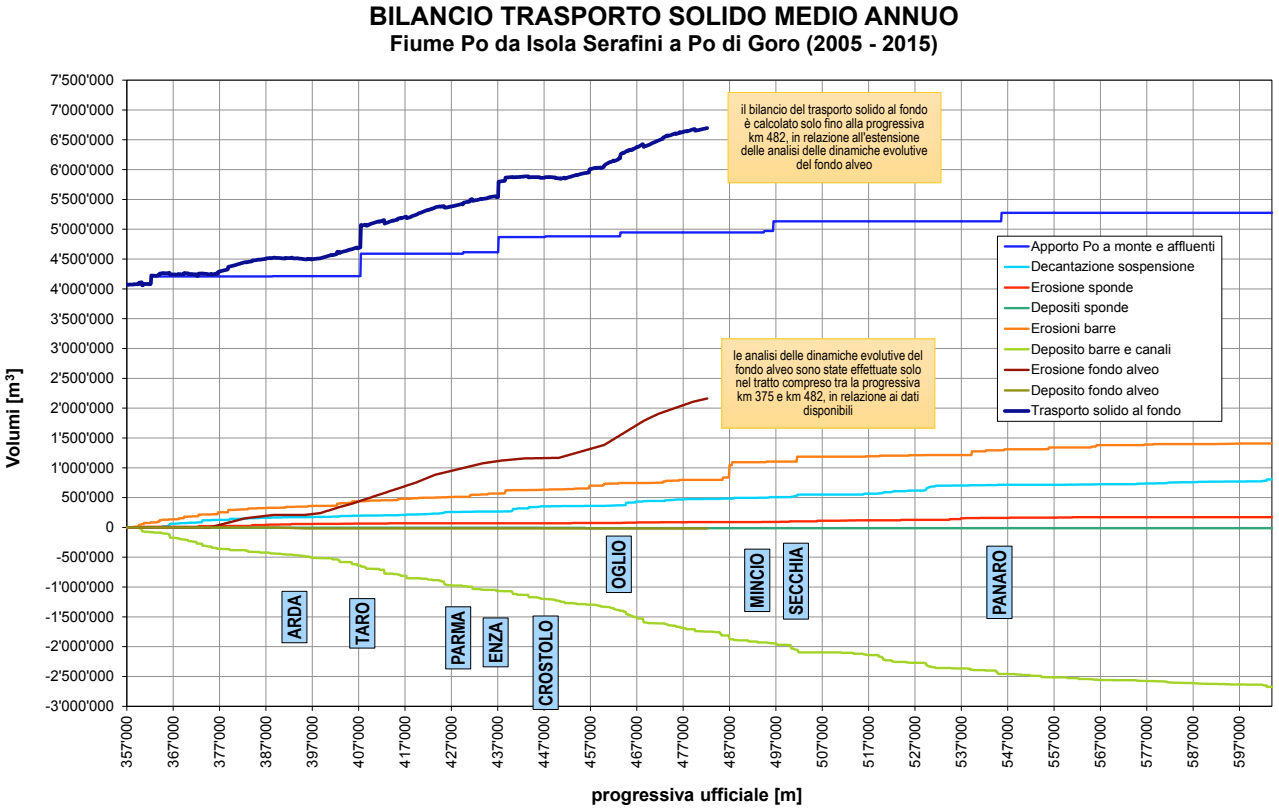


Figura 88 – Diagramma del bilancio del trasporto solido al fondo medio annuo (2005-2015).

Considerando il bilancio complessivo e procedendo da monte verso valle, emergono le seguenti considerazioni:

- il tratto compreso tra Isola Serafini e foce Taro, caratterizzato da un alveo monocursale sinuoso, presenta un incremento lungo la progressiva della portata solida al fondo, mediamente pari a circa 12'500 m3/km anno (nel periodo 1982 – 2005 tale valore era superiore e pari a 22'000 m3/km anno); presenta inoltre una scarsa naturalità geomorfologica, esplicatesi in una forte "staticità" dei depositi, prevalentemente a tergo dei pennelli di navigazione. All'interno del tratto si ha che le erosioni, in atto soprattutto sul fondo alveo, sono superiori ai depositi, presenti soprattutto a tergo dei pennelli di navigazione. Il processo di erosione a carico del fondo alveo è legato alla presenza della centrale idroelettrica di Isola Serafini (apporto ridotto di materiale solido da monte) e alle opere di navigazione (canalizzazione dell'alveo inciso). Tale dinamica è incompatibile in quanto la continua evoluzione dell'erosione in atto sul fondo alveo, non solo rende parzialmente inutilizzabili alcune opere (es. conca di navigazione per l'accesso al porto di Cremona), ma può indurre situazioni di rischio di instabilità per gli argini maestri e i manufatti di attraversamento;
- il tratto compreso tra foce Taro e Borgoforte (a valle foce Oglio), è caratterizzato da un alveo monocursale, da sinuoso a localmente meandriforme, che presenta una scarsa naturalità geomorfologica, esplicatesi in una forte "staticità" dei depositi, prevalentemente a tergo dei pennelli di navigazione. Il valore della portata solida al fondo presenta un incremento lungo la progressiva, mediamente pari a circa 27'500 m3/km anno (nel periodo 1982 – 2005 tale tratto era caratterizzato da una costante diminuzione, mediamente pari a circa -11'000 m3/km anno). Tale circostanza è legata al fatto che le erosioni in atto, soprattutto nel fondo alveo, unitamente a quelle delle forme di fondo e agli apporti esterni, sono superiori ai depositi di barra, che si verificano soprattutto a tergo dei pennelli di navigazione. La sensibile riduzione del tasso di sedimentazione nel periodo 2005-2015 rispetto al periodo 1982-2005 è da attribuire, come già emerso dagli studi effettuati nell'ambito del PGGS, al progressivo raggiungimento della capacità di "invaso" a tergo dei pennelli di navigazione. Si consideri che la capacità residua stimata nel 2002-2005 era dell'ordine del 10% - 20%. È del tutto plausibile che la stessa tenda a ridursi esponenzialmente nel tempo, fino ad annullarsi.

5 IL FIUME PO IN RAPPORTO AI REQUISITI DI SICUREZZA IDRAULICA. MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE IN PRESENZA DELLA PIENA DI RIFERIMENTO PAI T = 200 ANNI.

La conoscenza dei processi idromorfologici associati al deflusso delle piene e la gestione delle condizioni di rischio conseguenti all'antropizzazione dei territori perifluviali e all'utilizzo delle risorse fluviali costituiscono finalità principali della Direttiva comunitaria 2007/60/CE.

I quadri conoscitivi e le misure per la mitigazione del rischio di alluvione contenuti negli strumenti di pianificazione di bacino di cui alla legge 183/89, e in particolare, per il bacino del fiume Po, nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) approvato nel 2001, costituiscono un importante e fondamentale punto di riferimento per l'attuazione della Direttiva comunitaria.

Le fasce fluviali del PAI e le Norme di Attuazione a esse associate definiscono infatti l'assetto di progetto da conseguire lungo i corsi d'acqua, individuando in particolare il livello di sicurezza da garantire, le necessità di intervento per la protezione passiva dei centri abitati, gli obiettivi di espansione e laminazione delle piene all'interno delle fasce fluviali, le regole di prevenzione finalizzate a promuovere una pianificazione adeguata del territorio e buone pratiche nel settore agricolo e forestale.

L'asta medio inferiore del fiume Po, oggetto dello studio, è caratterizzata dalla presenza di rilevati arginali continui (circa 860 km di argini sull'asta principale e circa 154 km lungo i rami del delta) realizzati a difesa di circa 7'000 km^2 di pianura (fascia C). Tali arginature realizzate con rilevati in terra sono il risultato di un plurisecolare intervento dell'uomo che a partire dal 1400 ha iniziato a rafforzare, consolidare completare tale sistema difensivo fino ad arrivare all'attuale assetto dove, nel tratto inferiore, le arginature medesime possono essere paragonate a vere e proprie dighe in terra pensili sul piano campagna. I due recenti eventi di piena del 1994 e del 2000, seppur contenuti all'interno delle arginature, hanno sollecitato in modo eccezionale i rilevati arginali evidenziando la necessità di una diversa e più articolata strategia difensiva in luogo del semplice contenimento passivo delle piene.

Nel tratto di fiume Po compreso tra Adda e Mincio l'alveo di piena, compreso tra arginature continue, è molto ampio (distanza media tra le arginature pari a 2'600 m), caratterizzato dalla presenza diffusa di ampie golene, sia aperte che chiuse da argini secondari. Le golene chiuse costituiscono un sistema tipico del Po e forniscono rilevanti volumi invasabili in piena, con importanti effetti di laminazione. Diventa rilevante per estensione la presenza delle arginature in froldo, che rappresentano punti di criticità del sistema di ritenuta, in rapporto alle sollecitazioni idrodinamiche in piena.

Nel successivo tratto tra il Mincio e il Delta, l'alveo di piena riduce progressivamente verso valle la larghezza, con argini prossimi e paralleli alle sponde, in alcuni punti con distanza molto ridotta (soprattutto in corrispondenza di Revere, Ficarolo, Pontelagoscuro, Polesella). Sono ancora presenti alcune golene chiuse, di dimensioni relativamente modeste, che si estendono fino in prossimità dell'alveo inciso. Il tracciato degli argini mostra bruschi cambiamenti di direzione e restringimenti locali accentuati, con corrispondenti velocità di deflusso in piena molto elevate, che rappresentano punti critici per la stabilità degli argini stessi.

Per quanto riguarda i valori delle portate di piena da assumere come riferimento per le analisi idrauliche occorre fare riferimento ai valori desumibili dal PAI (Piano Assetto Idrogeologico). Di seguito si riporta uno stralcio della tabella contenuta nella Direttiva n. 2 del PAI "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica", dalla quale si evince che la portata di piena di riferimento per il tratto in oggetto è compresa tra 14'300 e 13'000 m^3/s. Si può notare come le portate al colmo rimangano sostanzialmente invariate o si riducano procedendo da monte verso valle, grazie all'effetto di laminazione delle aree golenali.

Sezione		Superficie	Q20	Q100	Q200	Q500
Progr.(km)	Denominazione	(km^2)	(m^3/s)	(m^3/s)	(m^3/s)	(m^3/s)
367,640	Cremona	50726	10090	13000	14300	15870
428,545	Boretto	55183	9380	12060	13700	14720
457,560	Borgoforte	62450	9600	12260	13100	14890
548,805	Pontelagoscuro	70091	9470	12070	13000	14650

Tabella 14 - Portate di piena per assegnato tempo di ritorno lungo l'asta del Po (da Direttiva "Piena di progetto" allegata al PAI, tabb. 2 e 3)

Il profilo di piena adottato dal PAI, come piena di progetto per l'asta del Po, deriva dalla simulazione idraulica mediante un modello numerico monodimensionale a fondo fisso applicato ad una piena teorica, ottenuta dalla combinazione dell'evento del 1994 a cui sono aggiunti gli apporti dei principali affluenti che si sono verificati nel 1951 (massima onda piemontese + massima onda nel tratto medio-basso). I risultati della simulazione hanno permesso di constatare che le portate al colmo risultanti dal modello nelle stazioni di misura principali lungo l'asta hanno valori molto prossimi a quelli derivanti dalle elaborazioni statistiche sulle serie storiche per il tempo di ritorno di 200 anni (in quel che segue tale piena di riferimento viene denominata piena PAI T200). Il profilo risulta quindi adeguato al criterio generale posto dal PAI che fissa tale tempo di ritorno come piena di progetto per i corsi d'acqua del bacino, intesa come l'evento idrologico più gravoso per il quale le opere strutturali di controllo dei fenomeni di dinamica fluviale devono garantire condizioni di sicurezza.

Successivamente al PAI sono stati svolti altri approfondimenti circa i profili di piena per le condizioni di progetto, sempre tramite l'applicazione di strumenti numerici di simulazione, che tengono conto sia di aggiornamenti della geometria dell'alveo, resisi disponibili successivamente all'approvazione del PAI, sia di miglioramenti nelle modalità di simulazione e di taratura del modello, soprattutto alla luce dell'evento dell'ottobre 2000. Tra i diversi studi si richiama il "Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta principale del fiume Po" condotto dal DISTART dell'Università di Bologna (2008).

Secondo quanto contenuto nel PAI, gli elementi che determinano le condizioni di squilibrio lungo l'asta del Po rispetto ai fenomeni di piena sono costituiti, trattandosi di un sistema fluviale a carattere prettamente artificiale, dalle condizioni di non sufficiente adeguatezza dei dispositivi difensivi presenti rispetto alle condizioni di sicurezza che si intende conseguire.

In relazione alle condizioni di deflusso della piena di progetto PAI T200 le condizioni di squilibrio che si manifestano fanno riferimento ai seguenti fenomeni:

a. inadeguatezza in quota delle arginature rispetto al profilo di piena, con conseguente rischio di rotta per tracimazione del rilevato arginale;

b. inadeguatezza strutturale del rilevato arginale rispetto ai fenomeni di filtrazione nel corpo arginale e nelle fondazioni, con conseguente rischio di rotta per sifonamento;

c. possibilità di cedimento del rilevato arginale per effetto di fenomeni di dinamica fluviale connessi a modificazione della morfologia dell'alveo da parte della corrente in piena (erosione della sponda al piede del rilevato arginale, erosione diretta del rilevato arginale, sollecitazione diretta della corrente sul rilevato).

In seguito alla piena straordinaria del 2000, sono state aggiornate le conoscenze lungo l'asta fluviale (catasto delle arginature, aggiornamento dei profili di piena, verifica dei franchi idraulici, censimento dei fenomeni di filtrazione, ecc.) e sono stati condotti approfondimenti in relazione al rischio residuale conseguente a fenomeni di tracimazione e rottura arginale (*Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta medio-inferiore del fiume Po – Comitato tecnico dell'Autorità di bacino del 28 settembre 2005*).

Di seguito si riportano alcuni stralci cartografici dell'"Aggiornamento catasto arginature maestre del fiume Po" dell'Autorità di bacino del fiume Po, in cui sono riportate le sintesi delle criticità per

sormonto, sfiancamento e sifonamento, in prossimità delle zone in cui sono previste le cinque opere di regimazione del fiume Po.

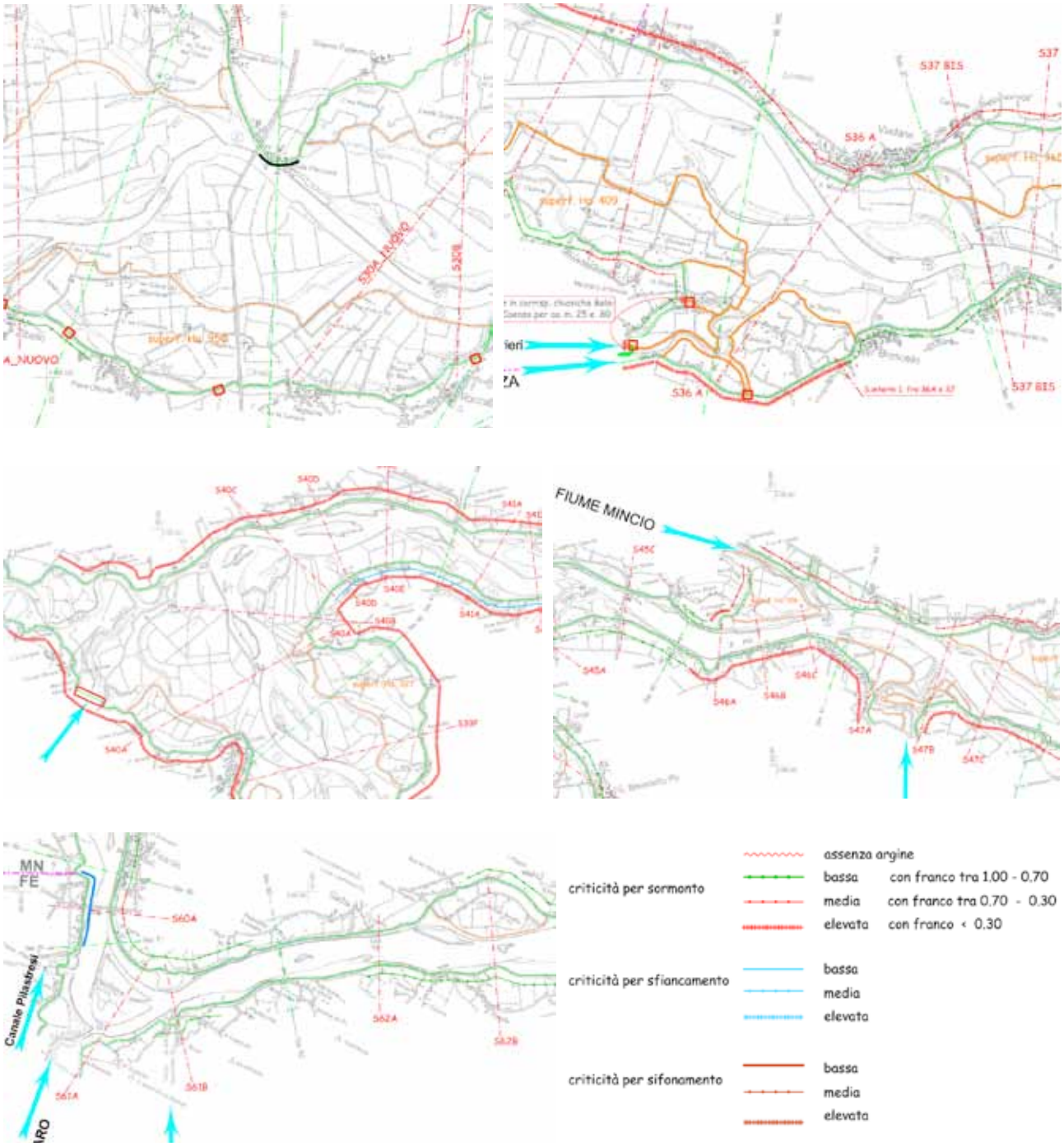


Figura 89 – Estratti cartografici dell'"Aggiornamento catasto arginature maestre del fiume Po"

Tale catasto è poi stato aggiornato nel 2007 mediante lo studio dell'Autorità di bacino del fiume Po denominato "Rappresentazione delle condizioni di rischio residuale lungo l'asta del fiume Po da Torino al mare: sintesi delle conoscenze e report descrittivi". Ad esempio, in relazione alla criticità associata al sormonto degli argini rispetto alla piena di riferimento, tale studio ha messo in evidenza che:

- *Argine di Cremona*: il tratto a valle del ponte ferroviario fino al ponte autostradale A21 sulla sponda sinistra presenta una criticità al sormonto medio elevata con franchi dell'ordine o inferiori di 50 cm rispetto alla piena PAI e SIMPO.

- *Argine Stagno Lombardo - San Daniele Po*: da valle di Stagno Lombardo a San Daniele Po l'opera arginale in sinistra ha un franco variabile di 30 - 50 cm rispetto alla piena PAI.
- *Argine Castelvetro-Soarza*: in sponda destra da Castelvetro a Soarza si mantiene un franco tra i 70 cm ed il metro rispetto alla piena PAI.
- *Argine Motta Baluffi-Casalmaggiore*: l'argine delimita le aree golenali in sinistra idrografica; presenta in alcuni tratti franchi di 30 - 50 cm a tratti inadeguati al contenimento dei livelli da Gussola a monte di Casalmaggiore rispetto alla piena PAI.
- *Argine Gramignazzo-Mezzano Rondani*: opera in destra idrografica da confluenza Taro a confluenza Parma; il primo tratto fino a Coltaro presenta un franco dell'ordine di 30 cm mentre il tratto di valle fino a Sacca ha un franco nullo o inadeguato a contenere i livelli idrici della piena PAI.
- *Argine Casalmaggiore-Viadana*: l'argine in sponda sinistra a valle di Casalmaggiore fino a Cicognara ha franchi rispetto alla piena PAI da nulli a valori di 40 cm per aumentare a 60 - 80 cm fino a Viadana.
- *Argine monte Brescello*: da confluenza Enza a Brescello l'opera in sponda destra presenta franchi da nulli a 50 cm rispetto alla piena PAI.
- *Argine Viadana-Cizzolo*: l'argine in sinistra da Viadana a Dosolo ha un franco variabile da 30 a 60 cm; da Villastrada a Cizzolo è inadeguato a contenere i livelli idrici della piena PAI Tr 200 anni.
- *Argine Boretto-Mirasole*: l'opera in destra idrografica presenta nel tratto Boretto-Luzzara un franco da 20 a 80 cm; da Luzzara a Mirasole (confluenza Mincio) la criticità al sormonto risulta elevata con argine inadeguato al contenimento della piena PAI.
- *Argine Scorzarolo – Correggio Micheli*: in sponda sinistra da confluenza Oglio fino all'abitato di San Giacomo Po le quote arginali sono inadeguate al contenimento dei livelli idrici PAI, SIMPO e 2000 con lunghi tratti di sormonto e di franco nullo; da San Giacomo Po a confluenza Mincio il franco è dell'ordine di 60 - 90 cm.
- *Argine Governolo - Corregioli*: in sponda sinistra da confluenza Mincio a Torriana il franco rispetto alla piena PAI varia da 20 a 80 cm; da Torriana a Corregioli presenta franco inferiore a 30 cm con tratti di sormonto.
- *Argine Quingentole-Revere*: l'opera in sponda destra ha lunghi tratti inadeguati a contenere i livelli idrici della piena PAI e tratti a franco inferiore a 30 cm.
- *Argine Melara-Occhiobello*: l'argine in sinistra presenta una criticità al sormonto media con valori di franco variabili da 30 a 90 cm rispetto alla piena PAI a SIMPO.
- *Argine Carbonara Po – Sermide*: in sponda destra l'argine ha un franco variabile da 70 cm al metro rispetto alla piena PAI.

Nei riguardi degli interventi di regimazione idraulica mediante la realizzazione dei nuovi 5 sostegni si ricorda che essi sono destinati ad operare solo nel corso di regimi idraulici ben lontani dalle condizioni di piena. Infatti, le opere previste attuano la regolazione dei livelli idrici nel campo dei valori di magra-morbida, limitato, come più oltre esposto (v. par. 9.7.1.1), al valore superiore di 1'200 m^3/s (nello studio AIPo 2009 tale limite superiore era fissato in 2'000 – 2'500 m^3/s); per portate superiori le paratoie mobili degli sbarramenti vengono alzate completamente in modo da non interferire con il regime idraulico.

Le uniche opere fisse che interferiscono con il deflusso delle piene sono rappresentate dalle pile di sostegno degli organi mobili, dalla soglia fissa, peraltro posta prevista in prossimità dell'attuale fondo alveo, dalla centrale, dalla conca di navigazione e dal dispositivo di risalita delle specie ittiche.

Come enunciato negli studi sopra citati, tali opere fisse devono essere concepite in modo tale da non indurre variazioni del livello idrico delle piene, e ciò con particolare attenzione alla piena di riferimento del PAI T200 (tempo di ritorno pari a 200 anni, portate dell'ordine di 13'000 – 14'000 m3/s), così da non incrementare il livello di rischio di esondazione per le aree esterne agli argini maestri.

In tal modo la fascia B del PAI non deve subire nessuna modifica nella sua delimitazione esterna e nella corrispondente entità dei livelli di piena.

Peraltro, la modifica del campo di moto del filone principale locale della corrente in piena eventualmente indotta dalla presenza delle medesime parti fisse potrebbe modificare, sia pur limitata-mente ad effetti localizzati, la delimitazione della fascia A di deflusso principale della piena.

Come esposto nel seguito, si è pertanto proceduto alla verifica del comportamento delle opere in concomitanza della piena di riferimento PAI T200, facendo uso dei più approfonditi strumenti modellistici e sulla base delle configurazioni strutturali delle opere prima descritte.

Si è trattato di una verifica che ha richiesto di mettere in atto una complessa procedura composta da successive tappe di calcolo modellistico; in particolare:

implementazione di una modellistica bidimensionale a fondo fisso atta a riprodurre l'idrodinamica del Po in condizioni di piena, per l'intero tratto di interesse da Cremona al Po di Goro, nel suo stato attuale;

calibrazione dei parametri principali del suddetto modello con procedimento iterativo di confronto tra i livelli idrometrici sperimentali riscontrati nella piena del 2000 e i corrispondenti livelli ricostruiti con il modello;

utilizzazione del modello così tarato per la ricostruzione dei livelli idrometrici riferiti alla piena di riferimento PAI T200; conseguenti confronti con gli analoghi livelli ottenuti dai già citati precedenti studi dell'Autorità di bacino del Po e conseguenti valutazioni e considerazioni sui franchi arginali.

5.1 MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO DEL PO DA CREMONA AL PO DI GORO

Il modello bidimensionale a fondo fisso del Po nel tratto di interesse da Cremona al Po di Goro è stato implementato mediante il programma di calcolo INFOWORKS 2D ICM di Innovyze, che permette di analizzare il campo di moto a partire da un DTM (Digital Terrain Model), rappresentativo della geometria del dominio di calcolo, basandosi sulla risoluzione di tre equazioni non lineari alle differenze finite per la determinazione del campo di moto della corrente su di un piano bidimensionale (x, y). Due di queste sono le equazioni del moto nelle direzioni x e y; la terza equazione è data dalla legge di continuità che garantisce la conservazione della massa all'interno del dominio di calcolo.

Tenendo conto della rilevante lunghezza del tratto di Po di interesse (circa 225 km) è stato necessario suddividere il medesimo in 11 sotto-tratti ciascuno rappresentato da un rispettivo modello di calcolo. Così facendo ogni modello ha assunto una configurazione che, pur oltremodo pesante per l'elevato dettaglio della griglia di calcolo adottata più oltre descritta, ha consentito di ottenere tempi di calcolo abbastanza agevoli.

Trasversalmente all'asse dell'alveo, gli undici domini di calcolo si estendono fino agli argini maestri, quindi comprendendo sia l'alveo inciso propriamente detto sia tutti i territori golenali, nonché tutte le particolarità morfologiche locali oltre alle opere esistenti (argini golenali, ponti, pennelli, ecc.).

Il dominio di calcolo di ognuno degli undici sotto-modelli con i quali è stato suddiviso il tratto di interesse del Po è stato discretizzato con maglie di calcolo di superficie variabile, compresa tra un minimo 200 mq per le aree occupate dall'alveo principale di piena ed un massimo di 10'000 mq per le aree occupate dalle golene. In particolare, per l'alveo di piena la superficie delle celle di calcolo è compresa tra 200 mq e 2'000 mq, mentre per le aree golenali è stato utilizzato un valore di superficie compreso tra un minimo di 2'000 mq e un massimo di 10'000 mq e, comunque, nelle zone in cui la morfologia lo richiede il codice di calcolo costruisce celle di dimensioni più piccole rispetto alla soglia impostata per poi accorparle in aree di dimensioni pari alle minime dimensioni impostate. In alcuni casi specifici, quali le aree occupate da argini golenali di particolare interesse per la dinamica fluviale e le zone poste in prossimità delle opere di regolazione, il reticolo di calcolo utilizzato è ancor più dettagliato e caratterizzato da maglie di calcolo di superficie compresa tra 5 e 10 mq. Complessivamente ciascun modello bidimensionale implementato presenta un numero di elementi della maglia compreso tra circa 70'000-200'000 celle.

Gli undici tratti di fiume modellati sono indicati nella seguente Tabella 15.

Tratto	Descrizione		Progressiva (Km)		Sezione	
Nome	da	a	da	a	monte	valle
Tratto 1	Cremona	Zibello (PR)	374,748	394,616	S25B	S28A
Tratto 2	Zibello (PR)	Torricella (PR)	394,616	409,769	S28A	S33
Tratto 3	Torricella (PR)	Casalmaggiore (RE)	409,769	423,940	S33	S35
Tratto 4	Casalmaggiore (RE)	Boretto (RE)	423,940	440,405	S35	S37B
Tratto 5	Boretto (RE)	Dosolo (MN)	440,405	451,941	S37B	S39A
Tratto 6	Dosolo (MN)	Borgoforte (MN)	451,941	472,385	S39A	S42B
Tratto 7	Borgoforte (MN)	Correggio Micheli (MN)	472,385	492,104	S42B	S46
Tratto 8	Correggio Micheli (MN)	Ostiglia (MN)	492,104	510,294	S46	S53A
Tratto 9	Ostiglia (MN)	Gaiba (RO)	510,294	549,813	S53A	S62
Tratto 10	Gaiba (RO)	Pontelagoscuro (FE)	549,813	561,339	S62	S65A
Tratto 11	Pontelagoscuro (FE)	Goro (FE)	561,339	600,580	S65A	S73A

Tabella 15 – Suddivisione in sotto-tratti del tratto di fiume Po di interesse compreso tra Cremona ed il Po di Goro.

Nelle figure seguenti sono rappresentati i domini di calcolo generati per gli undici tratti di fiume indagati.



Figura 90 – Esempio di dettaglio delle dimensioni e delle distribuzioni delle celle di calcolo del modello bidimensionale

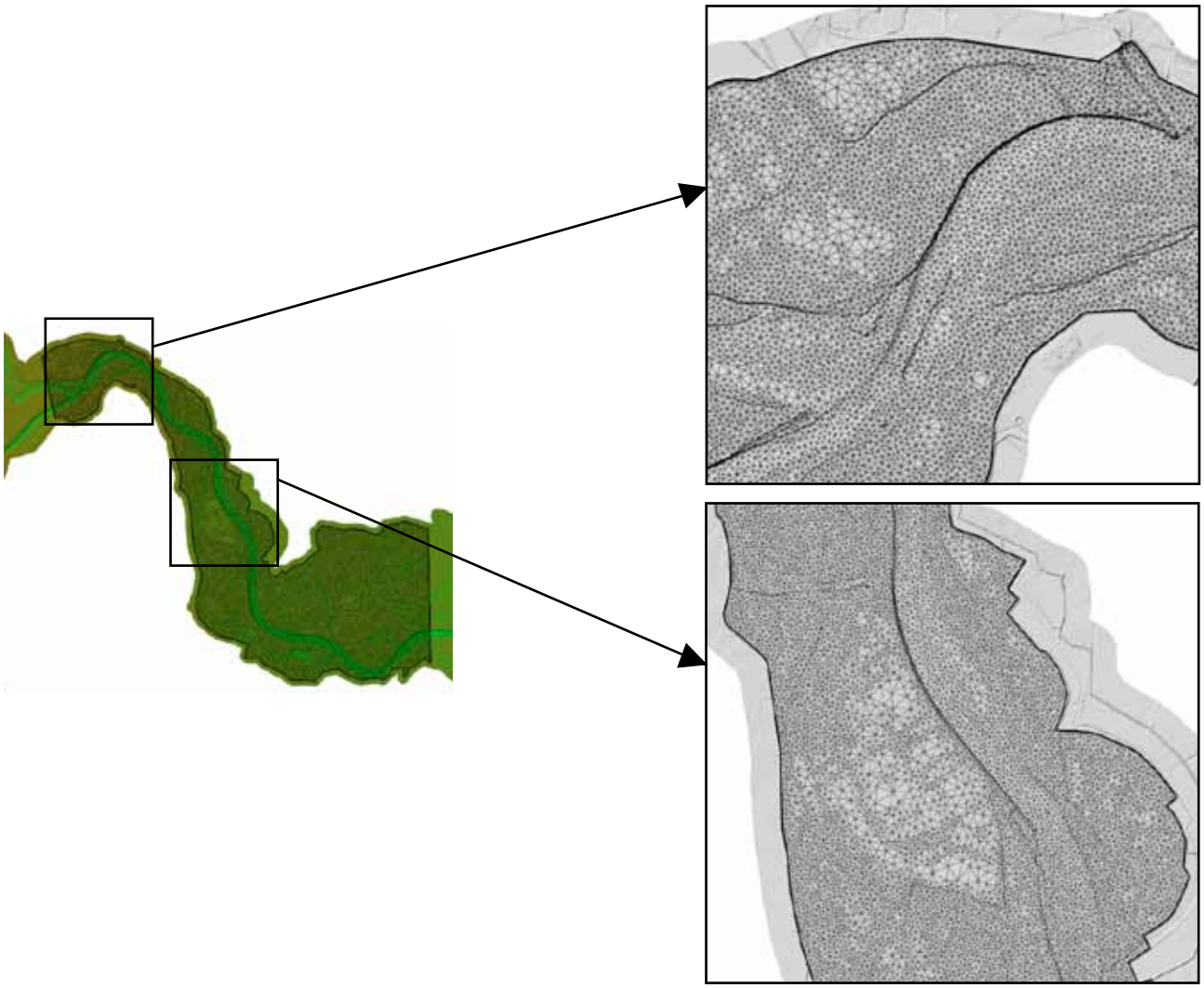


Figura 91 - Dominio di calcolo del tratto n. 1 da Cremona a Zibello (S25B – S28A)

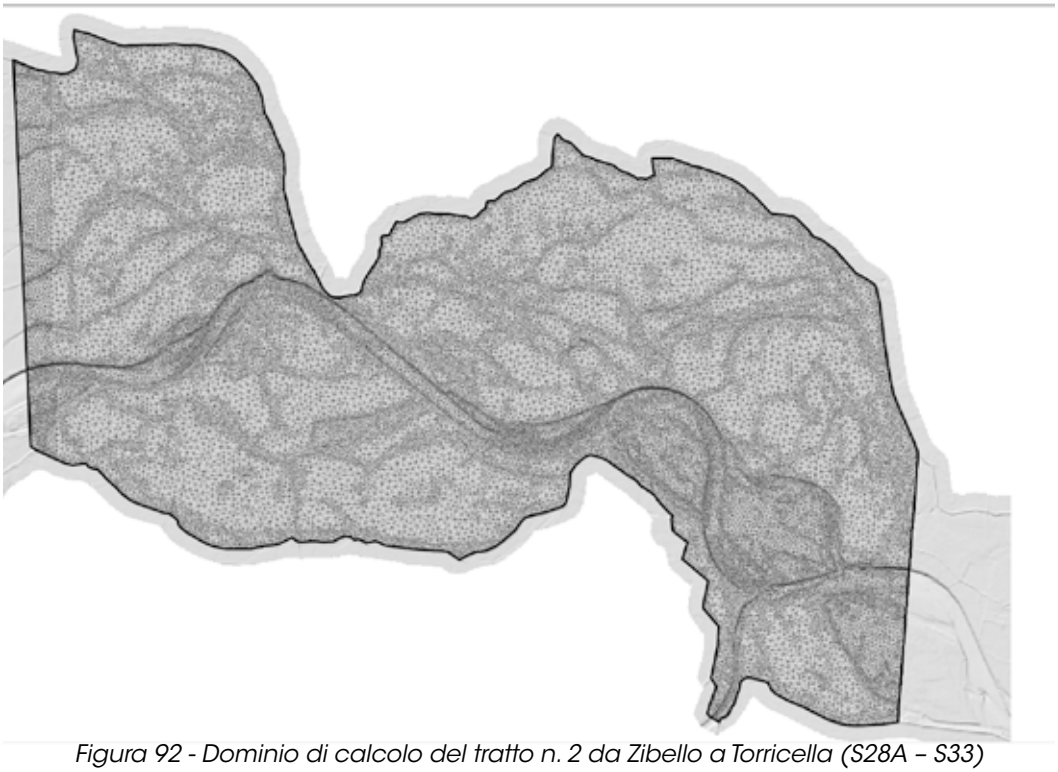


Figura 92 - Dominio di calcolo del tratto n. 2 da Zibello a Torricella (S28A – S33)

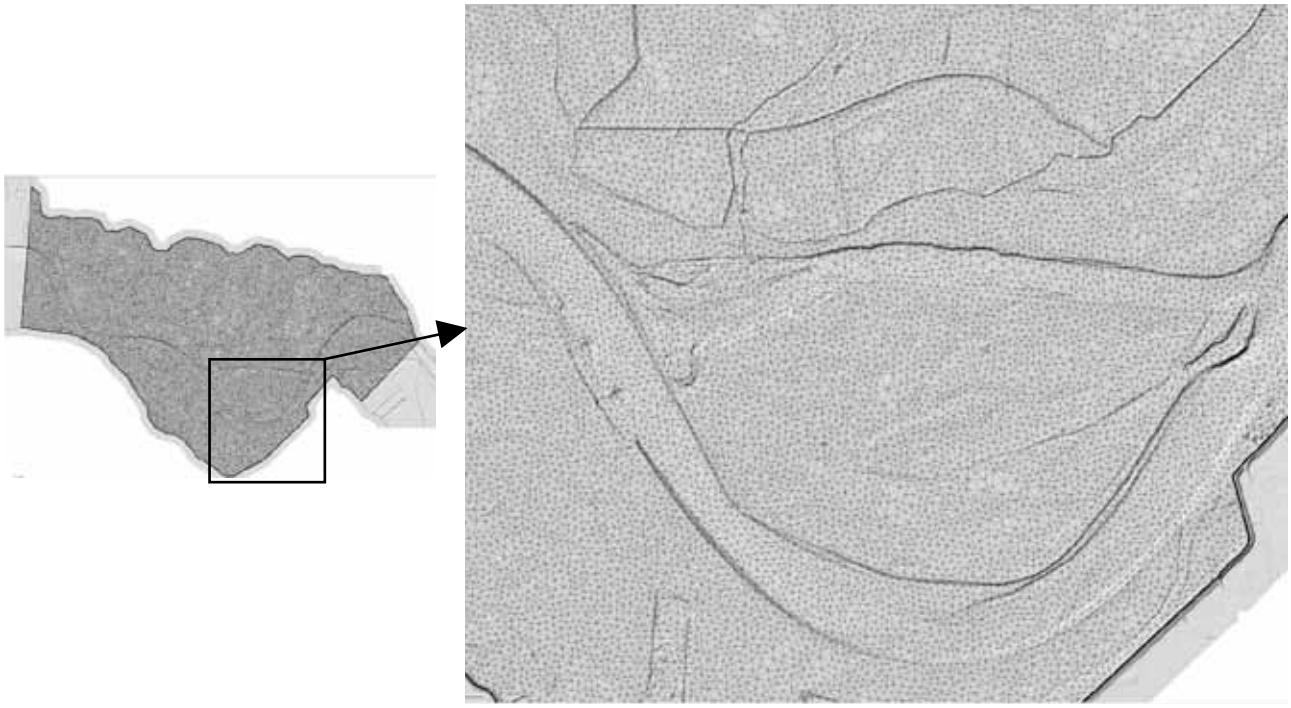


Figura 93 - Dominio di calcolo del tratto n. 3 da Torricella a Casalmaggiore (S33 – S35)

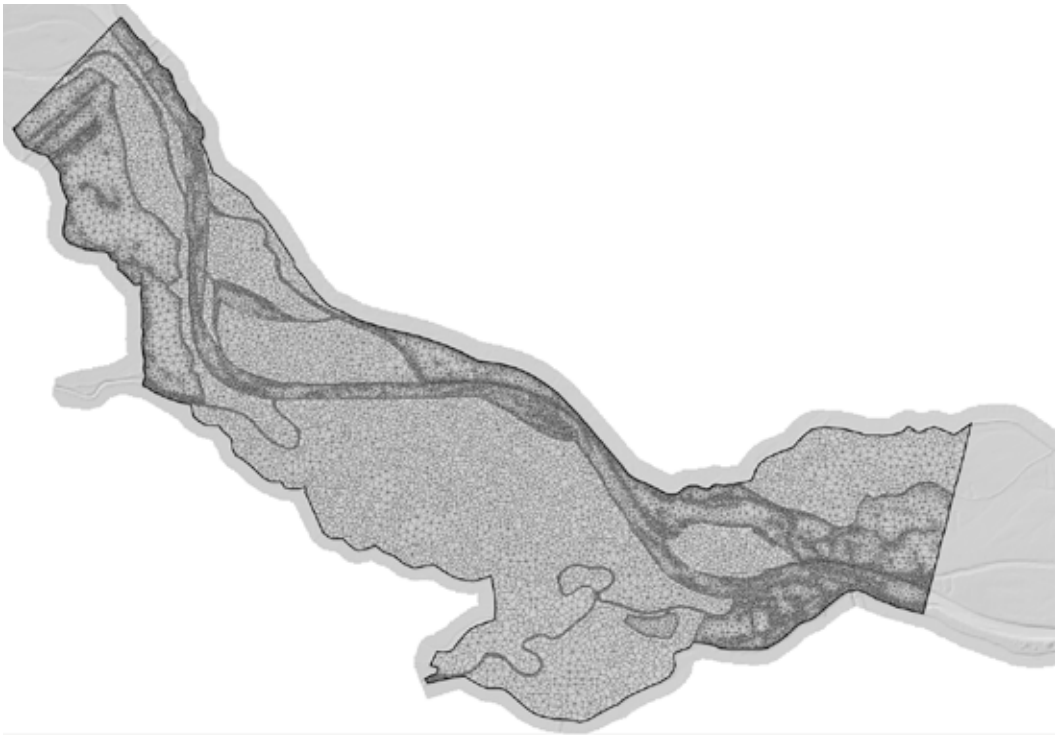


Figura 94 - Dominio di calcolo del tratto n. 4 da Casalmaggiore a Boretto (S35 – S37B)

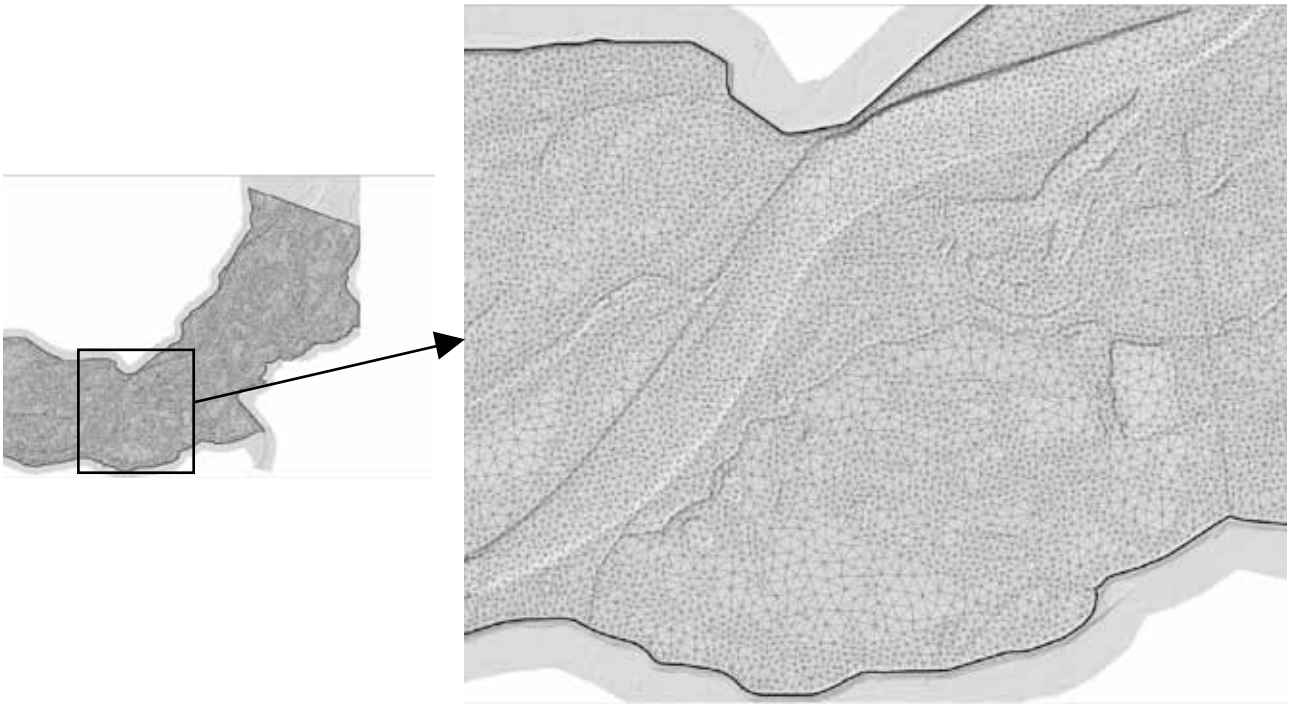


Figura 95 - Dominio di calcolo del tratto n. 5 da Boretto a Dosolo (S37B – S39A)

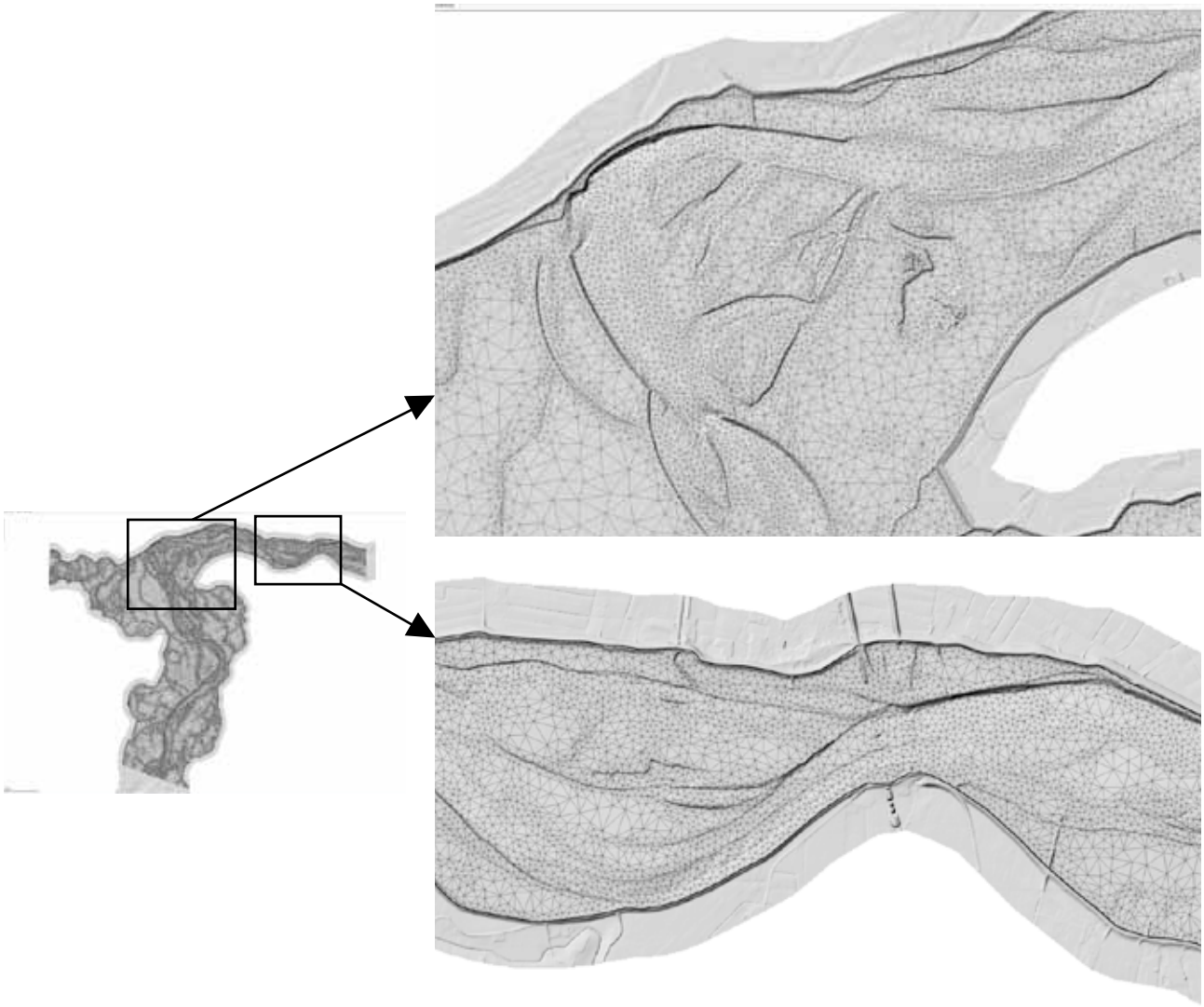


Figura 96 - Dominio di calcolo del tratto n. 6 da Dosolo a Borgoforte (S39A – S42B)

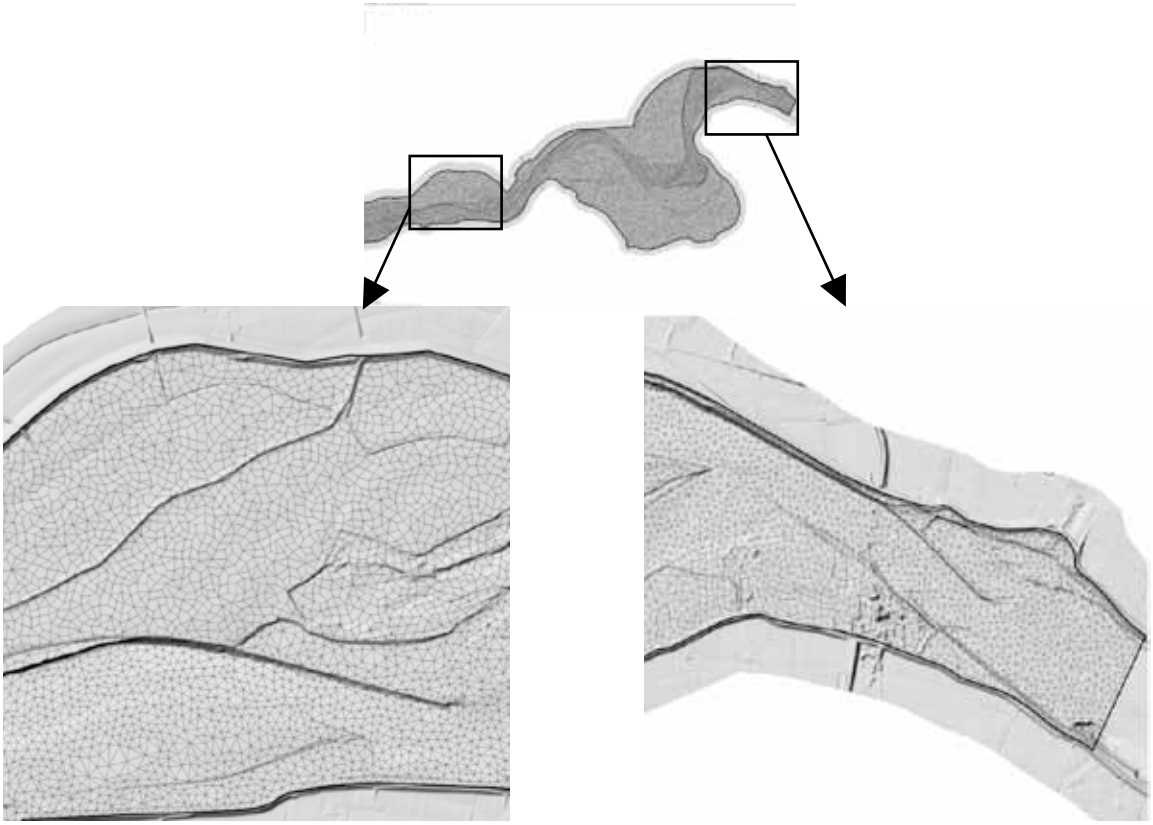


Figura 97 - Dominio di calcolo del tratto n. 7 da Borgoforte a Correggio Micheli (S42B – S46)

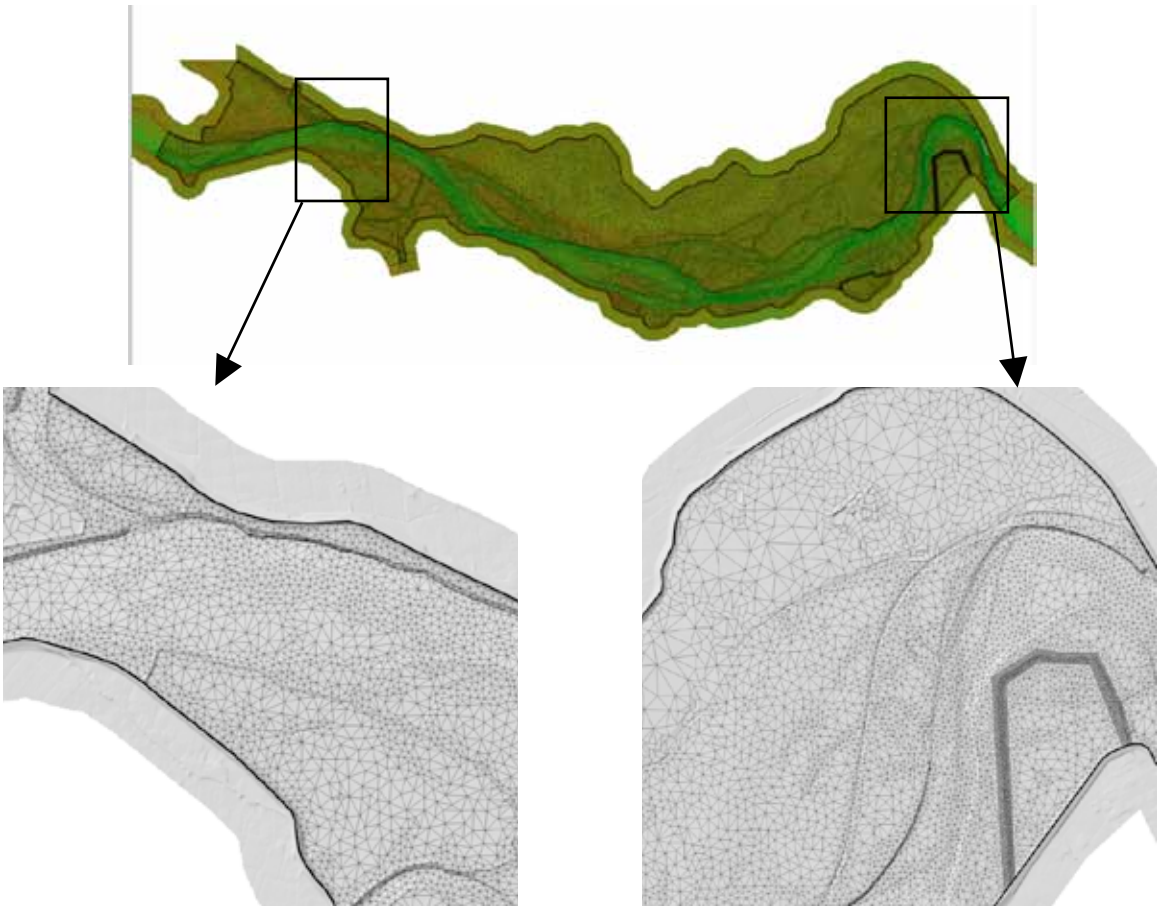


Figura 98 - Dominio di calcolo del tratto n. 8 da Correggio Micheli a Ostiglia (S46 – S53A)

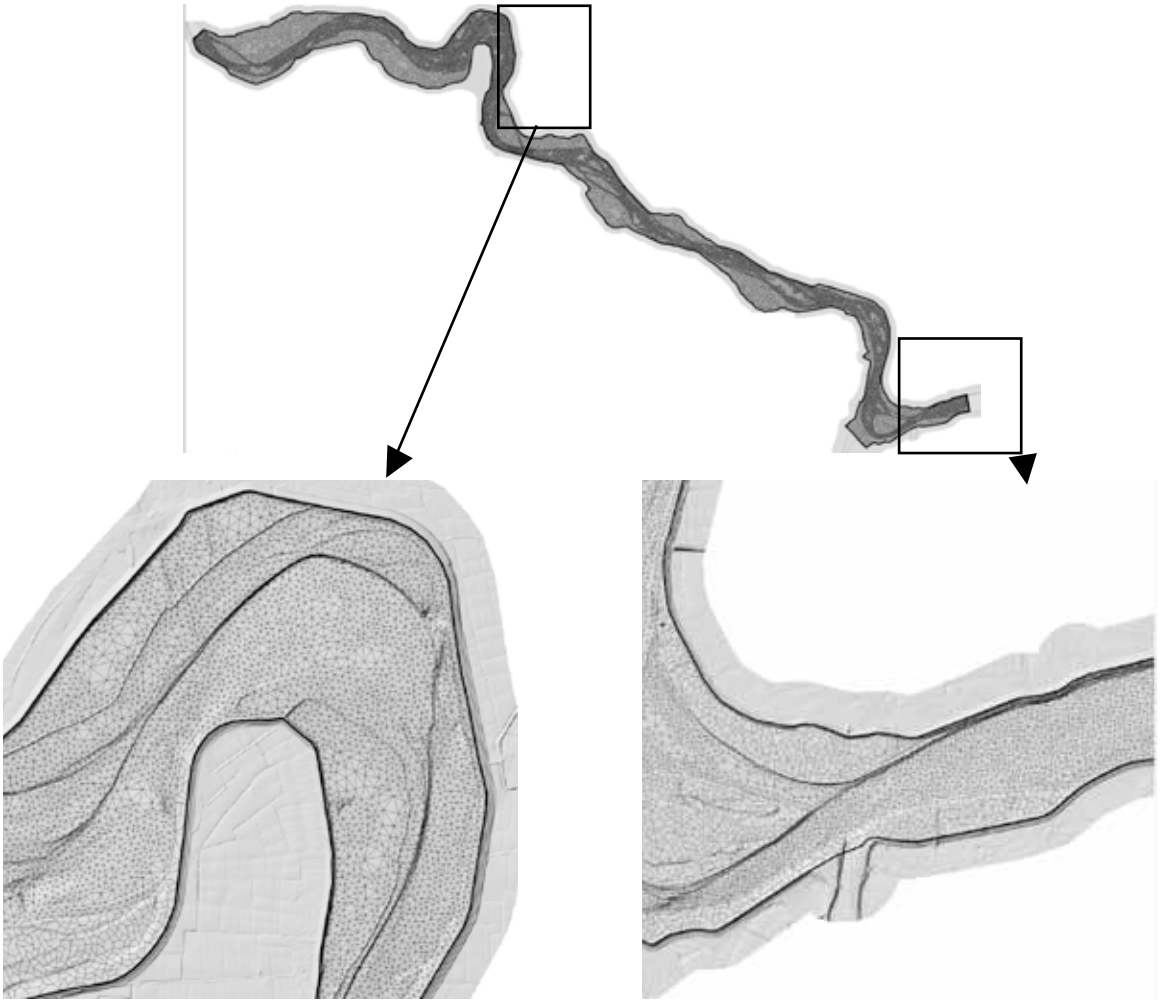


Figura 99 - Dominio di calcolo del tratto n. 9 da Ostiglia a Gaiba (S53A – S62)

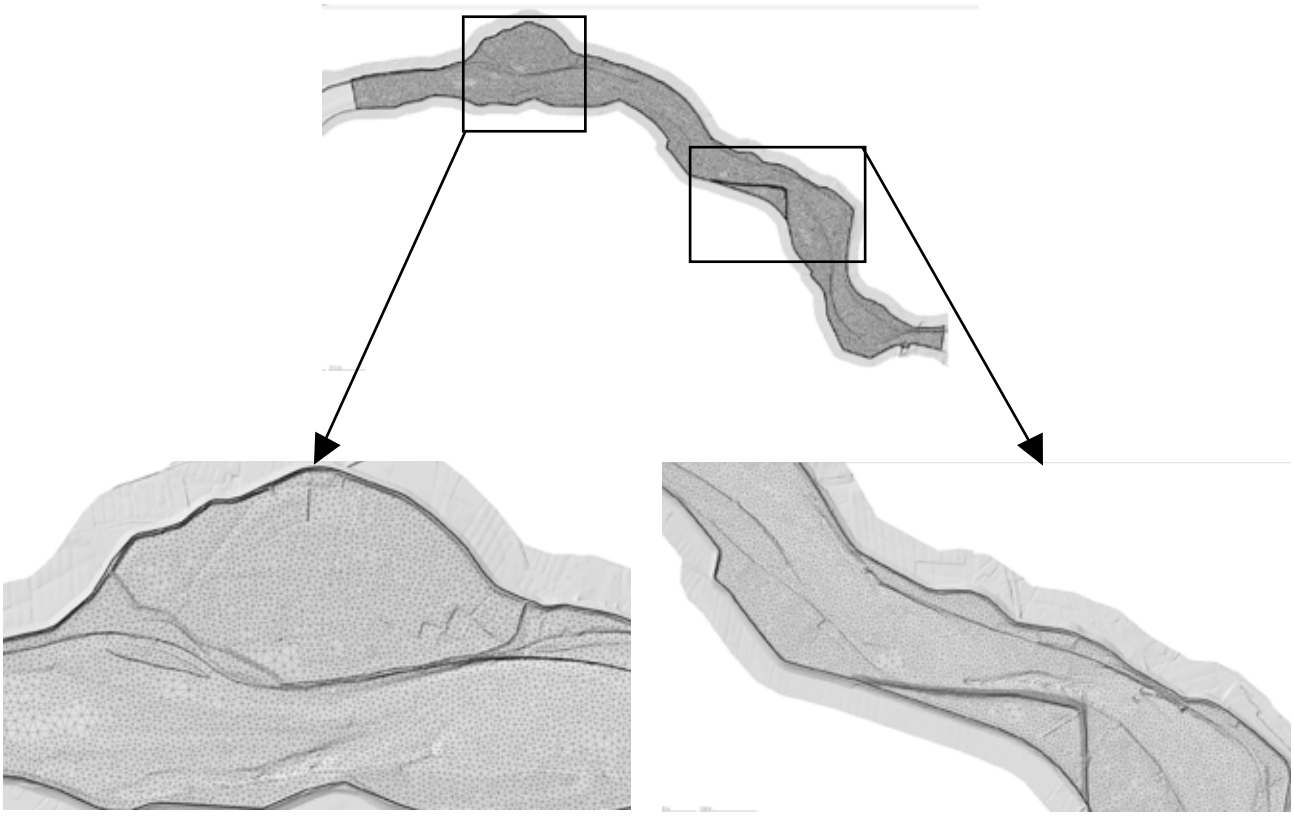


Figura 100 - Dominio di calcolo del tratto n. 10 da Gaiba a Pontelagoscuro (S62 – S65A)

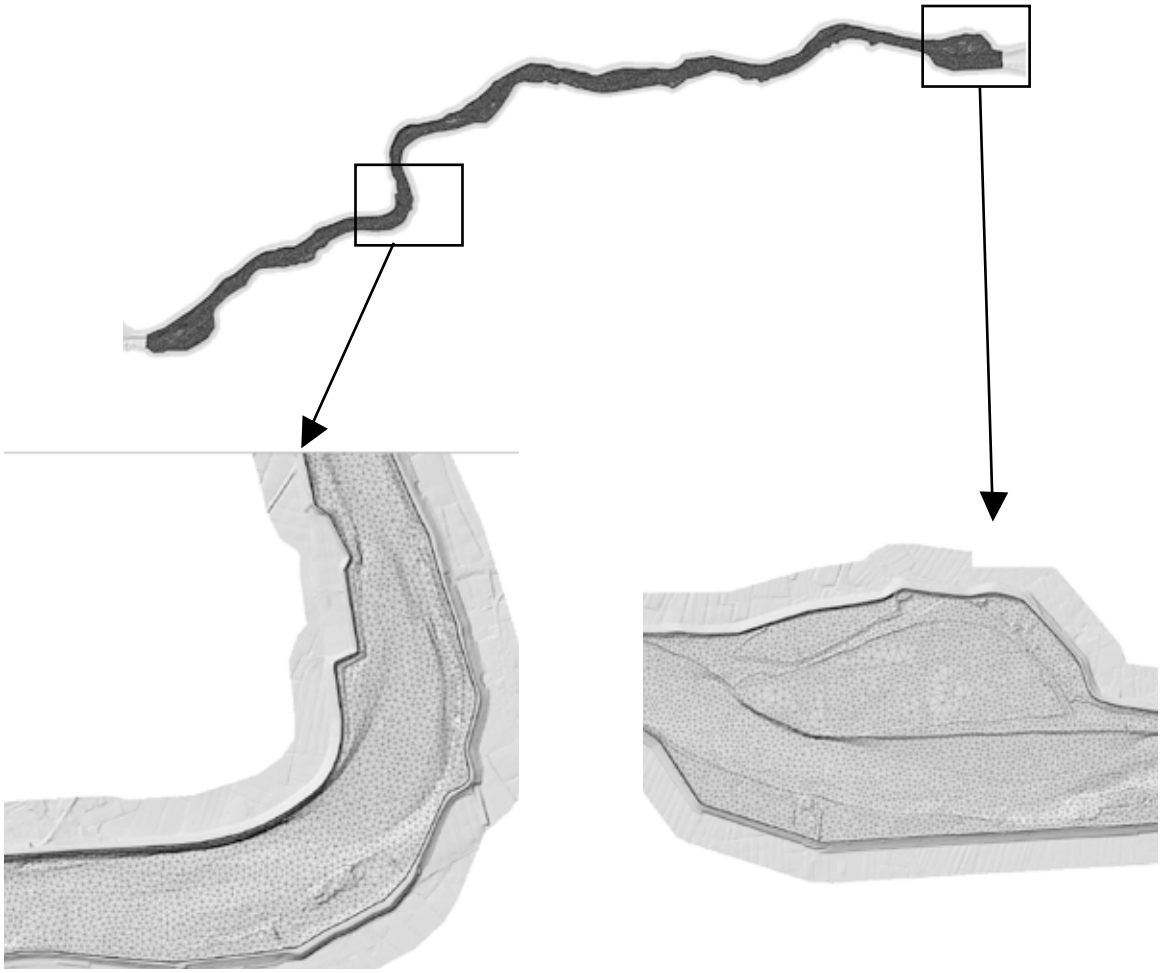


Figura 101 - Dominio di calcolo del tratto n. 11 da Pontelagoscuro a Goro (S65A – S73A)

5.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

Ognuno degli undici modelli è stato sempre utilizzato in regime permanente e cioè imponendo in input nella sezione di monte un valore costante della portata. Tale condizione è evidentemente differente da quella reale in cui il fenomeno è di moto vario, quindi non permanente, in funzione dell'onda di piena in ingresso; ma si è ritenuto di scarsa rilevanza tale circostanza dal momento che le simulazioni devono riferirsi alle fasi del colmo di piena aventi nel Po durate di molte ore se non di giorni.

Trattandosi di corrente di tipo lento, ognuno degli undici modelli richiede di definire una condizione al contorno di monte ed una di valle. Per lo stesso motivo la procedura di simulazione prevede di procedere utilizzando in successione gli undici modelli a partire da quello posto più a valle.

Condizioni al contorno di monte

Sono date per ogni tratto dalla portata considerata nella simulazione. In particolare nelle simulazioni relative alla taratura del modello sono state inserite in input nella rispettiva sezione di monte le portate note, tratto per tratto, della piena del 2000, mentre per le simulazioni riferite alla piena di riferimento PAI T200 quelle assegnate dall'Autorità di bacino del Po, sempre tratto per tratto (v. precedente Tabella 15).

Le due serie di portate così definite sono per ogni tratto indicate nella seguente Tabella 16.

Tratto	Portata piena 2000 (m^3/s)			Portata piena PAI T200 (m^3/s)		
	Definita da Autorità di bacino del fiume Po		Adottata nel modello	Definita da Autorità di bacino del fiume Po		Adottata nel modello
	monte	valle		monte	valle	
Tratto 1	12'240	11'850	11'850	13'000	14'300	14'300
Tratto 2	11'850	11'850	11'850	14'300	14'300	14'300
Tratto 3	11'850	11'850	11'850	14'300	14'300	14'300
Tratto 4	11'850	11'900	11'900	14'300	13'700	13'700
Tratto 5	11'900	11'900	11'900	13'700	13'700	13'700
Tratto 6	11'900	11'800	11'800	13'700	13'100	13'100
Tratto 7	11'800	11'800	11'800	13'100	13'100	13'100
Tratto 8	11'800	9'750	10'450	13'100	13'100	13'100
Tratto 9	11'800	9'750	10'450	13'100	13'100	13'100
Tratto 10	9'750	9'750	9'750	13'000	13'000	13'000
Tratto 11	9'750	9'750	9'750	13'000	13'000	13'000

Tabella 16 – Portate della piena del 2000 e portate PAI

Pur essendo assegnate tali portate, non è nota a priori la loro distribuzione in ciascuna delle maglie che caratterizzano il dominio in tale sezione iniziale di monte. Ne consegue che imponendo come input una preassegnata distribuzione, l'influenza di tale scelta possa risentirsi a valle per un certo tratto, anche in funzione dell'influenza idrodinamica che la corrente esplica da valle. Ciò ha richiesto di precedere iterativamente controllando i risultati di ogni modello in corrispondenza delle sezioni di estremità contermini, fino a raggiungere condizioni soddisfacenti di congruità tra i medesimi.

Condizione al contorno di valle

Per quanto riguarda il tratto di valle n. 11, la condizione al contorno di valle (corrispondente all'incile del Po di Goro) è data dal livello noto e cioè:

- quello misurato nella piena del 2000, ai fini della taratura del modello;
- quello indicato dall'Autorità di bacino del fiume Po, ai fini della ricostruzione della piena PAI T200.

Per ogni altro tratto progressivamente considerato a monte, la condizione del contorno di valle è data dal livello idrico precedentemente dedotto nella sezione di monte lungo le maglie di calcolo che contraddistinguono l'alveo principale e le golene del tratto posto immediatamente a valle. Tale suddivisione tra alveo principale e golene consente di tenere in considerazione le variazioni di livello anche sensibili lungo il piano della sezione a causa del locale comportamento idrodinamico della corrente. Il livello così assegnato viene imposto in input come valore costante lungo le maglie che caratterizzano l'alveo principale e le golene in tale sezione. Ne consegue che l'influenza di tale scelta si risenta a monte per un certo tratto, peraltro con effetti abbastanza trascurabili come è risultato dai riscontri effettuati.

Osservazione

Poiché, come mostra la precedente tabella, in qualche tratto la portata in input presenta differenze rispetto a quella dei tratti immediatamente di monte, il livello idrico progressivamente ricostruito nelle sezioni di monte di ogni tratto può non corrispondere a quello che si sarebbe verificato a parità di portata. Esemplificando, se si considera il tratto 5 in cui la portata PAI T200 è pari a 13'700 m3/s, il livello idrico ricostruito per tale portata nella sezione di monte del tratto non dovrebbe essere utilizzato come condizione al contorno di valle del tratto di monte, dal momento che non sarebbe valido per la portata PAI T200 relativa al tratto 4 di monte pari a 14'300 m3/s.

Ciò significa che se, ciononostante, si utilizzano come condizioni di valle i livelli ottenuti nella sezione di monte dei rispettivi tratti di valle possono determinarsi, nei casi in cui le rispettive portate siano differenti, profili di corrente o di tipo rigurgitato e rallentato (quando la portata aumenta verso valle) o con profilo accelerato (quando la portata diminuisce verso valle).

Tuttavia, analizzando tale aspetto, grazie ad un'oculata distribuzione tra alveo principale e golene delle condizioni al contorno si è verificato che gli effetti o di rallentamento o di accelerazione sono molto modesti e praticamente trascurabili anche tenendo conto che le differenze di portata tra tratto e tratto sono percentualmente modeste rispetto ai loro valori assoluti e che in definitiva le corrispondenze influenze sui livelli calcolati possono ben considerarsi ricadenti nell'usuale campo di approssimazione.

5.3 LA PIENA DEL NOVEMBRE 2000. CALIBRAZIONE DEL MODELLO 2D A FONDO FISSO

Come già esposto, ai fini della taratura dei modelli bidimensionali degli undici tratti di alveo interessati dalle traverse si è fatto riferimento ai dati idrometrici registrati durante la grande piena del novembre 2000 che ha raggiunto portate molto considerevoli lungo tutto il tratto di interesse del Po, ed è quindi ben idonea alla taratura dei modelli di piena. La taratura del modello è avvenuta utilizzando come parametri di controllo le scabrezze dell'alveo e delle aree golenali. La risposta idraulica delle aree interessate a qualunque sollecitazione di deflusso è determinata dalla natura dei vari terreni e delle loro diverse coperture vegetali, o eventuali ostacoli presenti. Alla diversa natura delle coperture dei terreni sono associabili le specifiche caratteristiche di scabrezza idraulica, determinanti ai fini della simulazione del fenomeno.

In particolare, ogni dominio di calcolo è stato suddiviso in aree a differente scabrezza, individuate in funzione delle loro caratteristiche morfologiche e distinte in aree golenali e aree d'alveo, assegnando valori di scabrezza definiti in funzione delle condizioni fisiche reali dei terreni.

Il processo di taratura effettuato ha portato, con successive iterazioni, a definire la scabrezza dell'alveo e delle aree golenali con i seguenti valori di riferimento secondo Manning:

Porzione d'alveo	Scabrezza secondo Manning
Alveo principale	0,0286 $m^{-1/3}$ s
Zona golenale	0,04 ÷ 0,1 $m^{-1/3}$ s

Tabella 17 - Valori di riferimento della scabrezza secondo Manning assegnati alle aree fluviali di interesse

Come si vede dai dati riportati in tabella, nei riguardi dell'alveo di magra si è giunti a definire in generale il medesimo valore di n (Manning) = 0,0286 m-1/3 s ottenuto con la taratura del modello utilizzato per le determinazioni di cui al paragrafo 5.4. Per quanto riguarda il valore di scabrezza assegnato alle aree golenali, durante la fase di taratura sono stati scelti valori di riferimento compresi nel range di valori tipici per queste tipologie di aree.

In alcuni casi specifici, caratterizzati da una particolare dinamica fluviale e dalle incertezze proprie di un modello a moto permanente, il processo di taratura ha condotto ad assegnare ad alcune aree dell'alveo principale di piena e delle golene valori di scabrezza differenti dai valori di riferimento riportati sopra. Tale procedimento è risultato necessario al fine di poter rappresentare al meglio la dinamica fluviale generatasi durante la piena del 2000 e raggiungere, così, un buon livello di taratura e rappresentatività dei modelli implementati.

Nelle figure seguenti sono rappresentati i campi dei suddetti valori di scabrezza nei domini di calcolo generati per i cinque tratti di interesse.

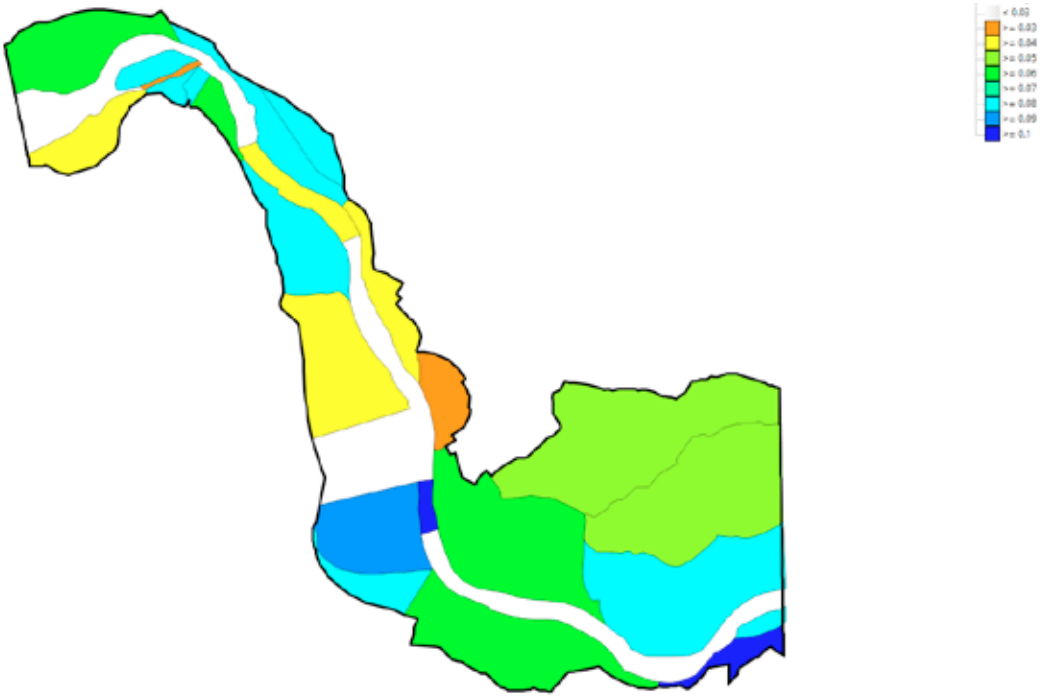


Figura 102 - Scabrezza Manning n (m-1/3 s) nel dominio di calcolo del tratto n. 1 da Cremona a Zibello (S25B – S28A)

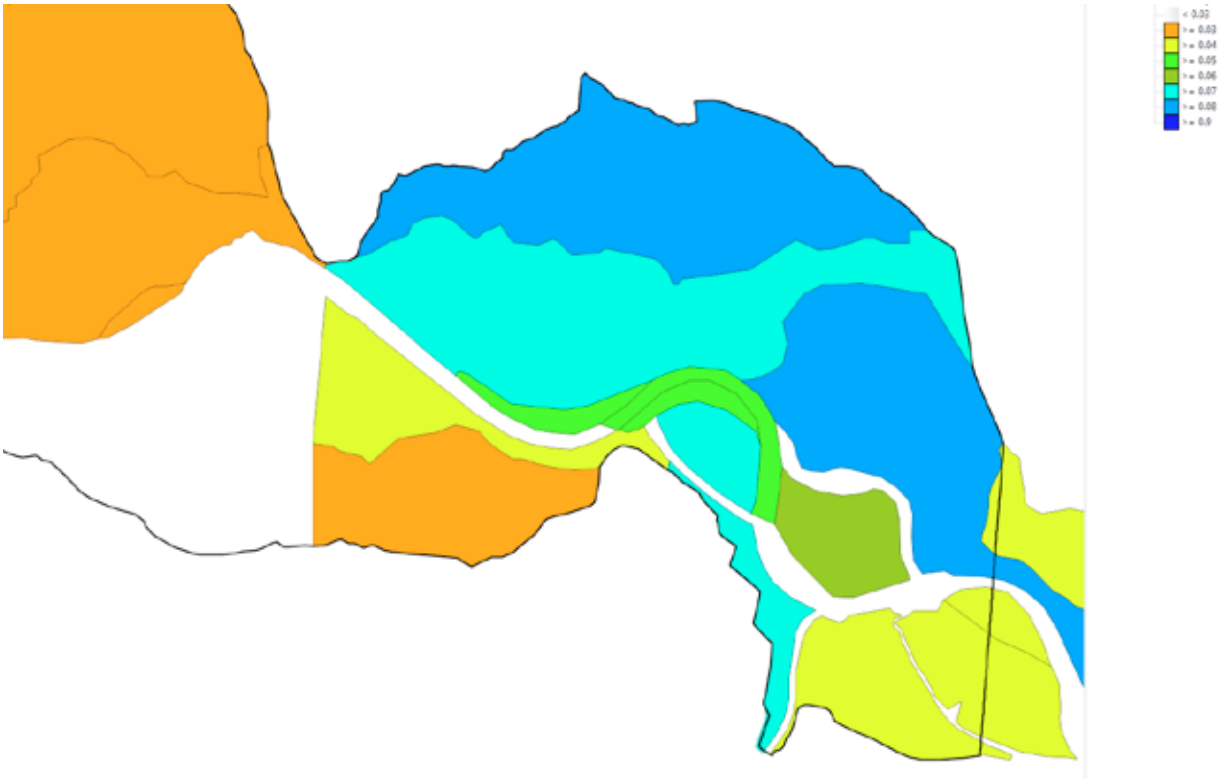


Figura 103 - Scabrezza Manning n (m-1/3 s) nel dominio di calcolo del tratto n. 2 da Zibello a Torricella (S28A – S33)

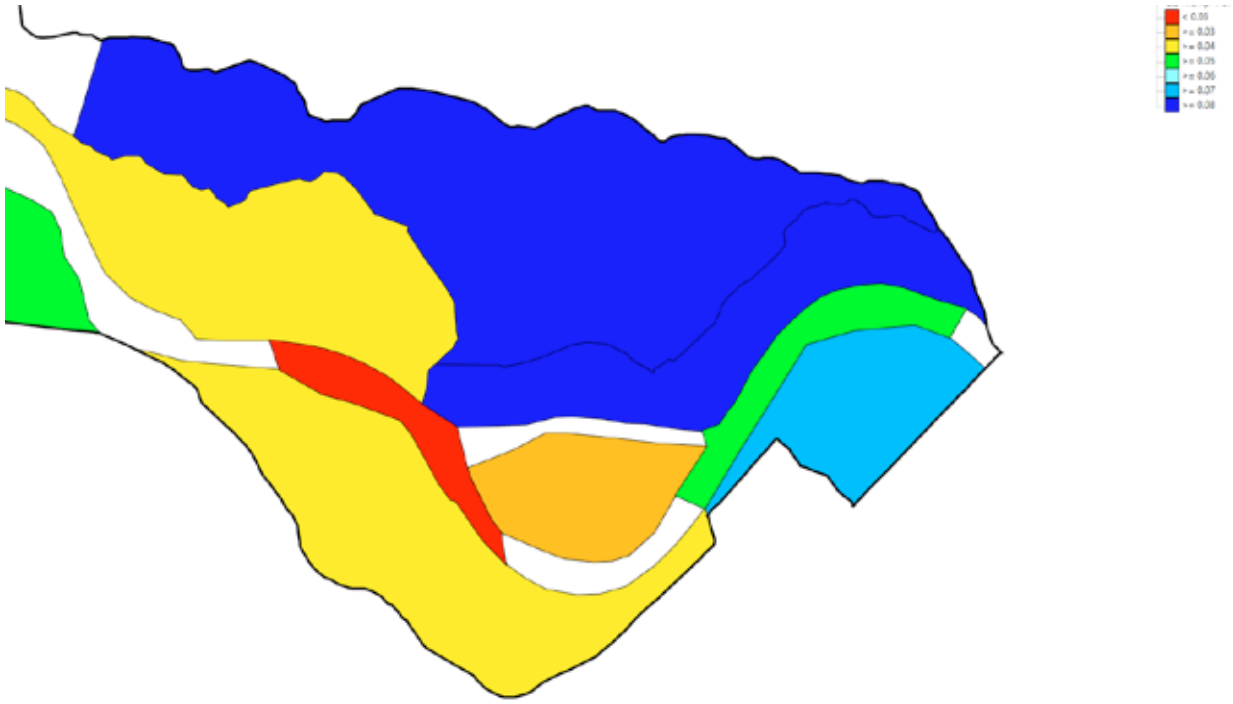


Figura 104 - Scabrezza Manning n (m-1/3 s) nel dominio di calcolo del tratto n. 3 da Torricella a Casalmaggiore (S33 – S35)

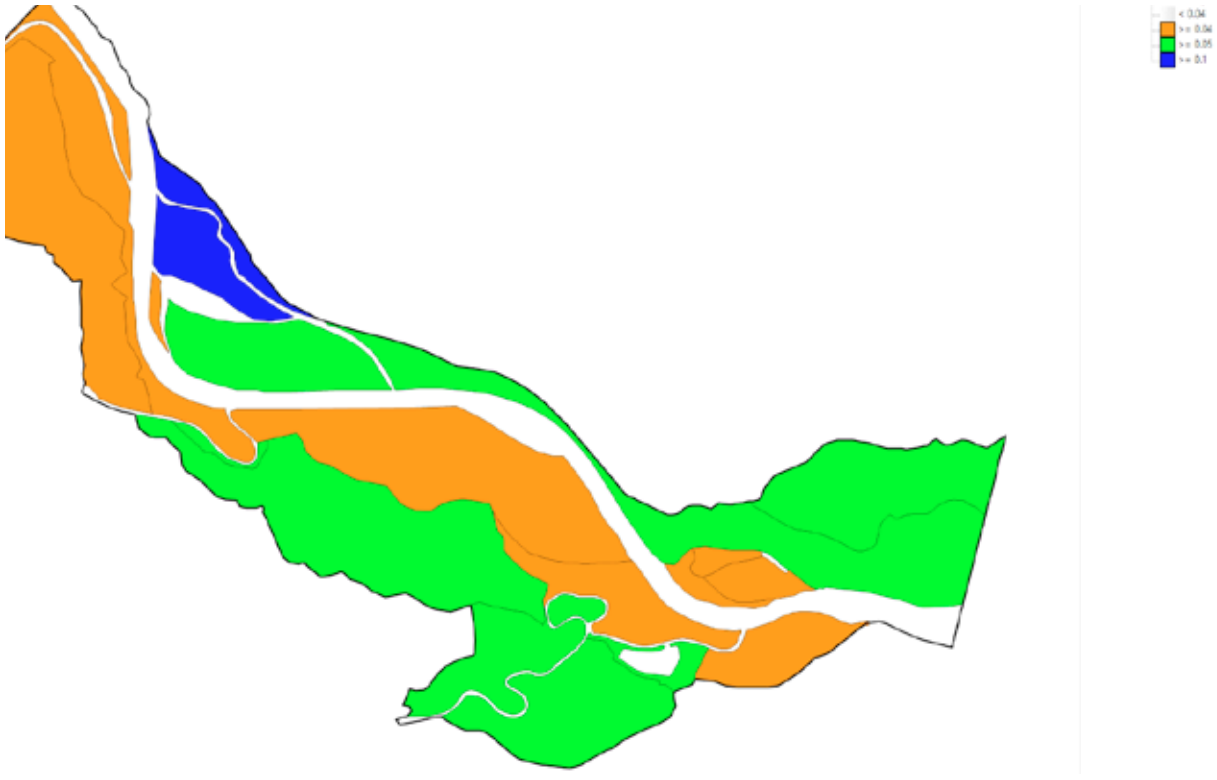


Figura 105 - Scabrezza Manning n (m-1/3 s) nel dominio di calcolo del tratto n. 4 da Casalmaggiore a Boretto (S35 – S37B)

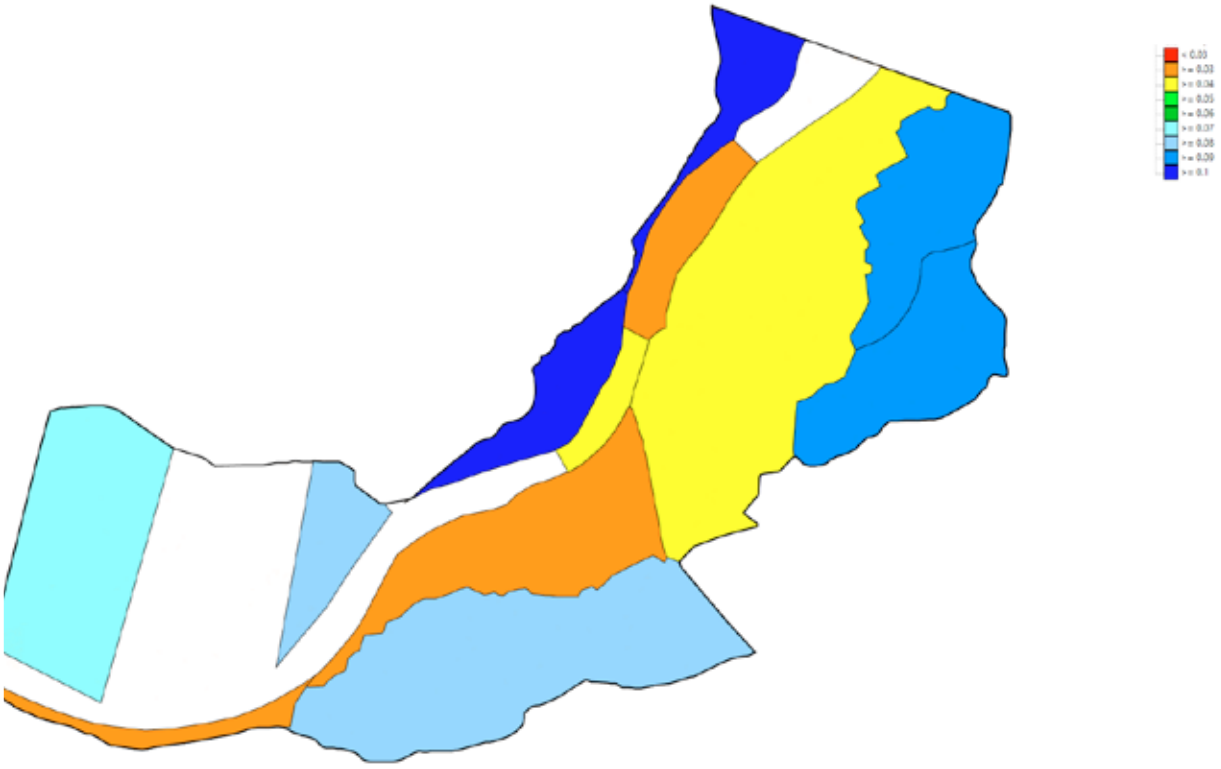


Figura 106 - Scabrezza Manning n (m-1/3 s) nel dominio di calcolo del tratto n. 5 da Boretto a Dosolo (S37B – S39A)

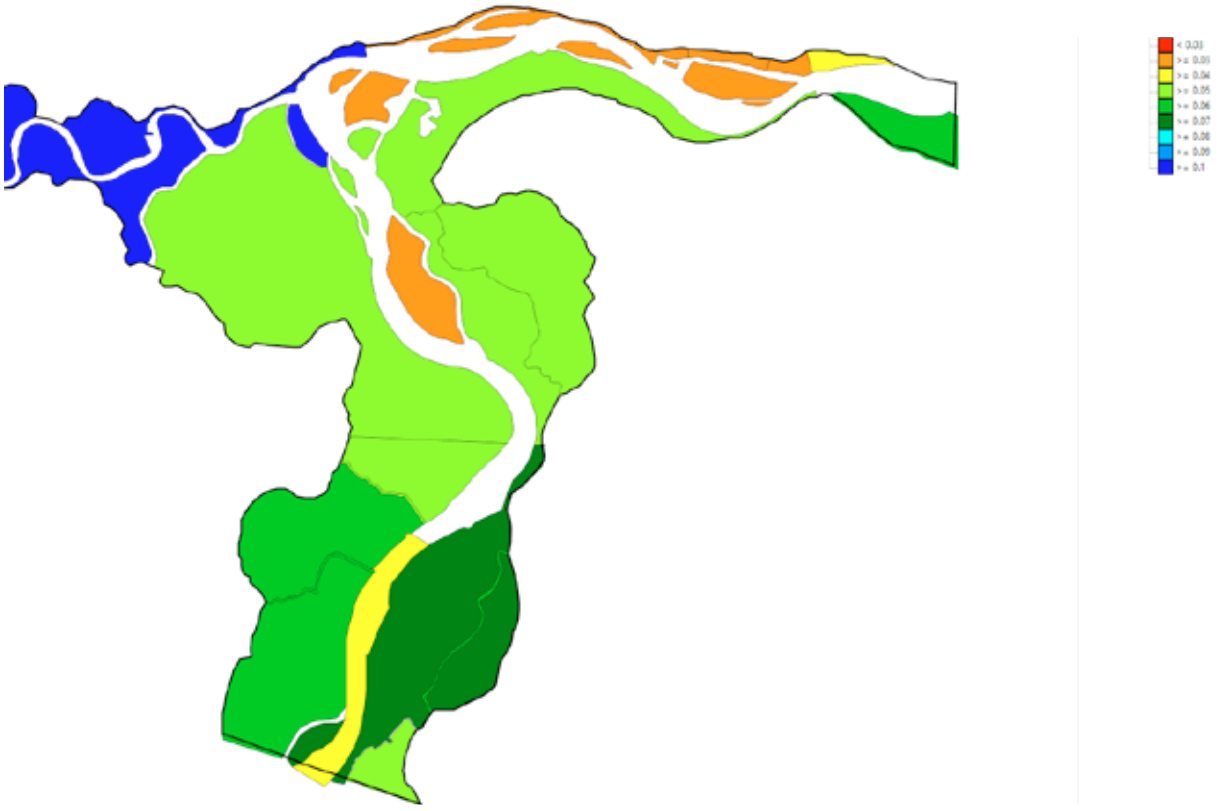


Figura 107 - Scabrezza Manning n (m-1/3 s) nel dominio di calcolo del tratto n. 6 da Dosolo a Borgoforte (S39A – S42B)



Figura 108 - Scabrezza Manning n (m-1/3 s) nel dominio di calcolo del tratto n. 7 da Borgoforte a Correggio Micheli (S42B – S46)

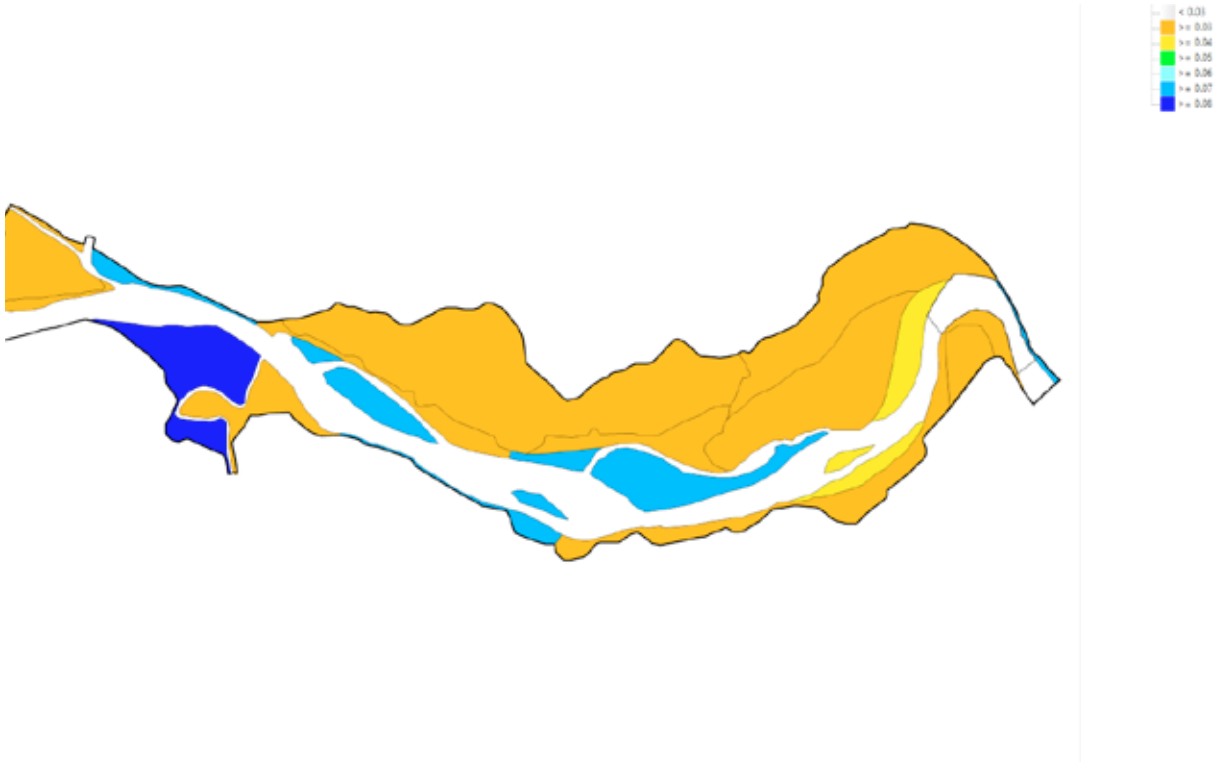


Figura 109 - Scabrezza Manning n (m-1/3 s) nel dominio di calcolo del tratto n. 8 da Correggio Micheli a Ostiglia (S46 – S53A)

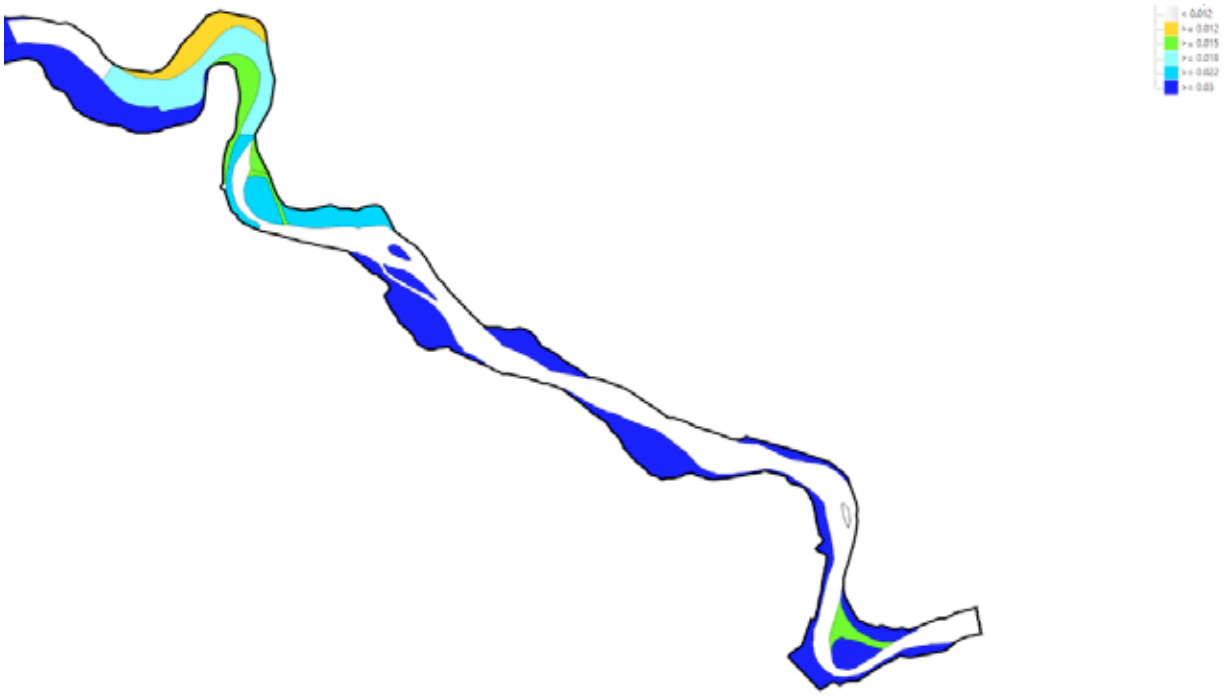


Figura 110 - Scabrezza Manning n (m-1/3 s) nel dominio di calcolo del tratto n. 9 da Ostiglia a Gaiba (S53A – S62)

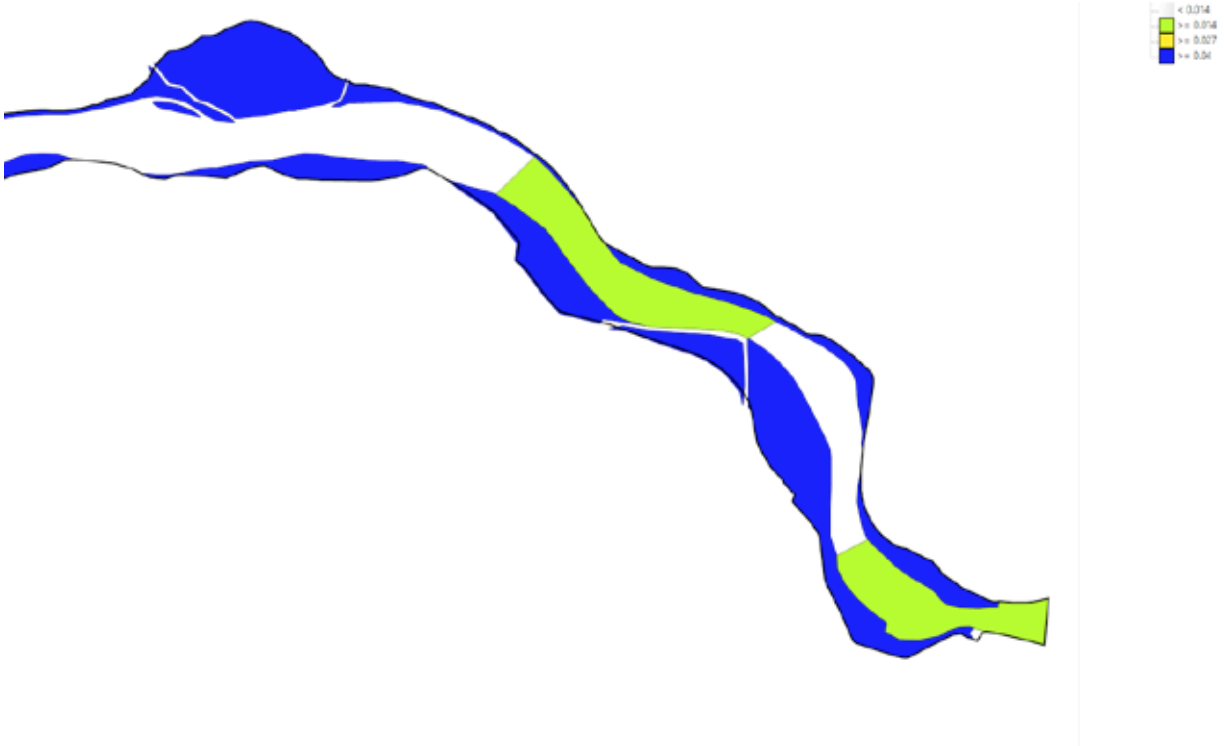


Figura 111 - Scabrezza Manning n (m-1/3 s) nel dominio di calcolo del tratto n. 10 da Gaiba a Pontelagoscuro (S62 – S65A)

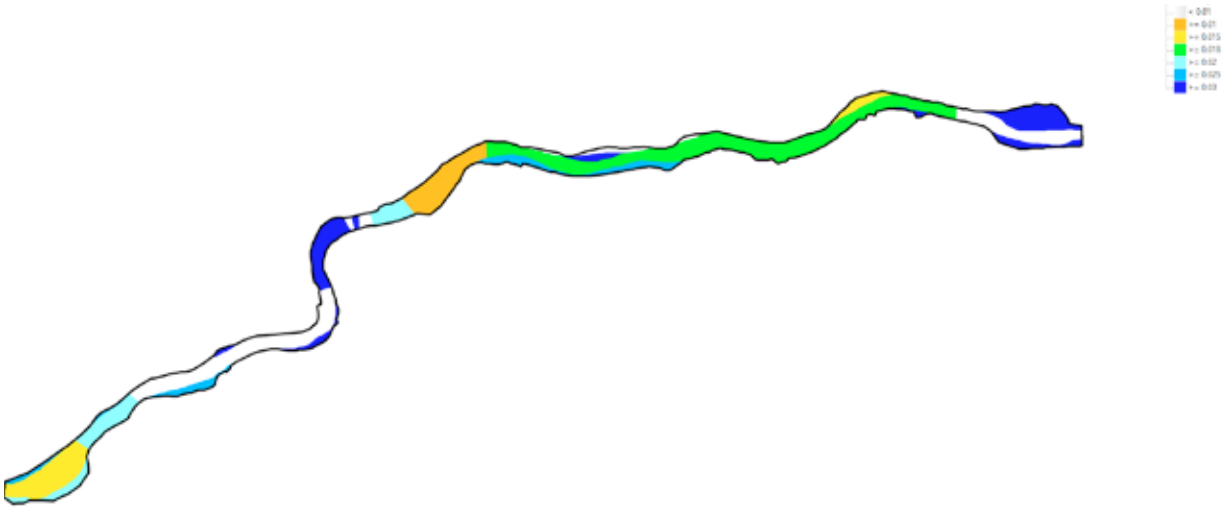


Figura 112 - Scabrezza Manning n (m-1/3 s) nel dominio di calcolo del tratto n. 11 da Pontelagoscuro a Goro (S65A – S73A)

Considerato il carattere morfo dinamico del fiume Po e, quindi, le limitazioni imposte da un modello a fondo fisso, per alcuni tratti modellati il procedimento di taratura ha richiesto, oltre all'utilizzo della scabrezza come parametro di controllo, l'intervento localizzato sull'informazione topografica posta alla base della modellazione.

In particolare, in alcuni tratti specifici soprattutto a valle di foce Mincio in cui l'alveo di piena risulta canalizzato e di limitata estensione trasversale, il processo di taratura è stato portato a termine considerando l'influenza che la morfologia riprodotta dal D.T.M. e l'evoluzione morfologica del fondo alveo hanno sul regime idrico del fiume durante il deflusso di piena. Il tema è stato sviluppato soprattutto per quei tratti in cui la presenza di sensibili approssimazioni sulla quota altimetrica del fondo alveo, causate da operazioni di interpolazione tra i dati dei rilievi batimetrici e i rilievi aerofotogrammetrici posti alla base del D.T.M. utilizzato, e la presenza di barre mobili (isole di sedimenti mobili) di apprezzabili dimensioni possono condizionare sensibilmente i livelli idrici calcolati e la loro convergenza verso i valori misurati o di riferimento.

Infatti, in tali tratti la schematizzazione lineare delle quote d'alveo e la modellazione delle barre mobili di maggiori dimensioni come se fossero elementi morfologici fissi ed invarianti durante l'evento di piena, introduce un errore sistematico nel processo di calcolo dei livelli idrici difficilmente colmabile con la sola variazione del valore dei parametri di scabrezza, se non utilizzando coefficienti con valori irreali. D'altra parte nel corso di un evento di piena il fondo del fiume subisce notevoli cambiamenti e nelle fasi di picco risulta generalmente livellato verso i valori medi delle quote di fondo a monte e a valle delle singolarità morfologiche.

Quindi, nei tratti d'alveo che presentavano le specificità sopraccitate, il procedimento di taratura ha previsto modeste variazioni altimetriche delle singolarità morfologiche rilevate e riportate nel D.T.M. utilizzato, scelte in funzione di un confronto critico con gli studi morfologici esistenti e immagini satellitari storiche.

Introducendo dunque nei modelli dei suddetti undici tratti di interesse, nella loro attuale configurazione d'alveo, i valori di portata al colmo effettivamente rilevati localmente nel corso della piena del novembre 2000, si sono determinati i campi di moto rappresentativi dei livelli e delle velocità in ogni cella dei domini di modellazione (alcuni esempi sono riportati nelle figure successive).

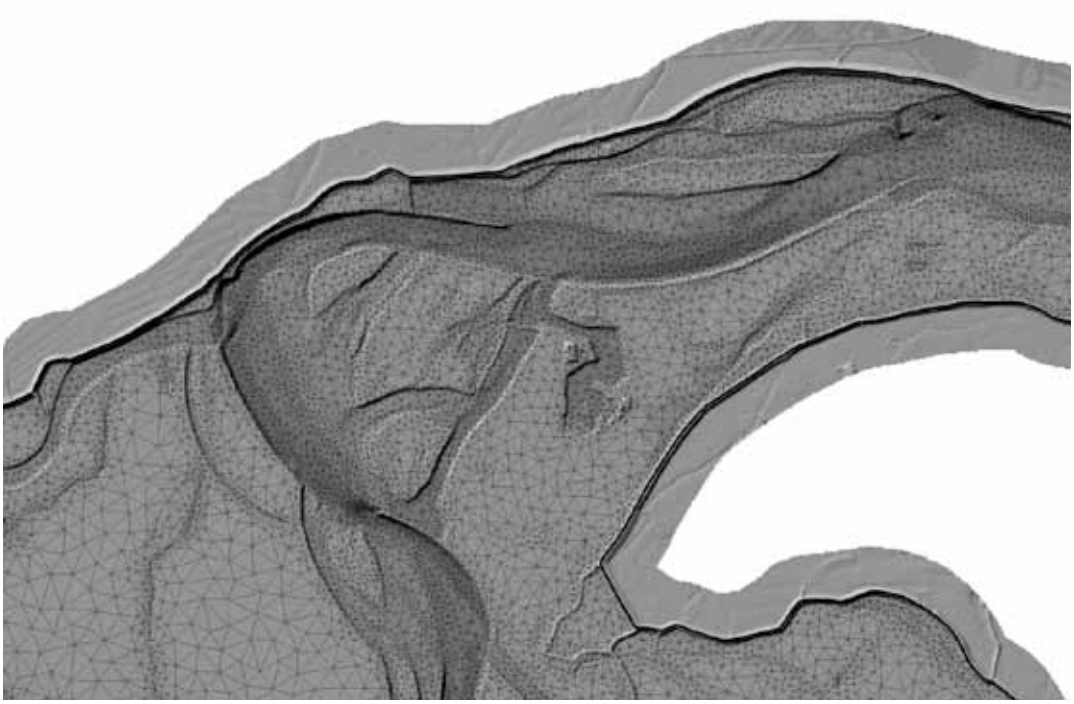


Figura 113 – Dominio di calcolo riferito alla piena del 2000 lungo il tratto n.3

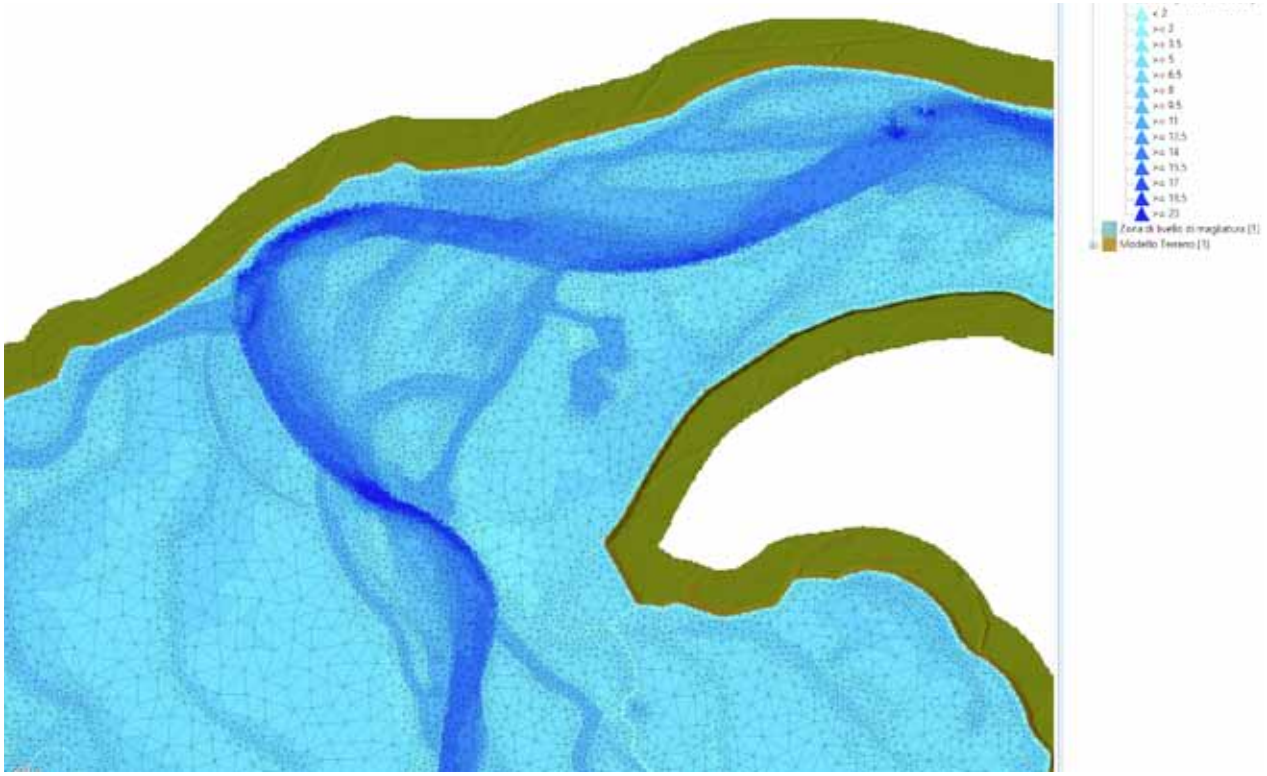


Figura 114 – Tiranti idrici riferiti alla piena del 2000 lungo il tratto n.3

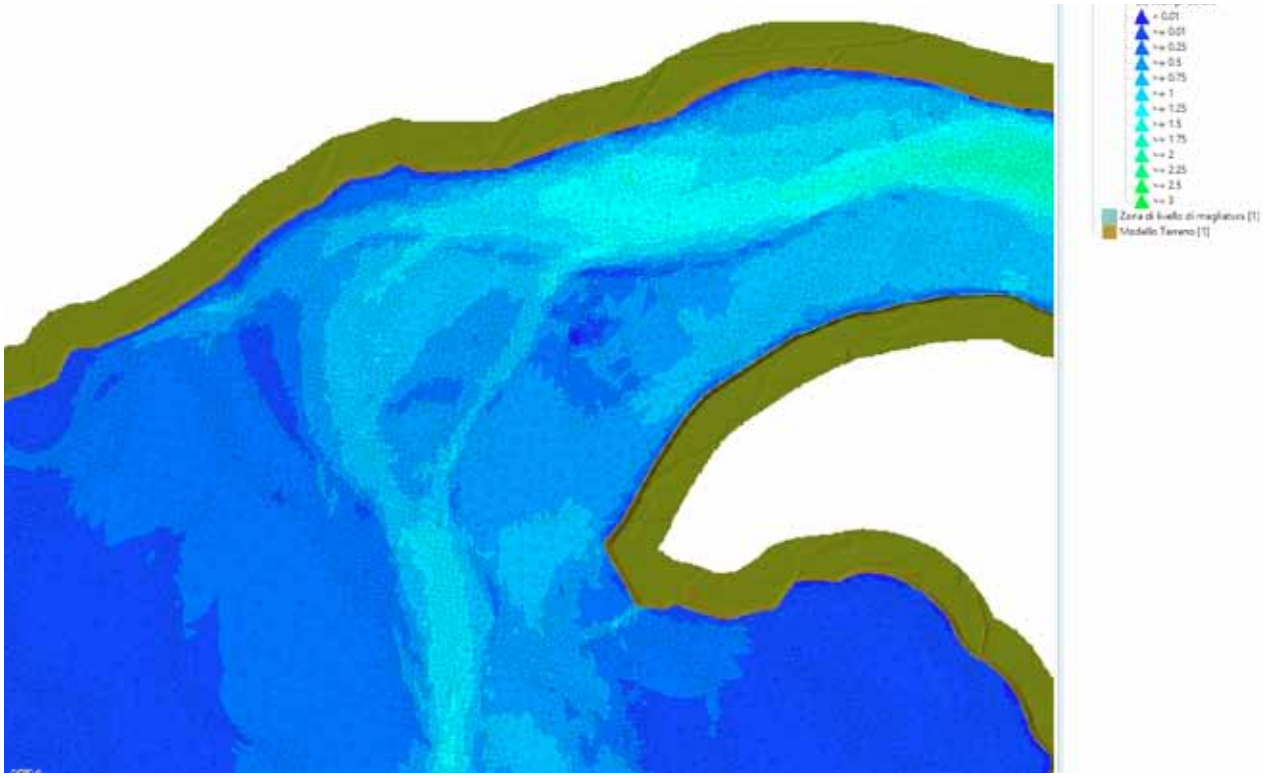


Figura 115 – Campo delle velocità riferito alla piena del 2000 lungo il tratto n.3

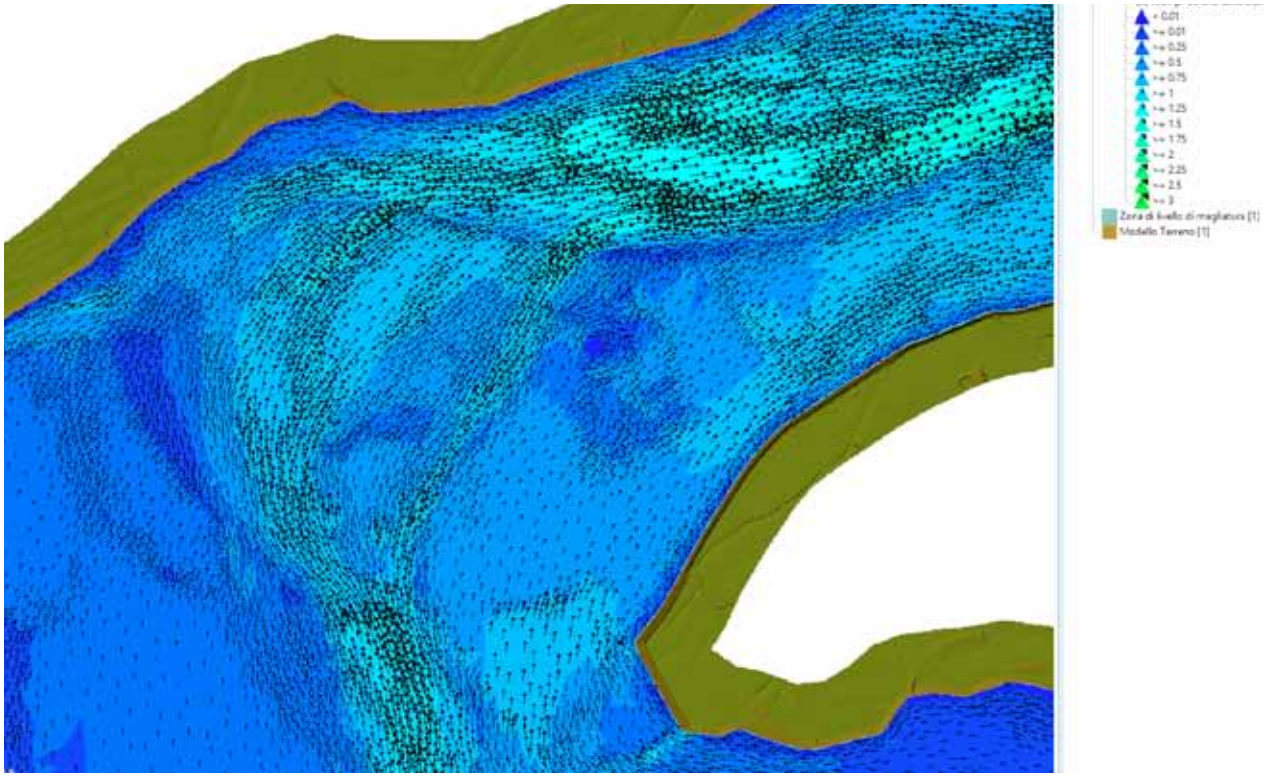


Figura 116 – Vettori del campo delle velocità riferito alla piena del 2000 lungo il tratto n.3

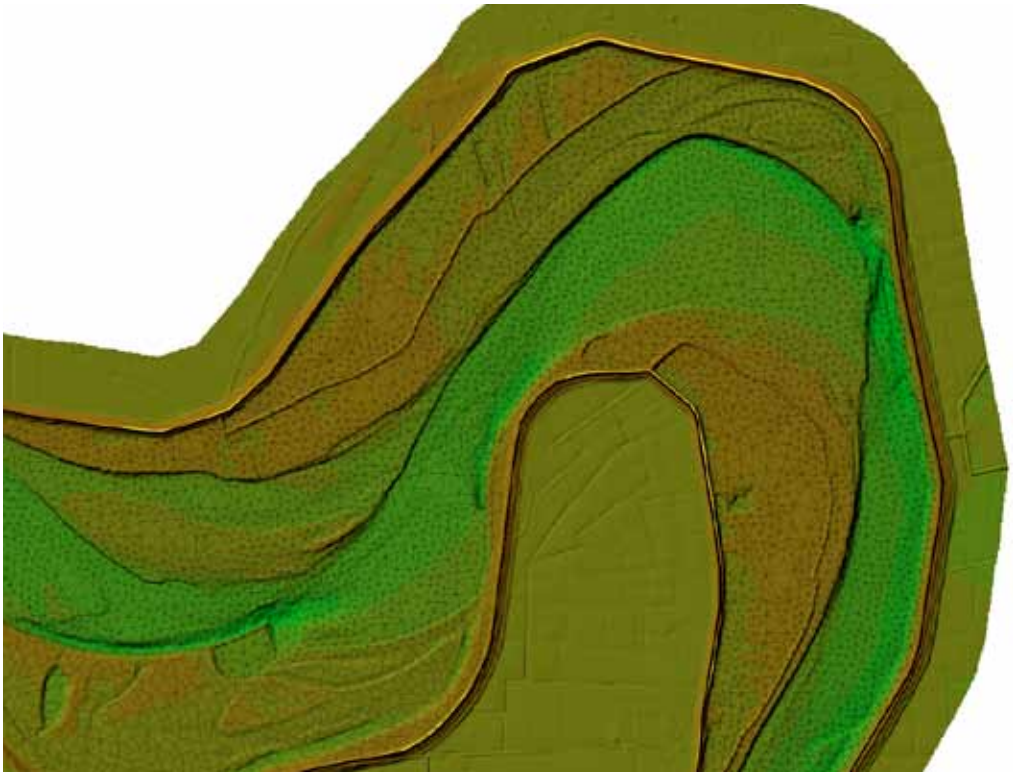


Figura 117 – Dominio di calcolo riferito alla piena del 2000 lungo il tratto n.9

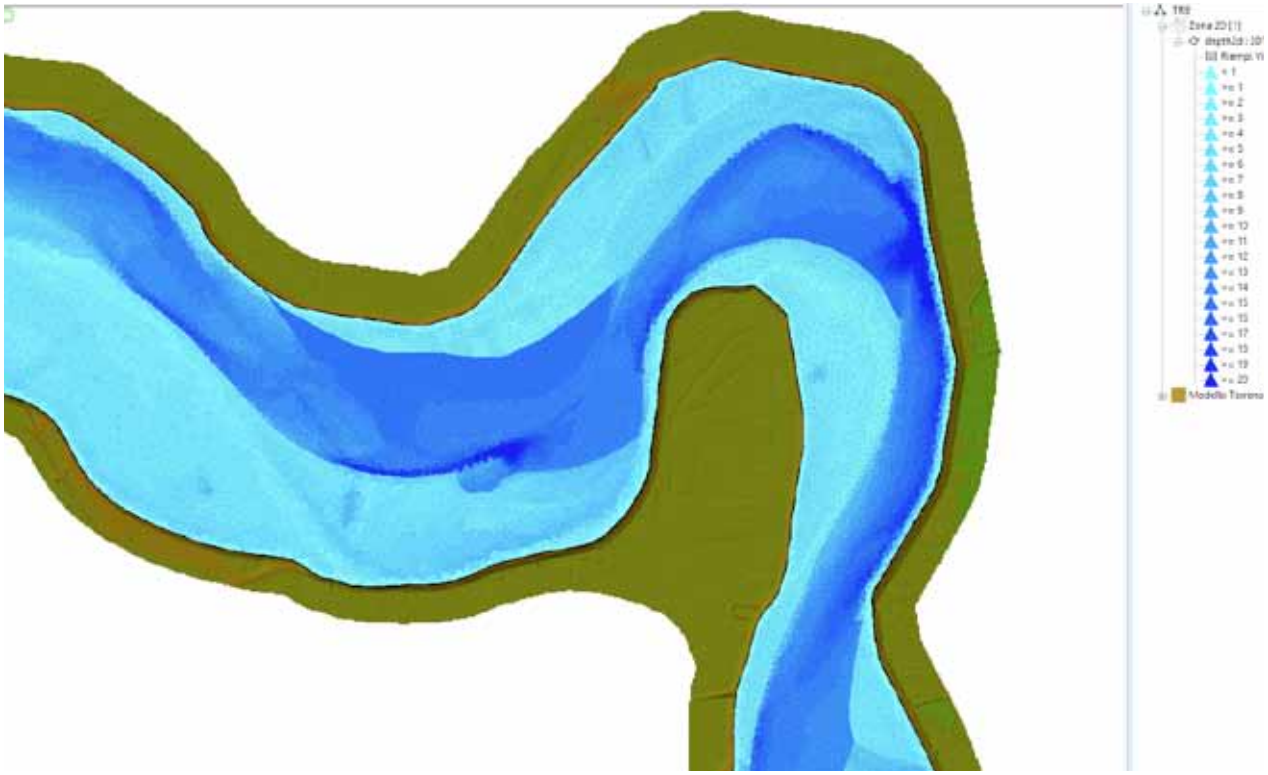


Figura 118 – Tiranti idrici riferiti alla piena del 2000 lungo il tratto n.9

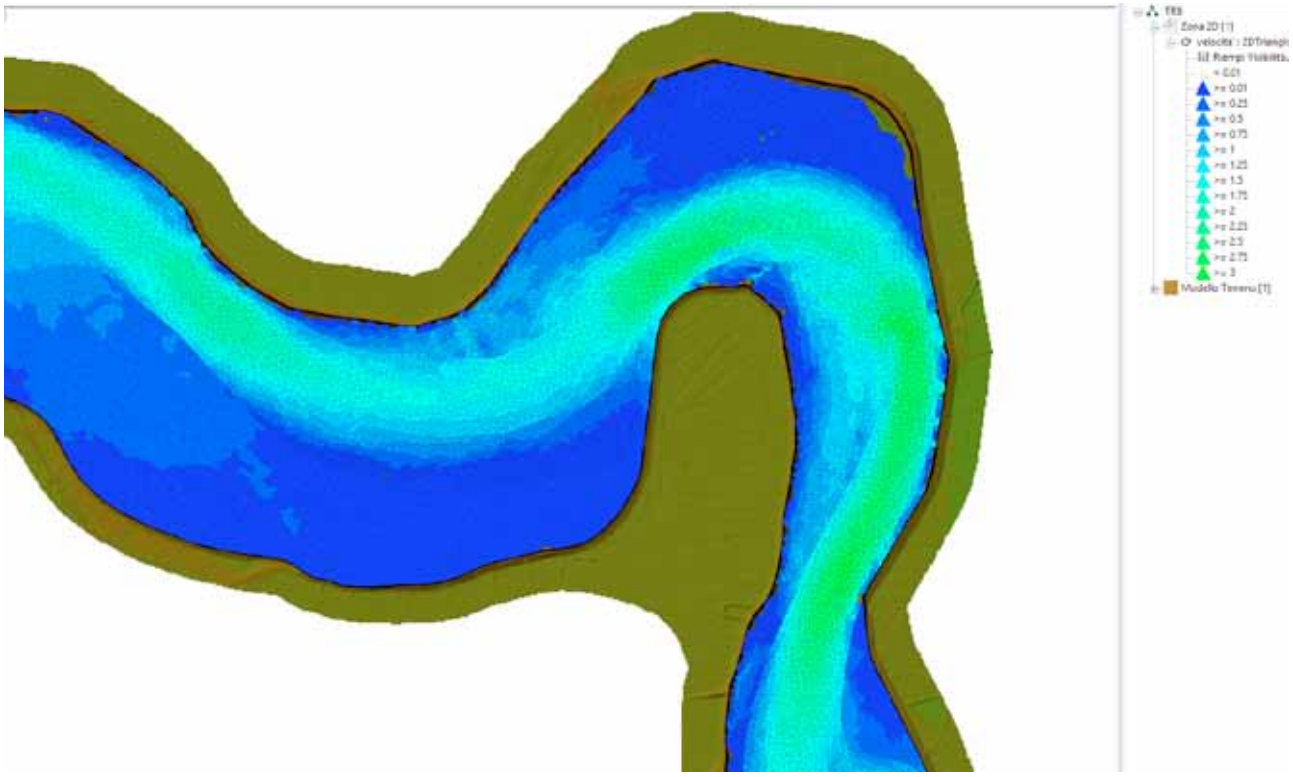


Figura 119 – Campo delle velocità riferito alla piena del 2000 lungo il tratto n.9

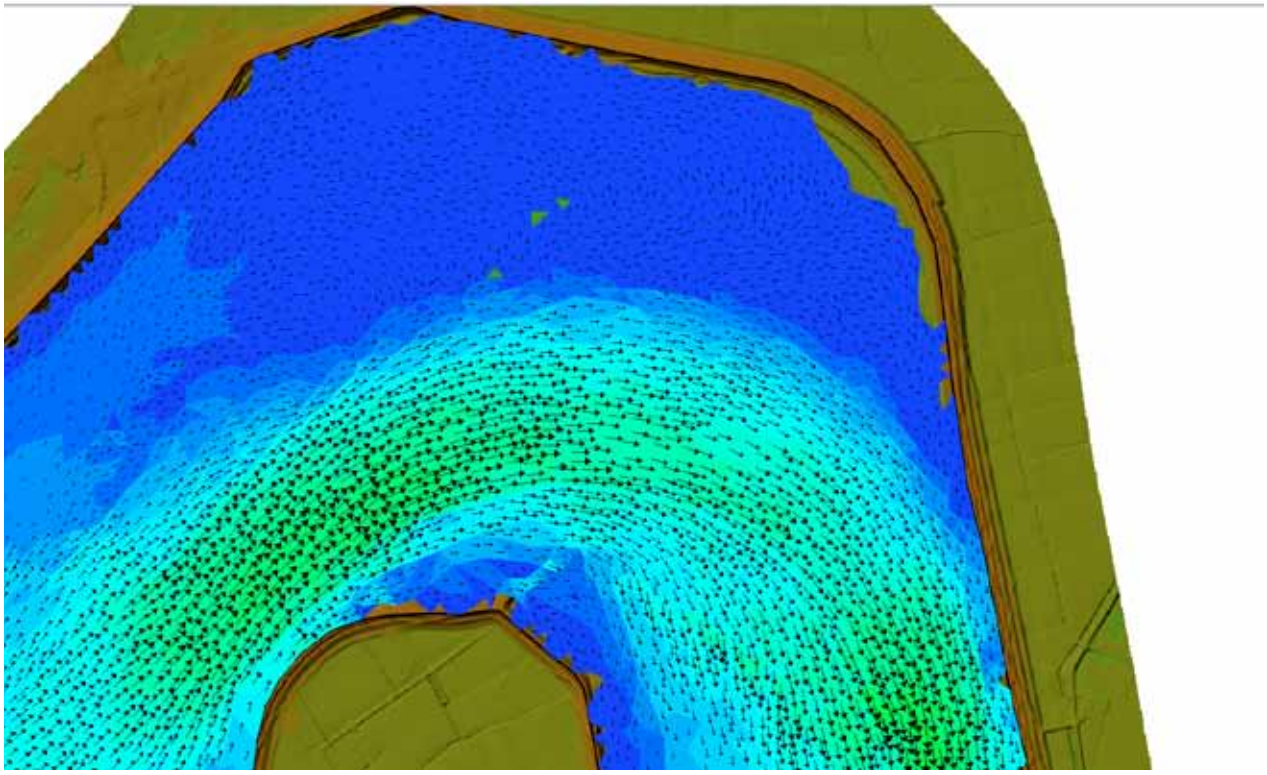


Figura 120 – Vettori del campo delle velocità riferito alla piena del 2000 lungo il tratto n.9

I valori dei livelli idrici sono riportati nell'Allegato 11.1,Tavole da 1 a 21, per tutto il tratto di Po di interesse. Tenendo presenti le condizioni particolari che definiscono la congruità nelle sezioni al contorno di monte e di valle di ognuno degli undici domini di calcolo, discusse nel paragrafo precedente, le cartografie indicano con tratteggio le zone di transizione tra i domini contermini.

Nelle seguenti tabelle si riportano, per ogni dominio di calcolo e per ogni sezione ufficiale di riferimento, i confronti fra il livello idrico misurato durante la piena del 2000, preso come riferimento per la taratura dei modelli, ed il livello ricavato dal modello idraulico bidimensionale implementato nel presente studio.

Sez	Progr. (Km)	Livelli Piena 2000 (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
28A	394,6	35,89	35,33	35,89	35,33	0,00	0,00
28BIS	391,0	35,88	36,90	36,37	36,60	-0,49	0,30
28	389,3	35,87	37,19	36,45	36,84	-0,58	0,35
27C	386,9	35,98	37,58	36,74	37,10	-0,76	0,48
27B	386,4	36,00	37,58	37,10	37,25	-1,10	0,33
27A	384,8	37,28	38,10	37,64	37,74	-0,36	0,36
27	383,0	37,98	38,24	38,14	38,00	-0,16	0,24
26C	381,2	38,53	38,54	38,60	38,53	-0,07	0,01
26B	378,9	39,34	39,15	39,00	38,80	0,34	0,35
26A	376,7	40,09	40,10	39,62	39,90	0,47	0,20
26	375,1	40,49	40,29	40,39	40,22	0,10	0,07
25B	374,7	40,68	40,39	40,40	40,21	0,28	0,18

Tabella 18 - Tratto n. 1 da Cremona a Zibello (S25B – S28A). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 11.850 m3/s). In colore verde i livelli misurati, in colore giallo i livelli ricostruiti dall'Autorità di bacino del F. Po.

Sez	Progr. (Km)	Livelli Piena 2000 (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
33	409,8	33,41	33,36	33,41	33,36	0,00	0,00
32A	408,6	33,66	33,50	33,68	33,55	-0,02	-0,05
32	406,2	33,99	33,99	33,85	33,95	0,14	0,04
31	403,6	34,28	35,05	34,42	34,95	-0,14	0,10
30B	402,5	34,67	35,06	34,58	34,95	0,09	0,11
30A	401,2	33,95	35,15	34,56	35,1	-0,61	0,05
30	399,2	35,17	35,19	35,17	35,18	0	0,01
29	396,0	35,89	35,24	35,80	35,32	0,09	-0,08
28A	394,6	35,89	35,33	35,85	35,4	0,04	-0,07

Tabella 19 - Tratto n. 2 da Zibello a Torricella (S28A – S33). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 11.850 m3/s). In colore verde i livelli misurati, in colore giallo i livelli ricostruiti dall'Autorità di bacino del F. Po.

Sez	Progr. (Km)	Livelli Piena 2000 (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
35	423,9	31,50	31,34	31,50	31,34	0,00	0,00
34A	422,7	31,98	31,34	31,95	31,34	-0,03	0,00
34	419,8	32,36	32,36	32,35	32,36	-0,01	0,00
33C	418,2	32,40	32,37	32,36	32,45	-0,04	0,08
33B	414,8	32,46	32,50	32,51	32,54	0,05	0,04
33A	412,7	32,88	32,93	32,88	32,89	0,00	-0,04
33	409,8	33,41	33,36	33,40	33,43	-0,01	-0,07

Tabella 20 - Tratto n. 3 da Torricella a Casalmaggiore (S33 – S35). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 11.850 m3/s). In colore verde i livelli misurati, in colore giallo i livelli ricostruiti dall'Autorità di bacino del F. Po.

Sez	Progr. (Km)	Livelli Piena 2000 (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
37B	440,4	29,01	29,01	29,01	29,01	0,00	0,00
37A	439,4	29,05	29,04	29,1	29,05	-0,05	-0,01
37BIS	438,8	29,18	29,15	29,17	29,28	0,01	-0,13
37	438,4	29,25	29,21	29,2	29,28	0,05	-0,07
36A	436,1	29,44	29,55	29,46	29,72	-0,02	-0,17
36	434,4	29,86	29,55	29,92	29,73	-0,06	-0,18
35F	432,5	29,94	29,90	30,04	29,98	-0,10	-0,08
35E	431,2	30,09	30,05	30,16	30,1	-0,07	-0,05
35D	429,1	30,65	30,61	30,5	30,6	0,15	0,01
35C	426,4	30,93	30,96	31,01	30,97	-0,08	-0,01
35B	424,7	31,08	31,02	31,3	31,15	-0,22	-0,13
35A	424,5	31,22	31,48	31,34	31,28	-0,12	0,20
35	423,9	31,50	31,34	31,43	31,29	0,07	0,05

Tabella 21 - Tratto n. 4 da Casalmaggiore a Boretto (S35 – S37B). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 11.900 m3/s). In colore verde i livelli misurati, in colore giallo i livelli ricostruiti dall'Autorità di bacino del F. Po.

Sez	Progr. (Km)	Livelli Piena 2000 (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
39A	451,9	27,15	27,18	27,15	27,18	0,00	0,00
39	450,7	27,38	27,31	27,28	27,36	0,10	-0,05
38E	449,4	27,52	27,50	27,49	27,39	0,03	0,11
38D1	448,5	27,68	27,62	27,63	27,63	0,05	-0,01
38D	447,9	27,80	27,75	27,74	27,78	0,06	-0,03
38C	447,0	28,08	28,05	27,82	28,11	0,26	-0,06
38B	446,0	28,15	28,13	28,15	28,2	0,00	-0,07
38A	445,3	28,40	28,30	28,30	28,34	0,10	-0,04
38	443,3	28,63	28,44	28,64	28,5	-0,01	-0,06
37C	441,6	28,69	28,72	28,71	28,75	-0,02	-0,03
37B	440,4	29,01	29,01	29,01	29,00	0,00	0,01

Tabella 22 - Tratto n. 5 da Boretto a Dosolo (S37B – S39A). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 11.900 m3/s). In colore verde i livelli misurati, in colore giallo i livelli ricostruiti dall'Autorità di bacino del F. Po.

Sez	Progr. (Km)	Livelli Piena 2000 (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
42B	472,4	24,16	24,18	24,16	24,18	0,00	0,00
42A	471,4	24,38	24,46	24,5	24,32	-0,12	0,14
42	472,1	24,63	24,60	24,53	24,63	0,10	-0,03
41B	470,9	24,79	24,82	25,08	25,22	-0,29	-0,40
41A	469,8	25,14	25,32	25,17	25,24	-0,03	0,08
41	469,0	25,34	25,54	25,32	25,31	0,02	0,23
40E	0,0	25,51	25,70	25,62	25,6	-0,11	0,10
40D	466,5	25,67	25,73	25,73	25,76	-0,06	-0,03
40C	465,6	25,80	25,77	25,87	25,83	-0,07	-0,06
40B	463,1		25,98				
40A	461,8	25,97	26,01	26,1	26,04	-0,13	-0,03
40	460,4	26,28	26,09	26,29	26,24	-0,01	-0,15
39F	459,5	26,31	26,24	26,32	26,25	-0,01	-0,01
39E	457,7	26,48	26,45	26,4	26,42	0,08	0,03
39D	455,9	26,54	26,66	26,59	26,68	-0,05	-0,02
39C	454,3	26,90	26,87	26,87	26,72	0,03	0,15
39B	453,1	27,00	26,96	27,02	26,9	-0,02	0,06
39A	451,9	27,15	27,18	27,18	27,18	-0,03	0,00

Tabella 23 - Tratto n. 6 da Dosolo a Borgoforte (S39A – S42B). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 11.800 m3/s). In colore verde i livelli misurati, in colore giallo i livelli ricostruiti dall'Autorità di bacino del F. Po.

Sez	Progr. (Km)	Livelli Piena 2000 (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
46	492,1	21,53	21,56	21,53	21,56	0,00	0,00
45C	490,9	21,87	21,88	21,82	21,95	0,05	-0,07
45B	489,2	22,20	22,25	22,38	22,25	-0,18	0,00
45A	488,1	22,38	22,35	22,52	22,4	-0,14	-0,05
45	486,9	22,46	22,47	22,5	22,48	-0,04	-0,01
44C	486,2	22,54	22,50	22,54	22,75	0,00	-0,25
44B	485,0	22,54	22,55	22,54	22,75	0,00	-0,20
44A	483,9	22,54	22,75	22,54	22,76	0,00	-0,01
44	482,6	22,78	23,06	22,98	22,85	-0,20	0,21
43B	481,5	23,00	23,14	23,06	22,95	-0,06	0,19
43A	480,7	23,18	23,2	23,1	23,18	0,08	0,02
43BIS	480,3	23,26	23,24	23,2	23,18	0,06	0,06
43	479,7	23,35	23,32	23,28	23,32	0,07	0,00
42F	478,7	23,51	23,60	23,67	23,67	-0,16	-0,07
42E	477,7	23,78	23,75	23,78	23,75	0,00	0,00
42D	476,6	23,91	23,90	23,85	23,9	0,06	0,00
42C	473,5	24,13	24,04	24,14	24,18	-0,01	-0,14
42B	472,4	24,16	24,18	24,2	24,25	-0,04	-0,07

Tabella 24 - Tratto n. 7 da Borgoforte a Correggio Micheli (S42B – S46). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 11.800 m3/s). In colore verde i livelli misurati, in colore giallo i livelli ricostruiti dall'Autorità di bacino del F. Po.

Sez	Progr. (Km)	Livelli Piena 2000 (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
53A	510,3	18,93	18,94	18,93	18,94	0,00	0,00
53	510,1	18,96	18,96	18,94	18,94	0,02	0,02
52	508,7	19,02	19,06	19,06	19,08	-0,04	-0,02
51	508,7	19,10	19,16	19,71	19,48	-0,61	-0,32
50	509,5	19,18	19,08	19,83	19,38	-0,65	-0,30
49B	507,3	19,31	19,34	19,88	19,95	-0,57	-0,61
49A	506,1	19,58	19,53	19,97	20,01	-0,39	-0,48
49	505,0	19,74	19,72	19,99	20,02	-0,25	-0,30
48D	503,9	19,90	19,93	20,1	20,08	-0,20	-0,15
48C	502,7	20,06	20,08	20,14	20,18	-0,08	-0,10
48B	501,4	20,20	20,23	20,22	20,3	-0,02	-0,07
48A	500,3	20,31	20,32	20,39	20,39	-0,08	-0,07
48	499,3	20,37	20,24	20,4	20,38	-0,03	-0,14
47C	498,3	20,56	20,62	20,47	20,62	0,09	0,00
47B	497,1	20,71	20,83	20,6	20,66	0,11	0,17
47A	496,1	20,85	20,9	20,92	20,86	-0,07	0,04
47	495,4	21,05	21,1	21,08	21	-0,03	0,10
46C	494,5	21,26	21,26	21,25	21,15	0,01	0,11
46B	493,5	21,37	21,38	21,3	21,38	0,07	0,00
46A	492,8	21,46	21,44	21,4	21,55	0,06	-0,11
46	492,1	21,53	21,56	21,56	21,56	-0,03	0,00

Tabella 25 - Tratto n. 8 da Correggio Micheli a Ostiglia (S46 – S53A). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 10.450 m3/s). In colore verde i livelli misurati, in colore giallo i livelli ricostruiti dall'Autorità di bacino del F. Po.

Sez	Progr. (Km)	Livelli Piena 2000 (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
62	549,8	13,84	13,84	13,84	13,84	0,00	0,00
61B	547,8	14,09	14,07	14,05	14,09	0,04	-0,02
61A	546,4	14,24	14,28	14,3	14,5	-0,06	-0,22
61	544,8	14,42	14,42	14,42	14,53	0,00	-0,11
60A	544,2	14,49	14,49	14,4	14,5	0,09	-0,01
60	543,5	14,56	14,6	14,75	14,72	-0,19	-0,12
59D	542,2	14,98	14,99	15	14,83	-0,02	0,16
59C	540,7	15,13	15,13	15,08	14,95	0,05	0,18
59B	539,2	15,28	15,28	15,36	15,39	-0,08	-0,11
59A	537,9	15,40	15,38	15,38	15,43	0,02	-0,05
59	537,0	15,49	15,45	15,55	15,47	-0,06	-0,02
58A	535,9	15,60	15,60	15,57	15,57	0,03	0,03
58	534,9	15,70	15,66	15,73	15,72	-0,03	-0,06
57B	533,4	15,84	15,86	15,86	15,96	-0,02	-0,10
57A	532,2	15,96	15,96	15,92	15,98	0,04	-0,02
57	530,5	16,14	16,14	16,28	16,26	-0,14	-0,12
56D	529,2	16,41	16,4	16,35	16,3	0,06	0,10
56C	527,9	16,61	16,58	16,37	16,55	0,24	0,03
56B	527,1	16,60	16,68	16,61	17,05	-0,01	-0,37
56A	525,1	16,91	16,93	17	17,22	-0,09	-0,29
56	523,1	17,22	17,24	17,74	17,28	-0,52	-0,04
55B	522,6	17,32	17,24	17,74	17,23	-0,42	0,01
55A	521,8	17,58	17,52	17,76	17,53	-0,18	-0,01
55	519,9	17,81	17,74	17,88	18	-0,07	-0,26
54A	518,6	17,93	17,91	17,93	18,02	0,00	-0,11
54	516,4	18,29	18,01	18,28	18,15	0,01	-0,14
53D	514,2	18,65	18,32	18,54	18,47	0,11	-0,15
53C	513,1	18,73	18,70	18,57	18,68	0,16	0,02
53B	511,7	18,85	18,82	18,75	18,75	0,10	0,07
53A	510,3	18,93	18,94	18,9	18,9	0,03	0,04

Tabella 26 - Tratto n. 9 da Ostiglia a Gaiba (S53A – S62). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 10.450 m3/s). In colore verde i livelli misurati, in colore giallo i livelli ricostruiti dall'Autorità di bacino del F. Po.

Sez	Progr. (Km)	Livelli Piena 2000 (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
65A	561,3	11,76	11,78	11,76	11,78	0,00	0,00
65	564,2	11,84	11,87	11,84	11,87	0,00	0,00
64D	564,0	11,87	11,89	11,85	11,8	0,02	0,09
64C	562,8	12,11	12,17	12,18	12,35	-0,07	-0,18
64B	561,6	12,36	12,42	12,26	12,45	0,10	-0,03
64A	559,7	12,84	12,84	12,85	12,85	-0,01	-0,01
64	559,4	12,90	12,93	12,93	12,95	-0,03	-0,02
63A	553,9	13,07	13,09	13,2	13,17	-0,13	-0,08
63	553,5	13,19	13,22	13,33	13,3	-0,14	-0,08
62B	553,5	13,44	13,45	13,6	13,55	-0,16	-0,10
62A	551,5	13,66	13,66	13,7	13,75	-0,04	-0,09
62	549,8	13,84	13,84	13,85	13,83	-0,01	0,01

Tabella 27 - Tratto n. 10 da Gaiba a Pontelagoscuro (S62 – S65A). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 9.750 m3/s). In colore verde i livelli misurati, in colore giallo i livelli ricostruiti dall'Autorità di bacino del F. Po.

Sez	Progr. (Km)	Livelli Piena 2000 (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
73A	600,6	7,30	7,30	7,30	7,30	0,00	0,00
73	599,1	7,51	7,53	7,63	7,63	-0,12	-0,10
72A	597,2	7,79	7,79	7,75	7,75	0,04	0,04
72	595,4	8,04	8,08	8,05	8,10	-0,01	-0,02
71B	593,9	8,27	8,25	8,37	8,27	-0,10	-0,02
71A	591,8	8,51	8,54	8,70	8,72	-0,19	-0,18
71	589,1	8,78	8,79	8,82	8,77	-0,04	0,02
70C	586,8	8,98	9,01	8,92	8,97	0,06	0,04
70B	585,0	9,17	9,17	9,27	9,27	-0,10	-0,10
70A	582,7	9,42	9,45	9,54	9,46	-0,12	-0,01
70	580,8	9,63	9,62	9,75	9,64	-0,12	-0,02
69B	578,6	9,87	9,87	9,92	10,01	-0,05	-0,14
69A	576,8	10,09	10,09	10,10	10,10	-0,01	-0,01
69	576,5	10,37	10,37	10,35	10,35	0,02	0,02
68B	575,0	10,57	10,52	10,65	10,52	-0,08	0,00
68A	573,7	10,72	10,67	10,83	10,86	-0,11	-0,19
68	572,7	10,89	10,91	10,85	10,98	0,04	-0,07
67A	571,6	10,97	10,98	11,01	11,07	-0,04	-0,09
67	570,5	11,04	11,08	11,08	11,03	-0,04	0,05
66A	567,8	11,35	11,37	11,34	11,33	0,01	0,04
66	565,4	11,50	11,50	11,51	11,50	-0,01	0,00
65B	562,9	11,61	11,59	11,69	11,73	-0,08	-0,14
65A	561,3	11,76	11,78	11,70	11,70	0,06	0,08

Tabella 28 - Tratto n. 11 da Pontelagoscuro a Goro (S65A – S73A). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 9.750 m3/s). In colore verde i livelli misurati, in colore giallo i livelli ricostruiti dall'Autorità di bacino del F. Po.

Per una migliore interpretazione a carattere globale nella seguente Tabella 29 si sintetizzano i valori delle differenze riportati nelle tabelle sopra esposte in termini di medie e scarti quadratici medi dei valori assoluti delle differenze stesse (in m).

Tratto			Medie delle differenze di livello in valore assoluto (m)		Scarti q. m. delle differenze di livello in valore assoluto (m)	
n°	da	a	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
1	Cremona (S25B)	Zibello (S28A)	0,43	0,26	0,31	0,14
2	Zibello (S28A)	Torricella (S33)	0,14	0,06	0,20	0,03
3	Torricella (S33)	Casalmaggiore (S35)	0,02	0,04	0,02	0,03
4	Casalmaggiore (S35)	Boretto (S37B)	0,08	0,09	0,06	0,07
5	Boretto (S37B)	Dosolo (S39A)	0,06	0,05	0,08	0,03
6	Dosolo (S39A)	Borgoforte (S42B)	0,07	0,10	0,07	0,10
7	Borgoforte (S42B)	Correggio Micheli (S46)	0,07	0,08	0,07	0,09
8	Correggio Micheli (S46)	Ostiglia (S53A)	0,17	0,16	0,21	0,17
9	Ostiglia (S53A)	Gaiba (S62)	0,10	0,10	0,12	0,09
10	Gaiba (S62)	Pontelagoscuro (S65A)	0,06	0,06	0,06	0,05
11	Pontelagoscuro (S65A)	Po di Goro (S73A)	0,07	0,06	0,05	0,06

Tabella 29 – Medie e scarti q. m. delle differenze di livello in valore assoluto (in m) rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale negli undici tratti in sponda sinistra e destra per la piena 2000.

Come si può rilevare, i valori medi delle differenze in valore assoluto tra valori misurati e valori ricostruiti con il modello risultano contenuti pressoché in tutti i tratti, in circa 10 – 15 cm, con scarti quadratici medi dello stesso ordine di grandezza. Solo nei tratti 1 (da Cremona a Zibello) e 8 (da Correggio Micheli a Ostiglia) tali medie assumono valori poco maggiori.

Nel complesso si ritiene che la taratura del modello, in relazione ai sopra indicati valori adottati per i coefficienti di scabrezza, sia pienamente soddisfacente, essendosi ottenute differenze largamente comprese sia negli ordinari margini di approssimazione con cui sono state effettuate le misure sperimentali di livello al colmo delle piena del 2000 sia negli ordinari margini di incertezza delle stime modellistiche.

5.4 SIMULAZIONE DELLA PIENA DI RIFERIMENTO PAI T200 NELLO STATO ATTUALE DEL FIUME

Terminata la precedente fase di taratura con la validazione dei risultati ottenuti, gli undici modelli dei tratti di interesse, riferiti allo stato attuale del fiume, sono stati utilizzati per condurre le simulazioni della piena di riferimento PAI T200. Le simulazioni eseguite hanno permesso di caratterizzare la dinamica fluviale (livelli, tiranti e velocità) che si genera al passaggio della piena di riferimento (PAI T200) lungo tutto il tratto di fiume compreso tra Cremona e il Po di Goro.

Per una analisi globale dei campi di moto ottenuti dal modello per la piena PAI T200 si rimanda alle cartografie riportate nell'Allegato 11, Tavole da 1 a 21, per tutto il tratto di Po di interesse. In particolare sono riportati i livelli idrici nelle tavole dell'Allegato 11.2, i tiranti idrici nelle tavole dell'Allegato 11.3, i campi delle velocità in piena nelle tavole dell'Allegato 11.4.

I risultati in termini di livello idrico così ottenuti per la piena di riferimento PAI T200 sono stati confrontati con i livelli di piena ufficiali riportati nel PAI. Nelle seguenti tabelle sono riportati tali valori e il loro confronto.

Sez	Progr. (Km)	Livello PAI (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
28A	394,6	36,61	36,61	36,28	36,15	0,33	0,46
28BIS	391,0	37,17	37,17	36,47	37,00	0,70	0,17
28	389,3	37,43	37,43	36,68	37,22	0,75	0,21
27C	386,9	38,06	38,06	37,08	37,51	0,98	0,55
27B	386,4	38,17	38,17	37,52	37,70	0,65	0,47
27A	384,8	38,44	38,44	38,10	38,24	0,34	0,20
27	383,0	38,84	38,84	38,67	38,53	0,17	0,31
26C	381,2	39,35	39,35	38,87	38,78	0,48	0,57
26B	378,9	39,88	39,88	39,60	39,32	0,28	0,56
26A	376,7	40,53	40,53	40,34	40,60	0,19	-0,07
26	375,1	40,93	40,93	41,17	40,90	-0,24	0,03
25B	374,7	40,94	40,94	41,47	41,40	-0,53	-0,46
Medie						0,34	0,25

Tabella 30 - Tratto n. 1 da Cremona a Zibello (S25B – S28A). Livelli idrici in m s.m. per la piena PAI T200 (portata al colmo Q200 = 14.300 m3/s) ottenuti dal modello dello stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra e loro confronto con i livelli ufficiali PAI.

Sez	Progr. (Km)	Livello PAI (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
33	409,8	34,34	34,34	34,39	34,13	-0,05	0,21
32A	408,6	34,44	34,44	34,46	34,33	-0,02	0,11
32	406,2	34,63	34,63	34,65	34,7	-0,02	-0,07
31	403,6	34,8	34,8	35,19	35,23	-0,39	-0,43
30B	402,5	35,24	35,24	35,26	35,84	-0,02	-0,60
30A	401,2	34,94	34,94	35,34	35,68	-0,40	-0,74
30	399,2	35,66	35,66	35,91	35,90	-0,25	-0,24
29	396,0	36,35	36,35	36,27	36,08	0,08	0,27
28A	394,6	36,61	36,61	36,28	36,15	0,33	0,46
Medie						-0,08	-0,11

Tabella 31 - Tratto n. 2 da Zibello a Torricella (S28A – S33). Livelli idrici in m s.m. per la piena PAI T200 (portata al colmo Q200 = 14.300 m3/s) ottenuti dal modello dello stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra e loro confronto con i livelli ufficiali PAI.

Sez	Progr. (Km)	Livello PAI (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
35	423,9	32,68	32,68	32,24	32,54	0,44	0,14
34A	422,7	32,92	32,92	32,93	32,54	-0,01	0,38
34	419,8	33,41	33,41	33,31	33,31	0,10	0,10
33C	418,2	33,56	33,56	33,32	33,42	0,24	0,14
33B	414,8	33,85	33,85	33,47	33,49	0,38	0,36
33A	412,7	34,03	34,03	33,77	33,77	0,26	0,26
33	409,8	34,34	34,34	34,39	34,13	-0,05	0,21
Medie						0,19	0,23

Tabella 32 - Tratto n. 3 da Torricella a Casalmaggiore (S33 – S35). Livelli idrici in m s.m. per la piena PAI T200 (portata al colmo Q200 = 14.300 m3/s) ottenuti dal modello dello stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra e loro confronto con i livelli ufficiali PAI.

Sez	Progr. (Km)	Livello PAI (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
37B	440,4	29,41	29,41	29,62	29,73	-0,21	-0,32
37A	439,4	29,55	29,55	29,81	29,8	-0,26	-0,25
37BIS	438,8	29,65	29,65	29,88	29,96	-0,23	-0,31
37	438,4	29,67	29,67	29,86	30,08	-0,19	-0,41
36A	436,1	30,01	30,01	30,20	30,49	-0,19	-0,48
36	434,4	30,28	30,28	30,7	30,54	-0,42	-0,26
35F	432,5	30,60	30,60	30,81	30,74	-0,21	-0,14
35E	431,2	30,83	30,83	30,93	30,92	-0,10	-0,09
35D	429,1	31,18	31,18	31,26	31,33	-0,08	-0,15
35C	426,4	31,93	31,93	31,8	31,72	0,13	0,21
35B	424,7	31,43	31,43	32,1	32,2	-0,67	-0,77
35A	424,5	32,52	32,52	32,18	32,54	0,34	-0,02
35	423,9	32,68	32,68	32,24	32,54	0,44	0,14
Medie						-0,13	-0,22

Tabella 33 - Tratto n. 4 da Casalmaggiore a Boretto (S35 – S37B). Livelli idrici in m s.m. per la piena PAI T200 (portata al colmo Q200 = 13.700 m3/s) ottenuti dal modello dello stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra e loro confronto con i livelli ufficiali PAI.

Sez	Progr. (Km)	Livello PAI (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
39A	451,9	28,02	28,02	27,88	27,98	0,14	0,04
39	450,7	28,11	28,11	28,1	28,2	0,01	-0,09
38E	449,4	28,28	28,28	28,30	28,22	-0,02	0,06
38D1	448,5	28,42	28,42	28,44	28,42	-0,02	0,00
38D	447,9	28,48	28,48	28,53	28,62	-0,05	-0,14
38C	447,0	28,58	28,58	28,62	28,89	-0,04	-0,31
38B	446,0	28,70	28,70	28,92	28,98	-0,22	-0,28
38A	445,3	28,79	28,79	29,03	29,11	-0,24	-0,32
38	443,3	28,99	28,99	29,37	29,3	-0,38	-0,31
37C	441,6	29,23	29,23	29,42	29,57	-0,19	-0,34
37B	440,4	29,41	29,41	29,62	29,73	-0,21	-0,32
Medie						-0,11	-0,18

Tabella 34 - Tratto n. 5 da Boretto a Dosolo (S37B – S39A). Livelli idrici in m s.m. per la piena PAI T200 (portata al colmo Q200 = 13.700 m3/s) ottenuti dal modello dello stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra e loro confronto con i livelli ufficiali PAI.

Sez	Progr. (Km)	Livello PAI (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
42B	472,4	26,10	26,10	25,53	25,51	0,57	0,59
42A	471,4	26,26	26,26	25,80	25,66	0,46	0,60
42	472,1	26,42	26,42	25,81	25,70	0,61	0,72
41B	470,9	26,59	26,59	26,31	26,43	0,28	0,16
41A	469,8	26,73	26,73	26,38	26,45	0,35	0,28
41	469,0	26,85	26,85	26,58	26,50	0,27	0,35
40E	0,0	26,94	26,94	26,81	26,77	0,13	0,17
40D	466,5	27,02	27,02	26,88	26,90	0,14	0,12
40C	465,6	27,09	27,09	27,00	26,98	0,09	0,11
40B	463,1	27,22	27,22	27,19	27,04	0,03	0,18
40A	461,8	27,29	27,29	27,20	27,14	0,09	0,15
40	460,4	27,37	27,37	27,37	27,31	0,00	0,06
39F	459,5	27,45	27,45	27,39	27,32	0,06	0,13
39E	457,7	27,58	27,58	27,43	27,48	0,15	0,10
39D	455,9	27,71	27,71	27,58	27,67	0,13	0,04
39C	454,3	27,84	27,84	27,79	27,70	0,05	0,14
39B	453,1	27,93	27,93	27,86	27,79	0,07	0,14
39A	451,9	28,02	28,02	27,88	27,98	0,14	0,04
Medie						0,20	0,23

Tabella 35 - Tratto n. 6 da Dosolo a Borgoforte (S39A – S42B). Livelli idrici in m s.m. per la piena PAI T200 (portata al colmo Q200 = 13.100 m3/s) ottenuti dal modello dello stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra e loro confronto con i livelli ufficiali PAI.

Sez	Progr. (Km)	Livello PAI (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
46	492,1	23,32	23,32	23,25	23,25	0,07	0,07
45C	490,9	23,39	23,39	23,46	23,67	-0,07	-0,28
45B	489,2	23,7	23,7	24,00	23,87	-0,30	-0,17
45A	488,1	23,74	23,74	24,09	24,02	-0,35	-0,28
45	486,9	23,80	23,80	24,10	24,08	-0,30	-0,28
44C	486,2	23,98	23,98	24,10	24,27	-0,12	-0,29
44B	485,0	24,27	24,27	24,10	24,27	0,17	0,00
44A	483,9	24,54	24,54	24,1	24,28	0,44	0,26
44	482,6	24,85	24,85	24,41	24,28	0,44	0,57
43B	481,5	25,03	25,03	24,47	24,3	0,56	0,73
43A	480,7	25,15	25,15	24,48	24,36	0,67	0,79
43BIS	480,3	25,22	25,22	24,59	24,5	0,63	0,72
43	479,7	25,29	25,29	24,53	24,62	0,76	0,67
42F	478,7	25,43	25,43	25	25	0,43	0,43
42E	477,7	25,58	25,58	25,1	25,04	0,48	0,54
42D	476,6	25,74	25,74	25,12	25,17	0,62	0,57
42C	473,5	25,94	25,94	25,35	25,45	0,59	0,49
42B	472,4	26,10	26,10	25,53	25,51	0,57	0,59
Medie						0,29	0,29

Tabella 36 - Tratto n. 7 da Borgoforte a Correggio Micheli (S42B – S46). Livelli idrici in m s.m. per la piena PAI T200 (portata al colmo Q200 = 13.100 m3/s) ottenuti dal modello dello stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra e loro confronto con i livelli ufficiali PAI.

Sez	Progr. (Km)	Livello PAI (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
53A	510,3	21,45	21,45	20,5	20,63	0,95	0,82
53	510,1	21,53	21,53	20,53	20,66	1,00	0,87
52	508,7	21,87	21,87	20,63	20,80	1,24	1,07
51	508,7	21,99	21,99	21,53	21,20	0,46	0,79
50	509,5	22,19	22,19	21,57	20,96	0,62	1,23
49B	507,3	22,23	22,23	21,61	21,68	0,62	0,55
49A	506,1	22,28	22,28	21,66	21,72	0,62	0,56
49	505,0	22,32	22,32	21,67	21,73	0,65	0,59
48D	503,9	22,37	22,37	21,78	21,77	0,59	0,60
48C	502,7	22,42	22,42	21,81	21,91	0,61	0,51
48B	501,4	22,47	22,47	21,87	21,94	0,60	0,53
48A	500,3	22,52	22,52	22,04	22,03	0,48	0,49
48	499,3	22,56	22,56	22,05	22,04	0,51	0,52
47C	498,3	22,69	22,69	22,1	22,22	0,59	0,47
47B	497,1	22,80	22,80	22,2	22,23	0,60	0,57
47A	496,1	22,92	22,92	22,56	22,47	0,36	0,45
47	495,4	23,00	23,00	22,67	22,59	0,33	0,41
46C	494,5	23,08	23,08	22,89	22,71	0,19	0,37
46B	493,5	23,18	23,18	22,97	23,01	0,21	0,17
46A	492,8	23,25	23,25	22,88	23,27	0,37	-0,02
46	492,1	23,32	23,32	23,25	23,25	0,07	0,07
Medie						0,56	0,55

Tabella 37 - Tratto n. 8 da Correggio Micheli a Ostiglia (S46 – S53A). Livelli idrici in m s.m. per la piena PAI T200 (portata al colmo Q200 = 13.100 m3/s) ottenuti dal modello dello stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra e loro confronto con i livelli ufficiali PAI.

Sez	Progr. (Km)	Livello PAI (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
62	549,8	16,2	16,2	16,16	16,15	0,04	0,05
61B	547,8	16,55	16,55	16,43	16,4	0,12	0,15
61A	546,4	16,75	16,75	16,5	16,79	0,25	-0,04
61	544,8	16,94	16,94	16,61	16,75	0,33	0,19
60A	544,2	16,95	16,95	16,55	16,7	0,40	0,25
60	543,5	16,97	16,97	16,94	16,94	0,03	0,03
59D	542,2	17,12	17,12	17,21	17,04	-0,09	0,08
59C	540,7	17,30	17,30	17,24	17,1	0,06	0,20
59B	539,2	17,47	17,47	17,5	17,52	-0,03	-0,05
59A	537,9	17,62	17,62	17,51	17,57	0,11	0,05
59	537,0	17,73	17,73	17,66	17,59	0,07	0,14
58A	535,9	17,86	17,86	17,67	17,66	0,19	0,20
58	534,9	17,98	17,98	17,82	17,84	0,16	0,14
57B	533,4	18,19	18,19	17,92	18,04	0,27	0,15
57A	532,2	18,37	18,37	18,01	18,08	0,36	0,29
57	530,5	18,62	18,62	18,34	18,3	0,28	0,32
56D	529,2	18,73	18,73	18,41	18,34	0,32	0,39
56C	527,9	18,85	18,85	18,39	18,60	0,46	0,25
56B	527,1	18,90	18,90	18,59	19,06	0,31	-0,16
56A	525,1	19,07	19,07	18,94	19,14	0,13	-0,07
56	523,1	19,26	19,26	19,67	19,2	-0,41	0,06
55B	522,6	19,32	19,32	19,67	19,2	-0,35	0,12
55A	521,8	19,43	19,43	19,68	19,36	-0,25	0,07
55	519,9	19,67	19,67	19,78	19,89	-0,11	-0,22
54A	518,6	19,85	19,85	19,84	19,93	0,01	-0,08
54	516,4	20,16	20,16	20,14	20,09	0,02	0,07
53D	514,2	20,62	20,62	20,37	20,31	0,25	0,31
53C	513,1	20,86	20,86	20,38	20,50	0,48	0,36
53B	511,7	21,17	21,17	20,41	20,5	0,76	0,67
53A	510,3	21,45	21,45	20,5	20,63	0,95	0,82
Medie						0,17	0,16

Tabella 38 - Tratto n. 9 da Ostiglia a Gaiba (S53A – S62). Livelli idrici in m s.m. per la piena PAI T200 (portata al colmo Q200 = 13.100 m3/s) ottenuti dal modello dello stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra e loro confronto con i livelli ufficiali PAI.

Sez	Progr. (Km)	Livello PAI (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
65A	561,3	13,81	13,81	13,67	13,7	0,14	0,11
65	564,2	13,57	13,57	13,81	13,8	-0,24	-0,23
64D	564,0	13,57	13,57	13,84	13,8	-0,27	-0,23
64C	562,8	14,07	14,07	14,44	14,63	-0,37	-0,56
64B	561,6	14,57	14,57	14,58	14,78	-0,01	-0,21
64A	559,7	15,31	15,31	15,12	15,1	0,19	0,21
64	559,4	15,41	15,41	15,17	15,18	0,24	0,23
63A	553,9	15,68	15,68	15,39	15,39	0,29	0,29
63	553,5	15,80	15,80	15,53	15,47	0,27	0,33
62B	553,5	15,97	15,97	15,83	15,82	0,14	0,15
62A	551,5	16,10	16,10	15,91	15,9	0,19	0,2
62	549,8	16,20	16,20	16,16	16,15	0,04	0,05
Medie						0,05	0,03

Tabella 39 - Tratto n. 10 da Gaiba a Pontelagoscuro (S62 – S65A). Livelli idrici in m s.m. per la piena PAI T200 (portata al colmo Q200 = 13.000 m3/s) ottenuti dal modello dello stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra e loro confronto con i livelli ufficiali PAI.

Sez	Progr. (Km)	Livello PAI (m s.m.)		Livelli Modello (m s.m.)		Differenze (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
73A	600,6			8,87	9,12		
73	599,1	9,05	9,05	9,25	9,27	-0,20	-0,22
72A	597,2			9,26	9,28		
72	595,4	9,54	9,54	9,67	9,73	-0,13	-0,19
71B	593,9			10,1	9,98		
71A	591,8			10,49	10,5		
71	589,1	10,33	10,33	10,62	10,52	-0,29	-0,19
70C	586,8			10,75	10,78		
70B	585,0			11,11	11,10		
70A	582,7			11,4	11,33		
70	580,8	11,22	11,22	11,65	11,46	-0,43	-0,24
69B	578,6			11,8	11,90		
69A	576,8			11,9	11,97		
69	576,5	12,00	12,00	12,24	12,24	-0,24	-0,24
68B	575,0			12,55	12,41		
68A	573,7			12,88	12,90		
68	572,7	12,64	12,64	12,81	13,06	-0,17	-0,42
67A	571,6			13,05	13,13		
67	570,5	12,82	12,82	13,2	13,14	-0,38	-0,32
66A	567,8			13,48	13,48		
66	565,4	13,30	13,30	13,68	13,67	-0,38	-0,37
65B	562,9			13,82	13,90		
65A	561,3			13,67	13,70		
Medie						-0,28	-0,27

Tabella 40 - Tratto n. 11 da Pontelagoscuro a Goro (S65A – S73A). Livelli idrici in m s.m. per la piena PAI T200 (portata al colmo Q200 = 13.000 m3/s) ottenuti dal modello dello stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra e loro confronto con i livelli ufficiali PAI.

Come si evince dalle precedenti tabelle le differenze riscontrate tra i livelli del PAI e quelli ricostruiti con il modello sono sia positive (livelli PAI maggiori di quelli ricostruiti) sia negative (livelli PAI minori di quelli ricostruiti). In proposito si ricorda che si tratta di un confronto tra due ricostruzioni modellistiche del tutto differenti, dal momento che i livelli PAI sono stati desunti da una modellazione monodimensionale, che quindi conduce al medesimo livello idrico all'interno di ogni sezione fluviale di calcolo, mentre quelli qui presentati derivano dai complessi campi di moto generati dalla modellazione bidimensionale prima descritta. I livelli qui ricostruiti con il modello bidimensionale risultano mediamente superiori a quelli del PAI nei tratti 2, 4, 5, 11 con differenze dell'ordine di 10-20 cm (solo nel tratto 11 sono circa di 30 cm), mentre risultano mediamente inferiori negli altri tratti con differenze dello stesso ordine di grandezza di 10 – 20 cm. Solo nei tratti 1 (da Cremona a Zibello) e 8 (da Correggio Micheli a Ostiglia) le differenze medie sono rispettivamente inferiori (cioè con livelli qui ricostruiti maggiori di quelli PAI) di circa 30 e 50 cm, a causa della particolare complessità dei campi di moto di questi due tratti.

Per una migliore interpretazione a carattere globale, nella seguente Tabella 41 si sintetizzano i valori delle differenze riportati nelle tabelle sopra esposte in termini di medie e scarti quadratici medi delle differenze in valore assoluto (in m), dal momento che tali valori assoluti mettono maggiormente in risalto le differenze tra i due risultati modellistici.

Tratto			Medie delle differenze di livello in valore assoluto (m)		Scarti q. m. delle differenze di livello in valore assoluto (m)	
n°	da	a	SPSX	SPDX	SPSX	SPDX
1	Cremona (S25B)	Zibello (S28A)	0,47	0,34	0,26	0,20
2	Zibello (S28A)	Torricella (S33)	0,17	0,35	0,17	0,23
3	Torricella (S33)	Casalmaggiore (S35)	0,21	0,23	0,16	0,11
4	Casalmaggiore (S35)	Boretto (S37B)	0,27	0,27	0,16	0,20
5	Boretto (S37B)	Dosolo (S39A)	0,14	0,20	0,12	0,13
6	Dosolo (S39A)	Borgoforte (S42B)	0,20	0,23	0,18	0,20
7	Borgoforte (S42B)	Correggio Micheli (S46)	0,42	0,43	0,21	0,24
8	Correggio Micheli (S46)	Ostiglia (S53A)	0,56	0,56	0,27	0,29
9	Ostiglia (S53A)	Gaiba (S62)	0,25	0,20	0,22	0,18
10	Gaiba (S62)	Pontelagoscuro (S65A)	0,20	0,23	0,10	0,13
11	Pontelagoscuro (S65A)	Po di Goro (S73A)	0,28	0,27	0,11	0,09

Tabella 41 – Medie e scarti q. m. delle differenze in valore assoluto (in m) tra i valori ufficiali del PAI e quelli e ottenuti dal modello allo stato attuale negli undici tratti in sponda sinistra e destra per la piena PAI T200.

Come si può rilevare, sia i valori medi sia gli scarti quadratici medi indicano differenze che da un lato possono ritenersi giustificate dalla fondamentale diversità delle due modellazioni, dall'altro, sempre in base alla suddetta diversità, indicano come i risultati della qui presentata modellazione bidimensionale debbano allo stato attuale ritenersi maggiormente rappresentativi delle condizioni idrauliche della piena di riferimento PAI T200 lungo il tratto di Po qui considerato.

5.5 SICUREZZA IDRAULICA NELLO STATO ATTUALE DEL FIUME. VALORI DEI FRANCHI DEGLI ARGINI MAESTRI

Il confronto tra i risultati ottenuti dalle sopra descritte simulazioni della piena di riferimento PAI T200 e le quote di coronamento degli argini maestri del fiume Po lungo il tratto d'interesse ha consentito di aggiornare i valori dei franchi arginali riportati nello studio del 2007 dell'Autorità di bacino del fiume Po denominato "Rappresentazione delle condizioni di rischio residuale lungo l'asta del fiume Po da Torino al mare: sintesi delle conoscenze e report descrittivi". In tale studio i franchi arginali sono stati definiti come differenza tra le quote di coronamento degli argini maestri rilevate durante la

campagna topografica del 2004/2005 realizzata da AIPo e i livelli idrici della Piena PAI T200 ricostruiti con modello monodimensionale.

Avendo ora i nuovi risultati generati dalla modellazione bidimensionale per la medesima piena PAI T200, esposti nel paragrafo precedente, si sono potuto ricalcolare i corrispondenti nuovi valori dei franchi arginali sempre con riferimento alle quote degli argini maestri rilevate durante la campagna topografica di AIPo del 2004/2005.

Nelle tabelle seguenti si riportano tali nuovi franchi arginali; nelle tabelle sono anche indicate con colorazione differenziata le corrispondenti classi di criticità per sormonto degli argini maestri definite utilizzando la medesima scala di classificazione riportata nel catasto delle arginature del 2007 dell'Autorità di bacino:

- criticità assente franco ≥ 1,00 m;
- criticità bassa 1,00 m > franco > 0,70 m;
- criticità media 0,70 m ≥ franco > 0,30 m;
- criticità elevata franco ≤ 0,30 m o negativo per sormonto.

Sez	Progr. (Km)	Livello Modello (m s.m.)		Quota Argini (m s.m.)		Franco idraulico (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SX	DX
28A	394,6	36,28	36,15	37,30	37,31	1,02	1,16
28BIS	391,0	36,47	37	37,48	38,42	1,01	1,42
28	389,3	36,68	37,22	38,37	38,59	1,69	1,37
27C	386,9	37,08	37,51	38,91	39,02	1,83	1,51
27B	386,4	37,52	37,70	39,00	38,89	1,48	1,19
27A	384,8	38,1	38,24	39,20	38,93	1,10	0,69
27	383,0	38,67	38,53	39,50	39,56	0,83	1,03
26C	381,2	38,87	38,78	40,10	40,28	1,23	1,50
26B	378,9	39,6	39,32	40,55	40,81	0,95	1,49
26A	376,7	40,34	40,60	41,06	41,12	0,72	0,52
26	375,1	41,17	40,90	40,39	41,60	-0,78	0,70
25B	374,7	41,47	41,40	42,81	42,92	1,34	1,52

Tabella 42 - Tratto n. 1 da Cremona a Zibello (S25B – S28A). Franchi arginali in sponda destra e sinistra rispetto i livelli ottenuti dal modello dello stato attuale del fiume Po per la piena PAI T200 (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

Sez	Progr. (Km)	Livello Modello (m s.m.)		Quota Argini (m s.m.)		Franco idraulico (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SX	DX
33	409,8	34,39	34,13	34,93	35,06	0,54	0,93
32A	408,6	34,46	34,33	34,95	35,45	0,49	1,12
32	406,2	34,65	34,70	35,00	35,76	0,35	1,06
31	403,6	35,19	35,23	35,67	35,92	0,48	0,69
30B	402,5	35,26	35,84	35,60	36,23	0,34	0,39
30A	401,2	35,34	35,68	35,64	36,78	0,30	1,10
30	399,2	35,91	35,90	36,00	36,63	0,09	0,73
29	396,0	36,27	36,08	36,86	37,10	0,59	1,02
28A	394,6	36,28	36,15	37,30	37,31	1,02	1,16

Tabella 43 - Tratto n. 2 da Zibello a Torricella (S28A – S33). Franchi arginali in sponda destra e sinistra rispetto i livelli ottenuti dal modello dello stato attuale del fiume Po per la piena PAI T200 (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

Sez	Progr. (Km)	Livello Modello (m s.m.)		Quota Argini (m s.m.)		Franco idraulico (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SX	DX
35	423,9	32,24	32,54	32,5	33,1	0,22	0,60
34A	422,7	32,93	32,54	32,44	33,15	-0,49	0,61
34	419,8	33,31	33,31	33,04	33,40	-0,27	0,09
33C	418,2	33,32	33,42	33,00	33,20	-0,32	-0,22
33B	414,8	33,47	33,49	33,25	33,96	-0,22	0,47
33A	412,7	33,77	33,77	34,35	34,36	0,58	0,59
33	409,8	34,39	34,13	34,93	35,06	0,54	0,93

Tabella 44 - Tratto n. 3 da Torricella a Casalmaggiore (S33 – S35). Franchi arginali in sponda destra e sinistra rispetto i livelli ottenuti dal modello dello stato attuale del fiume Po per la piena PAI T200 (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

Sez	Progr. (Km)	Livello Modello (m s.m.)		Quota Argini (m s.m.)		Franco idraulico (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SX	DX
37B	440,4	29,62	29,73	30,00	30,45	0,38	0,72
37A	439,4	29,81	29,8	30,20	30,10	0,36	0,33
37BIS	438,8	29,88	29,96	30,30	31,10	0,43	1,16
37	438,4	29,86	30,08	30,40	30,20	0,57	0,09
36A	436,1	30,20	30,49	30,50	30,10	0,25	-0,44
36	434,4	30,70	30,54	30,40	t. Enza	-0,31	t. Enza
35F	432,5	30,81	30,74	30,60	31,30	-0,23	0,51
35E	431,2	30,93	30,92	31,00	31,80	0,11	0,87
35D	429,1	31,26	31,33	31,50	32,30	0,24	0,96
35C	426,4	31,80	31,72	31,80	31,70	-0,03	-0,02
35B	424,7	32,10	32,2	32,1	32,00	-0,05	-0,20
35A	424,5	32,18	32,54	32,3	33,10	0,15	0,56
35	423,9	32,24	32,54	32,5	33,10	0,22	0,60

Tabella 45 - Tratto n. 4 da Casalmaggiore a Boretto (S35 – S37B). Franchi arginali in sponda destra e sinistra rispetto i livelli ottenuti dal modello dello stato attuale del fiume Po per la piena PAI T200 (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

Sez	Progr. (Km)	Livello Modello (m s.m.)		Quota Argini (m s.m.)		Franco idraulico (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SX	DX
39A	451,9	27,88	27,98	27,97	28,54	0,09	0,56
39	450,7	28,1	28,2	28,60	28,25	0,50	0,05
38E	449,4	28,30	28,22	28,90	28,54	0,60	0,32
38D1	448,5	28,44	28,42	29,00	28,69	0,56	0,27
38D	447,9	28,53	28,62	29,10	28,57	0,57	-0,05
38C	447,0	28,62	28,89	29,24	28,78	0,62	-0,11
38B	446,0	28,92	28,98	29,06	29,18	0,14	0,20
38A	445,3	29,03	29,11	29,40	29,29	0,37	0,18
38	443,3	29,37	29,3	29,62	29,79	0,25	0,49
37C	441,6	29,42	29,57	29,86	29,86	0,44	0,29
37B	440,4	29,62	29,73	30,00	30,45	0,38	0,72

Tabella 46 - Tratto n. 5 da Boretto a Dosolo (S37B – S39A). Franchi arginali in sponda destra e sinistra rispetto i livelli ottenuti dal modello dello stato attuale del fiume Po per la piena PAI T200 (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

Sez	Progr. (Km)	Livello Modello (m s.m.)		Quota Argini (m s.m.)		Franco idraulico (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SX	DX
42B	472,4	25,53	25,51	26,9	25,2	1,41	-0,31
42A	471,4	25,80	25,66	26,48	25,32	0,68	-0,34
42	472,1	25,81	25,70	25,70	25,29	-0,11	-0,41
41B	470,9	26,31	26,43	26,00	25,82	-0,31	-0,61
41A	469,8	26,38	26,45	26,80	25,90	0,42	-0,55
41	469,0	26,58	26,50	27,00	25,86	0,42	-0,64
40E	0,0	26,81	26,77	26,65	26,12	-0,16	-0,65
40D	466,5	26,88	26,90	27,20	26,20	0,32	-0,70
40C	465,6	27,00	26,98	27,12	26,20	0,12	-0,78
40B	463,1	27,19	27,04	f. Oglio	26,31	f. Oglio	-0,73
40A	461,8	27,20	27,14	27,10	26,40	-0,10	-0,74
40	460,4	27,37	27,31	27,30	27,38	-0,07	0,07
39F	459,5	27,39	27,32	26,90	27,37	-0,49	0,05
39E	457,7	27,43	27,48	27,26	27,28	-0,17	-0,20
39D	455,9	27,58	27,67	27,28	27,32	-0,30	-0,35
39C	454,3	27,79	27,70	27,60	27,39	-0,19	-0,31
39B	453,1	27,86	27,79	27,78	28,00	-0,08	0,21
39A	451,9	27,88	27,98	27,97	28,54	0,09	0,56

Tabella 47 - Tratto n. 6 da Dosolo a Borgoforte (S39A – S42B). Franchi arginali in sponda destra e sinistra rispetto i livelli ottenuti dal modello dello stato attuale del fiume Po per la piena PAI T200 (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

Sez	Progr. (Km)	Livello Modello (m s.m.)		Quota Argini (m s.m.)		Franco idraulico (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SX	DX
46	492,1	23,25	23,25	24,10	23,16	0,85	-0,09
45C	490,9	23,46	23,67	24,20	24,10	0,77	0,42
45B	489,2	24,00	23,87	24,70	23,70	0,65	-0,19
45A	488,1	24,09	24,02	24,70	23,80	0,56	-0,24
45	486,9	24,10	24,08	25,00	24,10	0,92	0,00
44C	486,2	24,10	24,27	25,20	24,20	1,05	-0,12
44B	485,0	24,10	24,27	25,10	25,30	1,00	1,01
44A	483,9	24,1	24,28	25,10	24,70	1,01	0,37
44	482,6	24,41	24,28	25,30	24,60	0,89	0,31
43B	481,5	24,47	24,3	25,30	24,50	0,79	0,22
43A	480,7	24,48	24,36	25,40	25,00	0,95	0,59
43BIS	480,3	24,59	24,5	25,70	24,90	1,06	0,38
43	479,7	24,53	24,62	25,60	24,90	1,10	0,28
42F	478,7	25,00	25,00	25,70	25,00	0,68	0,02
42E	477,7	25,10	25,04	25,80	25,00	0,73	-0,09
42D	476,6	25,12	25,17	25,90	25,90	0,82	0,75
42C	473,5	25,35	25,45	26,30	25,30	0,90	-0,12
42B	472,4	25,53	25,51	26,90	25,20	1,41	-0,31

Tabella 48 - Tratto n. 7 da Borgoforte a Correggio Micheli (S42B – S46). Franchi arginali in sponda destra e sinistra rispetto i livelli ottenuti dal modello dello stato attuale del fiume Po per la piena PAI T200 (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

Sez	Progr. (Km)	Livello Modello (m s.m.)		Quota Argini (m s.m.)		Franco idraulico (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SX	DX
53A	510,3	20,50	20,63	21,30	21,97	0,80	1,34
53	510,1	20,53	20,66	21,93	21,78	1,40	1,12
52	508,7	20,63	20,80	22,10	Argine golenale	1,47	Argine golenale
51	508,7	21,53	21,20	22,03	Argine golenale	0,50	Argine golenale
50	509,5	21,57	20,96	21,95	Argine golenale	0,38	Argine golenale
49B	507,3	21,61	21,68	21,98	22,04	0,37	0,36
49A	506,1	21,66	21,72	22,33	22,21	0,67	0,49
49	505,0	21,67	21,73	23,25	22,23	1,58	0,50
48D	503,9	21,78	21,77	23,35	22,58	1,57	0,81
48C	502,7	21,81	21,91	22,52	21,96	0,71	0,05
48B	501,4	21,87	21,94	22,70	22,56	0,83	0,62
48A	500,3	22,04	22,03	22,90	22,30	0,86	0,27
48	499,3	22,05	22,04	23,11	22,36	1,06	0,32
47C	498,3	22,10	22,22	23,21	22,38	1,11	0,16
47B	497,1	22,20	22,23	23,35	22,80	1,15	0,57
47A	496,1	22,56	22,47	23,68	22,89	1,12	0,42
47	495,4	22,67	22,59	23,45	22,82	0,78	0,23
46C	494,5	22,89	22,71	f. Mincio	23,09	f. Mincio	0,38
46B	493,5	22,97	23,01	23,51	23,15	0,54	0,14
46A	492,8	22,88	23,27	23,89	23,32	1,01	0,05
46	492,1	23,25	23,25	24,10	23,16	0,85	-0,09

Tabella 49 - Tratto n. 8 da Correggio Micheli a Ostiglia (S46 – S53A). Franchi arginali in sponda destra e sinistra rispetto i livelli ottenuti dal modello dello stato attuale del fiume Po per la piena PAI T200 (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

Sez	Progr. (Km)	Livello Modello (m s.m.)		Quota Argini (m s.m.)		Franco idraulico (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SX	DX
53A	510,3	16,16	16,15	17,31	17,38	1,15	1,23
53	510,1	16,43	16,40	17,21	17,41	0,78	1,01
52	508,7	16,50	16,79	17,36	17,88	0,86	1,09
51	508,7	16,61	16,75	17,47	18,05	0,86	1,30
50	509,5	16,55	16,70	17,37	18,08	0,82	1,38
49B	507,3	16,94	16,94	17,78	17,90	0,84	0,96
49A	506,1	17,21	17,04	17,96	17,65	0,75	0,61
49	505,0	17,24	17,10	18,01	17,97	0,77	0,87
48D	503,9	17,50	17,52	18,22	18,25	0,72	0,73
48C	502,7	17,51	17,57	18,20	18,71	0,69	1,14
48B	501,4	17,66	17,59	18,45	18,90	0,79	1,31
48A	500,3	17,67	17,66	18,40	18,98	0,73	1,32
48	499,3	17,82	17,84	18,60	18,96	0,78	1,12
47C	498,3	17,92	18,04	18,67	19,23	0,75	1,19
47B	497,1	18,01	18,08	18,66	19,36	0,65	1,28
47A	496,1	18,34	18,30	19,30	19,97	0,96	1,67
47	495,4	18,41	18,34	18,95	19,71	0,54	1,37
46C	494,5	18,39	18,60	19,46	19,52	1,07	0,92
46B	493,5	18,59	19,06	19,47	19,45	0,88	0,39
46A	492,8	18,94	19,14	19,50	19,68	0,56	0,54
46	492,1	19,67	19,20	20,21	20,00	0,54	0,80

Tabella 50 - Tratto n. 9 da Ostiglia a Gaiba (S53A – S62). Franchi arginali in sponda destra e sinistra rispetto i livelli ottenuti dal modello dello stato attuale del fiume Po per la piena PAI T200 (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

Sez	Progr. (Km)	Livello Modello (m s.m.)		Quota Argini (m s.m.)		Franco idraulico (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SX	DX
65A	561,3	13,67	13,70	15,35	15,02	1,68	1,32
65	564,2	13,81	13,80	15,67	15,25	1,86	1,45
64D	564,0	13,84	13,80	15,60	15,55	1,76	1,75
64C	562,8	14,44	14,63	15,80	15,66	1,36	1,03
64B	561,6	14,58	14,78	16,20	15,84	1,62	1,06
64A	559,7	15,12	15,10	16,80	15,85	1,68	0,75
64	559,4	15,17	15,18	16,23	16,04	1,06	0,86
63A	553,9	15,39	15,39	16,60	16,35	1,21	0,96
63	553,5	15,53	15,47	16,68	16,83	1,15	1,36
62B	553,5	15,83	15,82	16,78	16,82	0,95	1,00
62A	551,5	15,91	15,90	17,10	17,20	1,19	1,30
62	549,8	16,16	16,15	17,31	17,38	1,15	1,23

Tabella 51 - Tratto n. 10 da Gaiba a Pontelagoscuro (S62 – S65A). Franchi arginali in sponda destra e sinistra rispetto i livelli ottenuti dal modello dello stato attuale del fiume Po per la piena PAI T200 (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

Sez	Progr. (Km)	Livello Modello (m s.m.)		Quota Argini (m s.m.)		Franco idraulico (m)	
n°		SPSX	SPDX	SPSX	SPDX	SX	DX
73A	600,6	8,87	9,12	10,26	10,38	1,39	1,26
73	599,1	9,25	9,27	10,45	10,16	1,20	0,89
72A	597,2	9,26	9,28	10,89	10,63	1,63	1,35
72	595,4	9,67	9,73	10,30	10,61	0,63	0,88
71B	593,9	10,10	9,98	11,30	10,70	1,20	0,72
71A	591,8	10,49	10,50	11,91	11,25	1,42	0,75
71	589,1	10,62	10,52	12,17	11,30	1,55	0,78
70C	586,8	10,75	10,78	12,20	11,69	1,45	0,91
70B	585,0	11,11	11,10	11,94	12,13	0,83	1,03
70A	582,7	11,40	11,33	12,15	12,27	0,75	0,94
70	580,8	11,65	11,46	13,30	13,16	1,65	1,70
69B	578,6	11,80	11,90	13,93	12,82	2,13	0,92
69A	576,8	11,90	11,97	13,67	13,02	1,77	1,05
69	576,5	12,24	12,24	13,71	13,93	1,47	1,69
68B	575,0	12,55	12,41	14,36	13,80	1,81	1,39
68A	573,7	12,88	12,90	14,28	13,46	1,40	0,56
68	572,7	12,81	13,06	14,37	14,25	1,56	1,19
67A	571,6	13,05	13,13	14,44	14,30	1,39	1,17
67	570,5	13,20	13,14	14,62	13,94	1,42	0,80
66A	567,8	13,48	13,48	14,89	14,51	1,41	1,03
66	565,4	13,68	13,67	14,63	14,80	0,95	1,13
65B	562,9	13,82	13,90	15,04	14,97	1,22	1,07
65A	561,3	13,67	13,70	15,35	15,02	1,68	1,32

Tabella 52 - Tratto n. 11 da Pontelagoscuro a Goro (S65A – S73A Franchi arginali in sponda destra e sinistra rispetto i livelli ottenuti dal modello dello stato attuale del fiume Po per la piena PAI T200 (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

I medesimi risultati sono anche esposti nelle cartografie riportate per tutto il tratto di Po di interesse nell'Allegato 11.2, Tavole da 1 a 21, nelle quali, insieme ai valori dei livelli idrici ricostruiti con il modello per la piena PAI T200, sono evidenziate in tutte le sezioni del Po anche le suddette classi di criticità con un simbolo di colore differenziato in relazione alla criticità locale. A titolo di esempio nelle seguenti figure si riportano stralci delle suddette cartografie ubicati in tratti caratterizzati da franchi arginali a differente criticità e in particolare: criticità bassa (Figura 121 e Figura 125), criticità alta (Figura 122 e Figura 123), criticità mista (Figura 124).

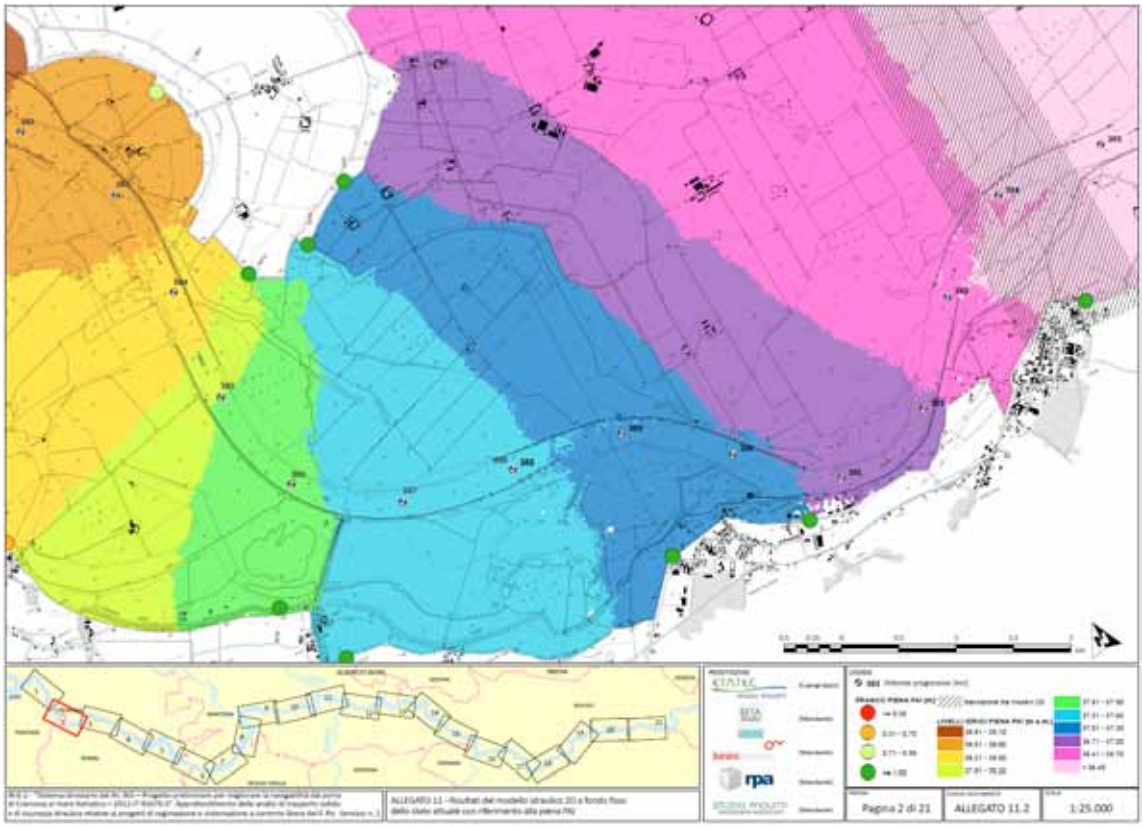


Figura 121 - Tratto da Cremona (S25B) a Zibello (S29). Livelli idrici calcolati con il modello bidimensionale per la piena PAI T 200 e indicazione delle classi criticità dei franchi degli argini maestri (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

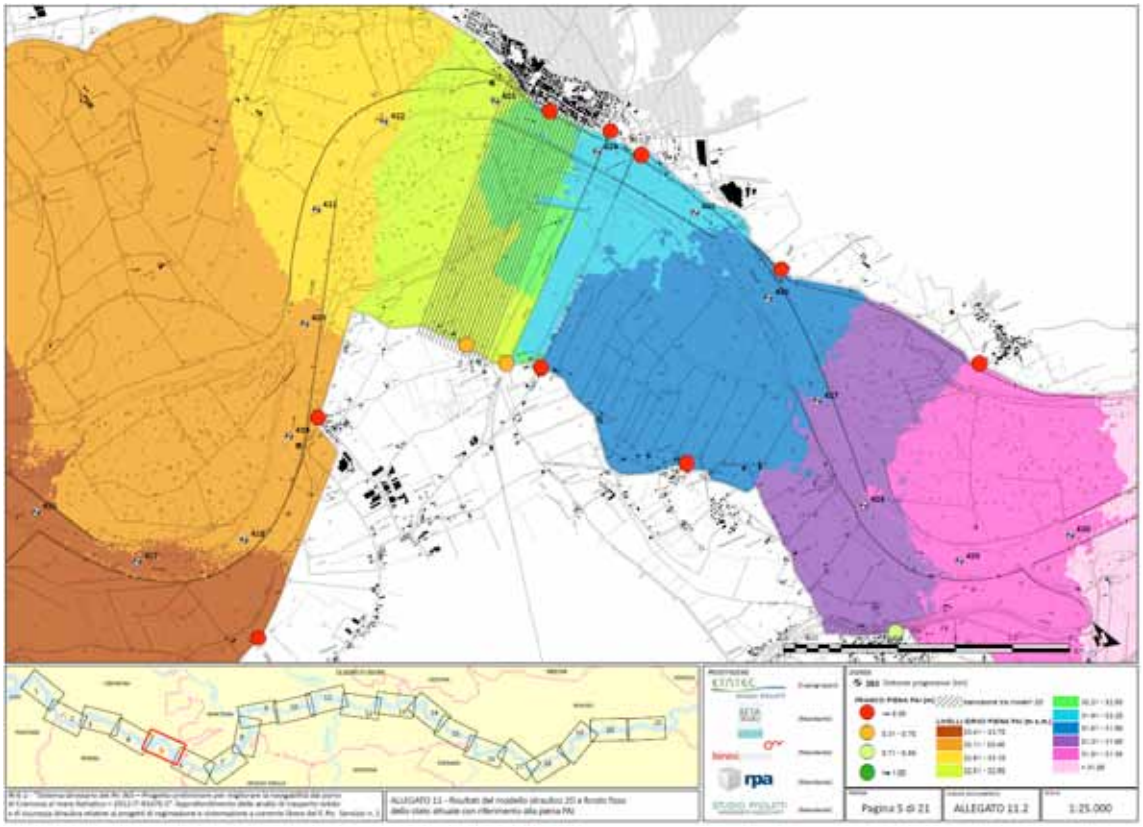


Figura 122 - Tratto da Zibello (S29) a foce Parma (S35D). Livelli idrici calcolati con il modello bidimensionale per la piena PAI T 200 e indicazione delle classi criticità dei franchi degli argini maestri (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

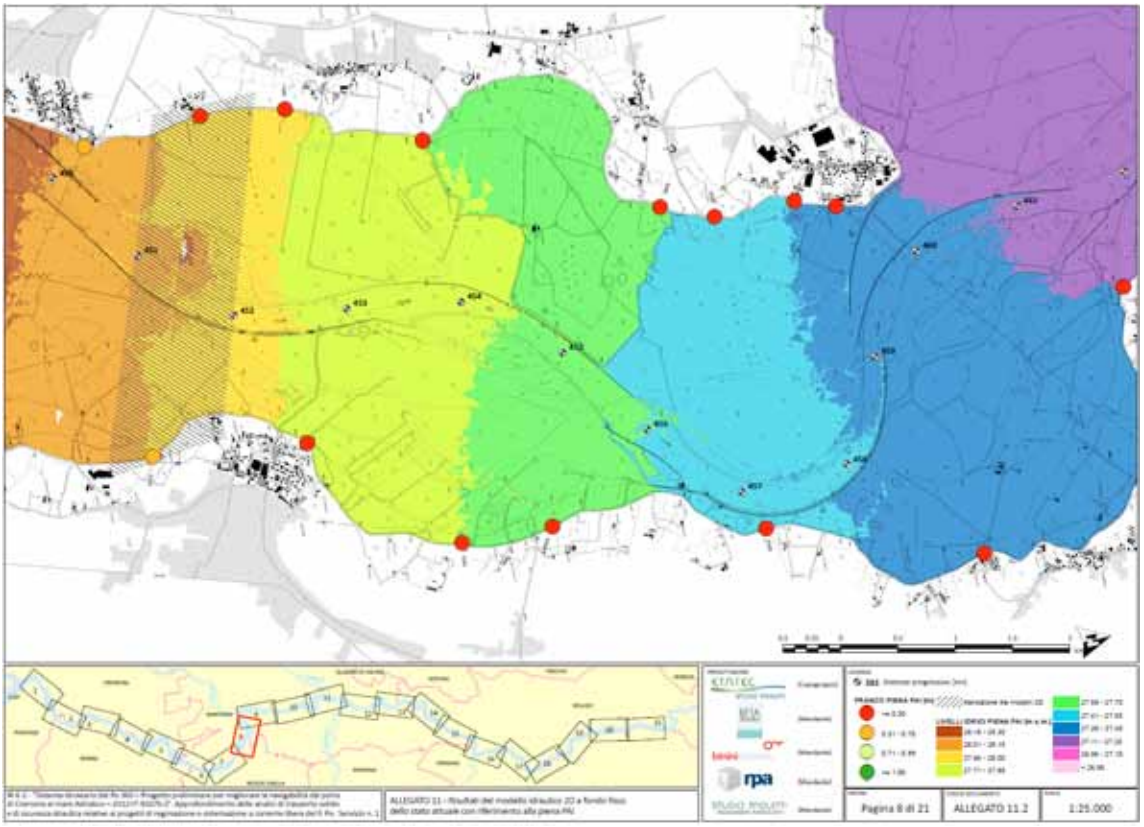


Figura 123 - Tratto da Luzzara (S39A) a Cizzolo (S40). Livelli idrici calcolati con il modello bidimensionale per la piena PAI T 200 e indicazione delle classi criticità dei franchi degli argini maestri (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

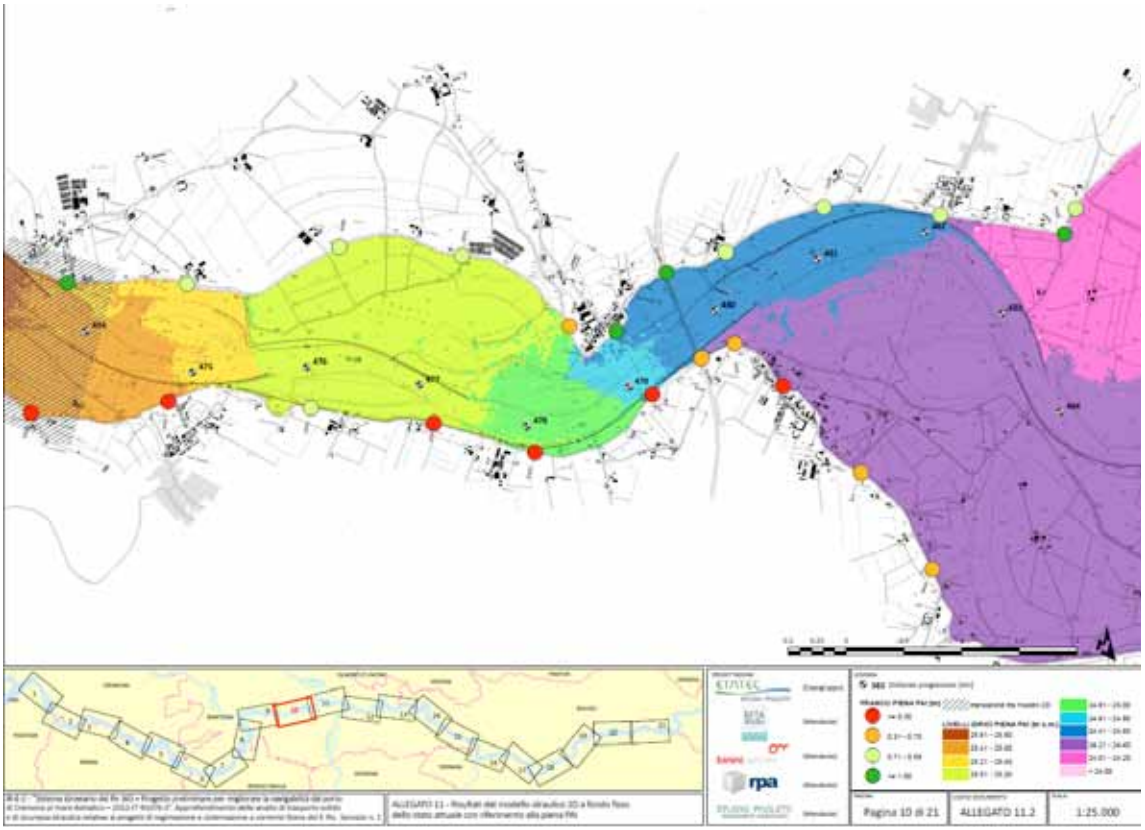


Figura 124 - Tratto da Motteggiana (S42B) a San Giacomo Po (S45). Livelli idrici calcolati con il modello bidimensionale per la piena PAI T 200 e indicazione delle classi criticità dei franchi degli argini maestri (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

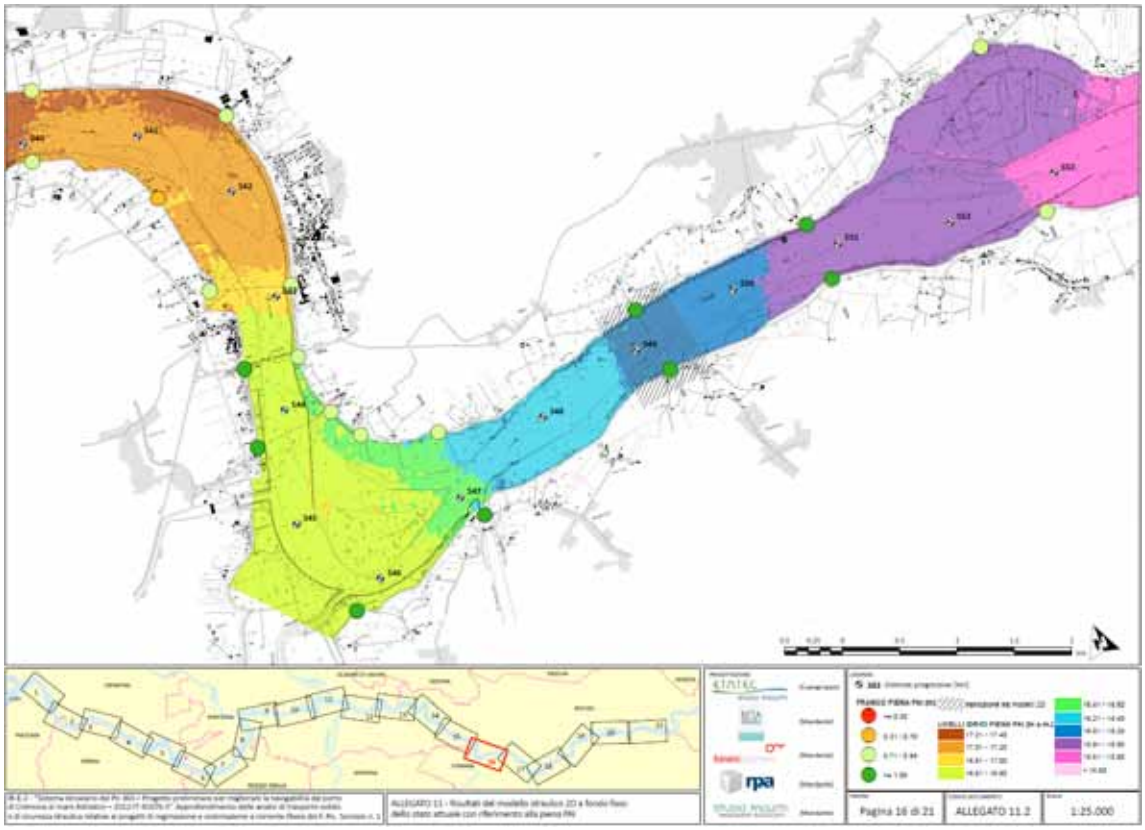


Figura 125 - Tratto da Ficarolo (S59D) a Ravalle (S62B). Livelli idrici calcolati con il modello bidimensionale per la piena PAI T 200 e indicazione delle classi criticità dei franchi degli argini maestri (Criticità: verde = assente; verde chiaro = bassa; arancione = media; rosso = elevata)

In modo molto sintetico e quindi approssimato si può dire che mediamente, salvo punti particolari, esaminando la suddetta cartografia dell'Allegato 11.2 da Cremona al Po di Goro si rilevano:

- da Cremona (S25A) a Zibello (S29): criticità prevalentemente assenti o basse;
- da Zibello (S29) a Coltaro (S33B): criticità prevalentemente basse o medie;
- da Coltaro (S33B) a Motteggiana (S42B): criticità prevalentemente medie o alte;
- da Motteggiana (S42B) a Quingentole (S48C): criticità miste da basse ad alte, quest'ultime prevalentemente in sponda destra;
- da Quingentole (S48C) a Ficarolo (S59D): criticità miste da basse a medie;
- da Ficarolo (S59D) al Po di Goro (S73A): criticità prevalentemente basse.

Più in dettaglio emergono condizioni di criticità medie o elevate al sormonto arginale in corrispondenza dei seguenti tratti:

Argine di Cremona: il tratto a valle del ponte ferroviario fino a Castelvetro Piacentino sulla sponda destra presenta una criticità al sormonto medio elevata con franchi dell'ordine di 50 ÷ 70 cm rispetto alla piena PAI T200; in sponda sinistra, in prossimità del ponte ferroviario il tratto presenta una criticità elevata;

- Argine Castelvetro-Soarza: in sponda destra da Castelvetro a Soarza si mantiene un franco superiore ai 70 cm rispetto alla piena PAI T200;
- Argine Stagno Lombardo – San Daniele Po in sinistra idrografica (franco variabile di 30 - 50 cm);
- l'Argine Motta Baluffi-Casalmaggiore, in sinistra idrografica, presenta mediamente franchi di 30 - 50 cm e inadeguati al contenimento dei livelli di piena nel tratto da Gussola sino a Casalmaggiore;
- Argine Gramignazzo-Mezzano Rondani, in destra idrografica da confluenza Taro a confluenza

Parma; il primo tratto fino a Coltaro presenta un franco dell'ordine di 40 ÷ 60 cm con tratti a valle e fino a Sacca con franco nullo o inadeguato a contenere i livelli idrici di piena;

- Argine Casalmaggiore-Viadana: l'argine in sponda sinistra a valle di Casalmaggiore fino a Viadana presenta franchi rispetto alla piena PAI T200 inadeguati al contenimento dei livelli di piena; i franchi aumentano sino a valori di 40 ÷ 60 cm a valle di Viadana;
- Argine monte Brescello, in destra idrografica da confluenza Enza a Brescello, l'opera presenta franchi inadeguati al contenimento dei livelli di piena PAI T200;
- Argine Viadana-Cizzolo, in sinistra idrografica da Viadana a Dosolo presenta franchi variabili da 30 a 60 cm; da Villastrada a Cizzolo è inadeguato a contenere i livelli idrici della piena di riferimento.
- Argine Boretto-Mirasole, in destra idrografica presenta nel tratto Boretto-Luzzara un franco da 20 a 50 cm con alcuni tratti insufficienti a contenere i livelli idrici della piena di riferimento; da Luzzara a Mirasole (confluenza Mincio) la criticità al sormonto risulta elevata con argine inadeguato al contenimento della piena PAI T200;
- Argine Scorzarolo – Correggio Micheli: in sponda sinistra da confluenza Oglio fino all'abitato di Borgoforte le quote arginali sono a tratti inadeguate al contenimento dei livelli idrici PAI T200 con lunghi tratti in cui il franco è compreso tra 30 e 40 cm; da Borgoforte a confluenza Mincio il franco è generalmente maggiore di 70 ÷ 80 cm con alcuni tratti in cui i franchi sono dell'ordine di 50 cm;
- Argine Governolo - Corregioli: in sponda sinistra da confluenza Mincio fino a Serravalle Po il franco rispetto alla piena PAI T200 è sempre maggiore di 70 ÷ 80 cm; da Serravalle Po sino a Ostiglia presenta franco compreso tra 40 e 60 cm, mentre da Ostiglia a Corregioli i franchi sono mediamente superiori a 80 cm;
- Argine Quingentole-Revere: l'opera in sponda destra ha lunghi tratti inadeguati a contenere i livelli idrici della piena PAI e tratti a franco inferiore a 30 cm;
- Argine Carbonara Po – Sermide: in sponda destra fino a Moglia l'argine ha un franco variabile da 40 cm a 60 cm, mentre ha franchi che superano gli 80 cm fino a Sermide;
- Argine Melara-Occhiobello: l'argine in sinistra fino a Sermide presenta una criticità al sormonto media con valori di franco variabili da 40 a 70 cm rispetto alla piena PAI T200; da Sermide fino a Occhiobello mediamente i franchi arginali superano gli 80 cm.

In generale, rispetto ai risultati riportati nel catasto degli argini aggiornato nel 2007 dall'Autorità di bacino del fiume Po denominato "*Rappresentazione delle condizioni di rischio residuale lungo l'asta del fiume Po da Torino al mare: sintesi delle conoscenze e report descrittivi*", i tratti che presentano livelli di criticità medio - elevata sono confermati ad eccezione di alcuni tratti localizzati in cui si verifica un cambiamento del livello di criticità. In particolare, si nota il passaggio da una criticità medio – elevata ad una criticità media o assente (sponda sinistra: tratto Cremona - Zibello, tratto Borgoforte - San Giacomo, tratto Mirasole - Correggioli; sponda destra: tratto Mirasole – Revere, tratto Revere - Corregioli), mentre in misura minore è evidente un peggioramento della situazione con il passaggio da una criticità medio – elevata ad una criticità elevata (sponda sinistra: a valle di Zibello, in prossimità di Brescello e Boretto, tratto tra San Giacomo e Correggioli; sponda destra: tra Brescello e Boretto).

6 ESTENSIONE DEL PROGETTO DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA NEL TRATTO COMPRESO TRA FOCE MINCIO E L'INCILE PO DI GORO

6.1 PREMESSA

Il progetto di sistemazione del Po così detto a corrente libera ha come scopo quello della sistemazione dell'alveo di magra con finalità congiunte di difesa idraulica e di miglioramento delle condizioni di navigabilità.

Il problema del Po, per quel che riguarda i bassi fondali e la necessità di garantire la navigazione, è sensibilmente diverso nei due tronchi a monte e a valle di foce Mincio:

- a monte di foce Mincio, dove le opere di sistemazione sono quasi completate, il tracciato del fiume è già stabilizzato. I punti dove attualmente permangono bassi fondali, sono in numero limitato e richiedono interventi manutentori limitati (per tale tratto AIPo ha da poco redatto il progetto definitivo degli "Interventi relativi alla sistemazione a corrente libera del fiume Po nella tratta compresa tra isola Serafini e foce Mincio per consentire il transito di una unità di navigazione della Va classe CEMT").
- a valle di foce Mincio, in particolare nel tronco fino a Pontelagoscuro, lungo 70 km, il corso del fiume tende a cambiare il proprio tracciato, rispondendo a leggi naturali o ad interventi antropici che sono spesso poco appropriati, quando non del tutto ingiustificati. In tutto questo tronco, tuttavia, l'alveo maggiore è generalmente stretto e così non possono essere consentite al canale attivo divagazioni che giungerebbero subito ad insidiare la stabilità delle arginature. A valle della foce del Mincio i lavori di fissazione e di regimazione dell'alveo hanno una forte motivazione nella difesa dalle alluvioni e, se verranno opportunamente studiate, realizzeranno contemporaneamente condizioni ottime per la navigazione.

6.2 I precedenti progetti di sistemazione a corrente libera del fiume Po nel tratto da Cremona a foce Mincio

Il programma di sistemazione a "corrente libera" ha origine con il progetto Valentini - Gorio del 1919, riferito dapprima al solo tronco Foce Enza - Foce Crostolo di 14 km, esteso solo successivamente verso monte fino a Foce Taro. Il progetto fu redatto per ottenere fondali di 2.50 m, ritenuti necessari per natanti da 600 t con pescaggio di 2.10 m, con una notevole apertura per l'epoca se si considera che la navigazione sul Po era effettuata allora con "burchi" da 200 t e pescaggio di 1.80 m. La scelta progettuale e i suoi obiettivi sono ripetutamente confermati negli anni seguenti dalle Commissioni Parlamentari presiedute da Leone Romanin Jacur, che riconoscono la possibilità e la convenienza di navigare il fiume rispetto alle alternative di canali laterali o pedemontani. Nel 1923 la Commissione affida al prof. Giandotti, capo dell'Ufficio Idrografico del Po, l'incarico di redigere un progetto generale per la sistemazione del tronco tra foce Adda e foce Mincio, progetto che viene approvato nel 1924 dal Consiglio Superiore dei LL.PP.

L'obiettivo che il progetto propose fu quello di fissare l'alveo di magra in modo da ottenere fondali non inferiori a 2.50 m con una portata di magra minima di 400 m3/s.

I criteri fondamentali, desunti dalle leggi di Fargue, furono i seguenti:

- larghezza del canale regolato di circa 250-300 m sulle soglie con allargamento in corrispondenza dei vertici delle curve, intorno ai 400 m;
- curve regolari a tracciato parabolico, con raggio mai inferiore a 800 m, (questa curva viene adottata anche perché dalla analisi dei rilievi a pelo contemporaneo condotti dal 1905 al 1923 si era potuto riconoscere che varie erosioni in atto presentavano spontaneamente andamento planimetrico pressoché parabolico);
- sviluppo totale del tracciato quasi uguale a quello naturale del filone;

- vertice delle curve successive ad una distanza media non troppo forte (2.8 km) per ottenere stabilità del tracciato e buona successione di fondali, conservando all'incirca lo stesso numero degli attraversamenti che si riscontravano naturalmente nel fiume;
- maggiore possibile utilizzazione delle vecchie difese già esistenti, per ragioni di economia, senza proporre la demolizione di alcuni tratti;
- sfocio degli affluenti nelle parti concave delle curve, allo scopo di consentire alle acque del Po di rimuovere più facilmente e rapidamente gli apporti solidi dei suoi affluenti;
- avvicinamento del tracciato ai punti di maggiore interesse.

I lavori hanno avuto inizio soltanto nel 1931-32, nell'ambito di un programma di opere pubbliche a sollievo della disoccupazione, con un progetto esecutivo che prevedeva 51 curve di navigazione e uno sviluppo complessivo del canale sistemato di circa 130 km. Il finanziamento e l'avanzamento dei lavori furono quanto mai incerti e lenti, sì che soltanto dopo il 1951, nell'ambito dei programmi della difesa idraulica del Po, essi sono stati portati ad un buon grado di completamento per tutto il tronco tra Cremona e Foce Mincio.

I criteri teorici prima elencati, all'atto pratico, non sempre poterono essere rigorosamente applicati e in diverse situazioni i lavori furono condotti secondo altre condizioni di opportunità come ad esempio:

- quella di non avanzare esageratamente con le curve concave entro le alte sponde, generalmente di proprietà privata, al fine di evitare i costi degli espropri; questo ha condotto ad aumentare in diverse curve i raggi fin oltre i 2'000 m, adottando quindi curvature a raggio elevato che risultano non troppo favorevoli per ottenere che il filone resti facilmente aderente alla sponda;
- la necessità di utilizzare il più possibile le difese esistenti per ragioni di economia, evitando la demolizione di quelle che erano state eseguite a protezione delle sponde e di vicini argini maestri;
- la necessità di ottenere delle buone soluzioni di andamento del canale di navigazione in corrispondenza dei ponti stabili stradali e ferroviari e di quelli stradali ancora apribili in barche;
- la necessità inoltre dell'avvicinamento del canale regolato all'una o all'altra sponda per servire le esistenti derivazioni di acqua a scopo irriguo, i centri principali (Casalmaggiore), ed infine il Cantiere Officina di Boretto.

La sistemazione è stata progettata e attuata con opere radenti discontinue, disposte sulla riva concava delle curve, mentre su quella convessa non era previsto nessun intervento. L'estremità di valle di ciascuna difesa viene a trovarsi all'incirca all'altezza della estremità di monte della difesa successiva e brevi opere trasversali collegano l'inizio di ogni difesa con la sponda, mentre a valle spesso il varco resta libero consentendo alle torbide di entrare nella lunata a ricolmare per deposizione le precedenti erosioni. La sommità delle difese fu fissata a 2.00 m sopra la magra ordinaria, quota che oggi, a seguito del violento fenomeno di abbassamento non viene superata per lunghi periodi dell'anno, contribuendo così ad approfondire sempre più l'alveo inciso.

Tutti i lavori eseguiti hanno subito un positivo collaudo in occasione della grande piena del novembre 1951 e i risultati conseguiti hanno migliorato decisamente le condizioni idrauliche e di stabilità delle arginature allontanando dal piede di queste la corrente, fissando i punti da difendere ed eliminando migrazioni di alveo e i gorghi profondi in numerose curve che prima erano in condizioni critiche.

Le trasformazioni del fiume che sono state prodotte dalle opere di sistemazione dell'alveo di magra nel tronco tra foce Adda e foce Mincio sono risultate importanti e i risultati ottenuti sono di tutta evidenza. Il successo conseguito ha indotto l'ex Magistrato per il Po a programmare gli stessi interventi anche per il tronco di valle, dove l'instabilità del canale continua a provocare problemi alle difese.

Gli obiettivi del progetto possono dirsi quindi pienamente conseguiti per quel che riguarda la difesa idraulica, mentre per la navigazione, i risultati non possono ancora essere definiti sufficienti, pur registrando un miglioramento radicale tanto che le condizioni di navigabilità hanno superato quelle del tronco inferiore che prima dei lavori erano di gran lunga migliori.

Riprendendo le analisi puntuali già sviluppate, si può affermare che i punti nei quali si registrano

bassi fondali sono comunque limitati sia come numero che come lunghezza e si estendono per non più di qualche chilometro per l'intera tratta di 130 km. L'esame critico e puntuale delle sistemazioni che non hanno dato i risultati voluti mostra con ricca messe di riscontri che questo trova sempre spiegazione in qualche incompletezza delle opere eseguite o in qualche difetto di progettazione. Le cause prevalenti della formazione di bassi fondali sono da individuarsi:

- nell'impiego in alcuni casi di raggi di curvatura troppo grandi;
- nella lunghezza eccessiva di alcuni tratti in rettilineo;
- nell'adozione di curve di sviluppo troppo grande (Cremona Casalmaggiore, ecc.);
- nella erronea valutazione della lunghezza di alcune soglie, in quanto non si era tenuto conto del fatto, riscontrato poi in pratica, che la corrente fra curva e controcurva si dispone spesso trasversalmente su una soglia obliqua.

Inoltre gli effetti negativi di queste imperfezioni delle opere sono stati esaltati dalla evoluzione che si è registrata nel corso dei sessanta anni passati tra la progettazione ed i giorni nostri. In questo periodo infatti mentre le portate disponibili durante le magre del fiume sono generalmente variabili all'interno di un range compreso all'incirca tra 300 e 500 m3/s (ma anche con eventi più rari compresi tra 200 e 300 m3/s), le dimensioni delle navi e la loro velocità sono aumentate notevolmente.

Inoltre si ricorda quanto già precedentemente esposto in relazione al forte abbassamento dell'alveo registrato a partire dagli anni '60 del secolo scorso (par. 3.1.4). I pennelli, che in base ai progetti originari dovevano concentrare la corrente solo nei periodi di magra per portate minori di 400 m3/s, sono oggi ben più alti rispetto al fondo alveo di magra e determinano la concentrazione della corrente fino a portate da 2'000 a 5'000 m3/s, come evidenziato nella precedente Figura 8 del par. 3.1.2, e quindi in alcuni tratti fino a portate che corrispondono alla piena ordinaria ovvero all'evento che si manifesta mediamente una volta ogni due anni.

In relazioni a tali aspetti l'AIPo ha redatto il progetto definitivo degli "interventi relativi alla sistemazione a corrente libera del fiume Po nella tratta compresa tra isola Serafini e foce Mincio per consentire il transito di una unità di navigazione della Va classe CEMT", al fine di approfondire e definire gli interventi necessari per garantire un fondale minimo di 2.00 m per 340 gg l'anno.

Il Progetto prevede le seguenti tipologie di interventi:

1. realizzazione di nuove opere trasversali (pennelli) o longitudinali (difese radenti) a doppia fronte;
2. realizzazione di nuove opere di difesa longitudinali (difese radenti);
3. riadattamento di opere esistenti alla quota di progetto per favorire la riattivazione delle aree lanchive retrostanti;
4. demolizione di opere trasversali esistenti (pennelli) e non più funzionali.

La lunghezza complessiva delle nuove opere è pari a circa 7.5 km, di cui 4.2 km in sponda destra e 3.3 km in sponda sinistra, mentre l'estensione delle difese che vengono demolite o abbassate è pari a circa 1.2 km.

Allo stato attuale, l'estensione delle opere di difesa (longitudinali e trasversali) presenti lungo il tratto di fiume Po tra Cremona e foce Mincio, in base alle informazioni contenute negli studi di fattibilità a supporto del PGGS, è pari a circa 173 km, di cui 85 km in sponda sinistra e 88 km in sponda destra.

Considerando che la lunghezza del tratto in esame è pari a circa 124 km, si ha che la densità media attuale delle opere è pari a circa 685 m/km in sponda sinistra e 709 m/km in sponda destra.

Dai dati sopra riportati emerge come il tratto di fiume Po da Cremona a foce Mincio sia già allo stato attuale interessato da una presenza diffusa di opere di difesa lungo entrambe le sponde. Gli interventi previsti in progetto inducono un incremento dell'estensione delle opere presenti in alveo pari a circa il 4%.

6.3 TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO. ANALISI NAVIGABILITÀ ATTUALE E INDIVIDUAZIONE DEI PUNTI CRITICI

A valle di foce Mincio, ai buoni valori della magra di riferimento, detta magra equivalente, che sono praticamente uguali a quelli del tronco di monte, si accompagnano valori particolarmente limitati della pendenza. Ad Ostiglia, a 150 km dalla foce, il livello della magra equivalente è di circa 8,50 m sul livello del mare.

Naturalmente, l'analisi delle attuali condizioni di navigabilità nonché l'individuazione dei punti di basso fondale, non può prescindere da una verifica completa di tutti gli strumenti conoscitivi e di pianificazione portati avanti nel tempo sia da AIPo che dall'Autorità di bacino del fiume Po.

Nella prima fase di lavoro, pertanto, si è proceduto alla raccolta delle informazioni utili a definire un quadro il più completo possibile dell'attuale assetto del fiume nel tratto a valle di foce Mincio, anche a seguito degli ultimi eventi di piena che hanno interessato l'asta fluviale.

Valenza prioritaria hanno in particolare le campagne di rilievo sia di tipo terrestre che batimetrico che negli ultimi anni sono state condotte da parte delle Autorità competenti. Oltre a questi è risultato utile anche reperire i dati provenienti da campagne e indagini svolte negli anni passati quali:

- i dati e/o catasti reperibili da precedenti studi ed osservazioni;
- un'analisi dei dati relativi agli interventi idraulici effettuati nel tratto in esame nel recente passato, con particolare riferimento agli interventi che possono aver influenzato l'evoluzione morfodinamica del corso d'acqua e conseguentemente la navigazione;
- altri dati topografici disponibili.

Oltre ai dati precedenti è stata presa in considerazione la caratterizzazione idrologica del bacino del fiume Po che è già stata svolta negli anni precedenti e che è stata redatta considerando:

- tutti i dati idrologici disponibili;
- tutti i dati disponibili circa i punti di basso fondale, la frequenza con cui si verificano e le cause che li provocano;
- l'esame dei progetti di sistemazione del fiume Po esistenti (a corrente libera e non).

È risultato inoltre necessario fare riferimento ai principali atti di pianificazione vigenti, approvati ed adottati dall'Autorità di Bacino del Fiume Po, che riguardano anche il tratto di fiume Po in oggetto, in particolare:

- il Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI);
- il Programma Generale di Gestione dei Sedimenti alluvionali del fiume Po (PGGS);
- oltre ad altri atti di pianificazione relativi al tratto di asta fluviale in studio tra cui:
- i Piani di Tutela delle Acque regionali;
- il "Progetto Po, fiume d'Europa" della Regione Emilia Romagna;
- i Piani Territoriali di Coordinamento Provinciale delle province interessate.

6.4 CRITERI DI INDIVIDUAZIONE DEGLI INTERVENTI DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA NEL TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO.

Con riferimento agli studi ed al progetto-pilota sviluppato dall'ARNI per il tronco Castelmassa-Ficarolo, è possibile definire le linee guida da seguire per la realizzazione dei progetti di sistemazione dell'intero tronco di valle. Ciò naturalmente tenendo presenti le esperienze condotte sui tratti di monte già sistemati nonché sulla base delle esperienze sviluppate su altre tratte fluviali, con particolare riferimento ad interventi effettuati all'estero sui principali fiumi europei.

L'individuazione della tipologia e della conformazione degli interventi sarà condotta in particolare

con riferimento alla necessità di garantire la navigabilità del fiume da foce Mincio al Po di Goro, con l'obiettivo di ottenere i seguenti valori di fondale minimi:

- fondale minimo di 2,00 m per una durata media annua di 340 giorni/anno (obiettivo che, come già detto, è uguale a quello fissato da AIPO nel progetto a sistemazione libera del tratto di monte da Cremona a foce Mincio);
- fondale minimo di 2,80 m per una durata media annua di 300 giorni/anno.

Nelle modellazioni più oltre esposte (Cap. 5.5) tali valori minimi del fondale sono stati considerati aggiungendo un franco di sicurezza per la navigazione di 20 cm e quindi considerando rispettivamente i limiti di 2,20 m e 3,00 m.

Il tratto inferiore del Po a valle di foce Mincio, dove gli interventi di sistemazione dell'alveo fluviale sono molto ridotti e finalizzati alla protezione di tratti di sponde da fenomeni di erosione in froldo alle arginature maestre, è caratterizzato da una larghezza ridotta dell'alveo compreso tra le arginature maestre e da un tracciato pressoché diritto. In tali condizioni il canale non ha potuto costruirsi un tracciato in equilibrio e continua a cambiare corso, passando da una sponda all'altra.

Con un lavoro assiduo e mirato attraverso l'utilizzo delle draghe, l'AIPO lavora da anni per imporre al canale il percorso migliore consentito dalla geometria dei luoghi, ricavando, tra le curve di estremità di ciascun tratto, alcune curve intermedie.

Si tratta in genere di curve piuttosto piatte, e quindi poco efficaci e non molto stabili. Il canale non riesce, in queste condizioni, a conservare il proprio tracciato e tende a creare dei "drizzagni" che sconvolgono l'intero tronco e sono assai dannosi sia alla navigazione, per la continua formazione e migrazione dei bassi, sia per la sicurezza idraulica, in quanto la corrente varia continuamente i punti di battuta sugli argini e rende necessari interventi sempre nuovi di protezione.

Le modalità di intervento che si ritiene opportuno adottare nel tratto a valle di foce Mincio si differenziano da quanto già eseguito nel tronco di monte. La conformazione del fiume, infatti, risulta sostanzialmente differente dal tratto a monte del Mincio con una larghezza media dell'alveo e distanza fra arginature maestre decisamente inferiori al tronco superiore. Tale condizione limita la possibilità di realizzare un sistema di curve e controcurve con ampi raggi di curvatura come realizzato nella sistemazione del tronco di monte, obbligando allo stesso tempo ad assecondare l'assetto morfologico esistente. Oltre a ciò occorre considerare che nel frattempo sono cambiati diversi fattori tra cui le dimensioni delle navi a cui fare riferimento, il quadro dei materiali disponibili, la sensibilità nei confronti dei valori ambientali ed inoltre si è aggiunta una considerevole mole di esperienze sviluppate sui fiumi di tutto il mondo.

Tenuto conto dei risultati non ottimali che sono stati generalmente ottenuti dove tra due curve successive sono stati interposti lunghi tratti rettilinei, appare innanzitutto importante adottare curve in grado di garantire, per tutto il loro sviluppo, valori apprezzabili della curvatura.

In generale si può osservare che:

- in un percorso curvo la corrente è soggetta alla forza centrifuga la quale, componendosi con la forza di gravità, determina una sopraelevazione del livello dell'acqua;
- la sopraelevazione sulla sponda concava modifica il valore della pendenza longitudinale (riducendola nel tratto iniziale e aumentandola in quello terminale della curva);
- le condizioni che generano le componenti trasversali della corrente, che sono quelle che garantiscono la capacità di trasporto solido, variano in modo lineare con la curvatura;
- imponendo che, sia le componenti longitudinali che quelle trasversali della velocità varino linearmente lungo l'intero sviluppo della curva, si perviene ad individuare come forma preferibile della curva da adottare, quella di una clotoide. Conseguentemente, la forma della riva esterna delle curva nel suo complesso, nella quale le variazioni dei valori dinamici della corrente, sia longitudinali che trasversali, si sviluppano con continuità è pertanto quella di una biclotoide, ossia una curva costituita da due rami di clotoide osculantisi nel punto di massima curvatura.

Nella realtà, nel tronco a valle di foce Mincio, le caratteristiche geometriche e morfologiche dell'alveo,

non garantiscono la corretta applicazione delle regole precedenti non essendo possibile garantire lunghezze e raggi di curvatura corrispondenti a tale conformazione geometrica.

Tenuto conto di queste condizioni, per la materializzazione delle curve, diversamente da quanto fatto nel tronco di monte (dove sono state impiegate esclusivamente opere radenti) appare opportuno orientarsi su soluzioni miste comprendenti assieme ad opere radenti anche opere sporgenti, con l'obiettivo di realizzare interventi meno costosi, di minor impatto ambientale e che meglio consentano adeguamenti futuri.

Per quanto riguarda l'altezza delle opere di regolazione, un'attenta osservazione dei livelli corrispondenti alle diverse portate del Po e dei fondali ad esse associati, consigliano di adottare, per il coronamento delle opere, quote prossime a quelle della magra ordinaria, indicativamente attorno ad 800 m3/s. Si tratta di una scelta che, pur corrispondendo all'ordine di grandezza di quella originaria dei progetti del tratto di monte da Cremona a foce Mincio, che come già ricordato è oggi fortemente alterata per l'abbassamento dell'alveo, porta ad opere che, rispetto a quelle oggi presenti del tronco di monte, risultano mediamente più basse di circa due metri. Si tratta pertanto di opere dal modestissimo impatto, che si potranno vedere soltanto nelle magre più accentuate.

Una volta definito il tracciato di riferimento, al fine di sfruttare al massimo le opere di difesa esistenti, le opere da prevedersi per la fissazione dello stesso consisteranno per lo più in modesti interventi volti a definire i punti di distacco della corrente dalla sponda. A tale proposito il progetto relativo all'intervento di Castelmassa, costituisce un valido esempio di intervento volto alla definizione del tracciato. Esso prevede, per la fissazione del punto di distacco dalla sponda, la costruzione di un'opera radente, che assomiglia alla testata di un tradizionale pennello padano. L'opera radente è integrata da un pennello trasversale, da costruire in corrispondenza del tratto di flesso.

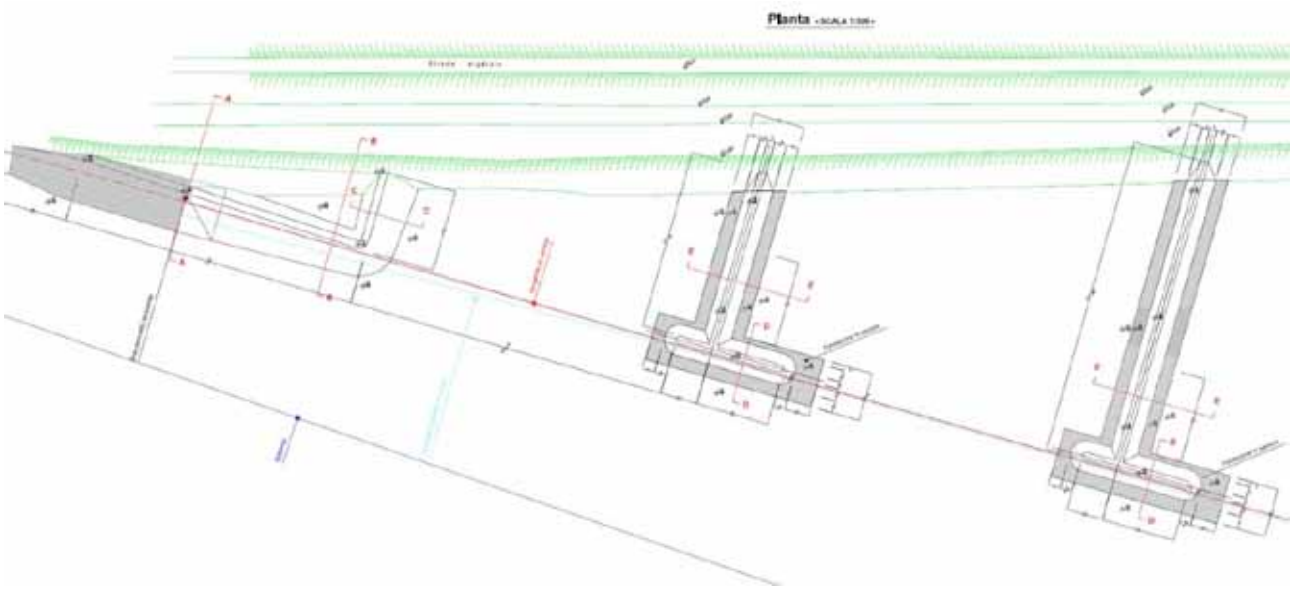


Figura 126 – Planimetria di progetto dei pennelli a Castelmassa.

Il pennello è del tipo "a martello", ed è ispirato a recenti esperienze di sistemazione dell'alveo di magra del Danubio, a monte di Belgrado. Il pennello ha lo stelo perpendicolare alla traiettoria della curva.



Figura 127 – Esempi di pennelli trasversali per la sistemazione a corrente libera del fiume Elba vicino a Magdeburgo.

Lungo la linea della clotoide che segue il bordo esterno del canale, è appoggiato allo stelo un molo radente, che ha uno sviluppo di 45 m, 15 m verso monte e 30 m verso valle. Per questo pennello è stato deciso di utilizzare una soluzione nuova, che è stata applicata nel tronco medio del Mississippi, denominata del "pennello con la tacca" (notched dyke) concepita in modo da mantenere una via di flusso modesta, lungo la riva, al fine di contrastare la sedimentazione del trasporto solido a tergo dei pennelli che porta normalmente alla trasformazione dell'ambiente fluviale in ambiente terrestre. La via di flusso secondaria riduce l'interrimento trattenendo in sospensione le frazioni fini e favorendo la diversificazione delle forme di vita dell'ambito fluviale.

Nel caso in studio, tuttavia, il ricorso al pennello con la tacca potrebbe essere anche giustificato dalla necessità di verificare se un'opera di distacco dalla sponda di tipo discontinuo, come quella studiata possa garantire il flusso, lungo la riva abbandonata, di una portata modesta, come quella richiesta ad esempio per alimentare derivazioni irrigue, senza compromettere la validità complessiva delle opere di regolazione.

6.5 TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO. ANALISI DEI BASSI FONDALI ALLO STATO ATTUALE

L'analisi dei bassi fondali è stata condotta al fine di valutare le condizioni di navigabilità del fiume con riferimento in particolare alla regolazione a corrente libera dell'alveo di magra dell'asta fluviale atta a consentire la navigabilità di navigli della classe Va della classificazione Europea C.E.M.T. del 1992.

Il metodo di sistemazione che viene definito "regolazione a corrente libera dell'alveo di magra" consiste in una sistemazione che non ha soltanto funzioni idroviarie, infatti in un alveo dovunque costretto entro argini molto alti, che proteggono popolazioni addensate lungo le sue sponde e beni di grande valore, è indispensabile impedire le divagazioni del tracciato che portano il canale di magra, con la sua capacità erosiva, al piede dei rilevati arginali in punti privi di protezione.

La regolazione dell'alveo di magra del Po è stata studiata dal 1920 ed è stata realizzata con ritmi lentissimi nel tronco tra Cremona e la foce del Mincio, completata oggi al 90% del programma iniziale, pur in un contesto radicalmente mutato. Qui le condizioni di navigabilità sono comunque decisamente migliorate. Mentre prima dei lavori i fondali superiori ai 2 m erano disponibili soltanto per 60 giorni nell'anno medio, oggi essi sono disponibili per 260 giorni. Anche nel tronco a valle di foce Mincio, in seguito alla maggiore efficacia nella sua gestione, i fondali superiori a 2 m sono disponibili per 250 giorni nell'anno medio, pur senza nessuna sistemazione.

In questo tratto i lavori di regolazione sono appena iniziati, anche se in modo non ancora organico e per interventi limitati, ma i risultati non potranno mancare perché qui le condizioni sono sensibilmente più favorevoli. L'intervento richiesto per la regolazione dell'alveo di magra è certamente il più leggero che si possa adottare. E' la scelta che più di ogni altra rispetta i caratteri naturali del fiume e ben si sposa con le esigenze della difesa idraulica. Ciò naturalmente se la stessa regolazione è studiata in modo da non alterare la dinamica morfologica dell'alveo, in particolare evitando che si inducano tendenze all'abbassamento dell'alveo.

E' in questa direzione che l'ARNI, oggi confluita in AIPO Navigazione, ha studiato i più recenti e avanzati progetti, seppure di modesta entità, per la correzione dei punti critici dove si formano i bassi fondali, che mirano a ridurre l'erosione del fondo, a proteggere le arginature maestre, a conservare il canale navigabile e a ridurre sensibilmente gli interventi di manutenzione.

L'individuazione dei punti di basso fondale risulta quindi necessaria a determinare i tratti di fiume in cui effettuare gli interventi di sistemazione che permettano di garantire le condizioni minime di navigabilità.

In particolare per quel che riguarda i tiranti le condizioni minime da raggiungere, sulla base di quanto già adottato nell'ambito dei precedenti interventi di sistemazione, vengono indicate secondo i valori elencati di seguito:

- persistenza di un fondale minimo pari a 2,00 metri per almeno 340 giorni all'anno;

- persistenza di un fondale minimo pari a 2,80 metri per almeno 300 giorni all'anno;

Naturalmente la condizione di persistenza del tirante minimo, come sopra riportato, non è sempre garantita a causa della formazione di barre longitudinali o di banche di depositi formati per effetto di varie cause: zone di passaggio tra curva e controcurva, eccessiva distanza delle tangenti di due curve successive, raggi di curvatura troppo ampi, irregolarità delle curve (vecchie difese, curve policentriche o varianti al tracciato del progetto) ed il non completamento delle opere di sistemazione (esempio riportato in figura). Nei punti sopra descritti si creano quindi tratti di fiume caratterizzati da bassi fondali i quali possono impedire il transito dei natanti.

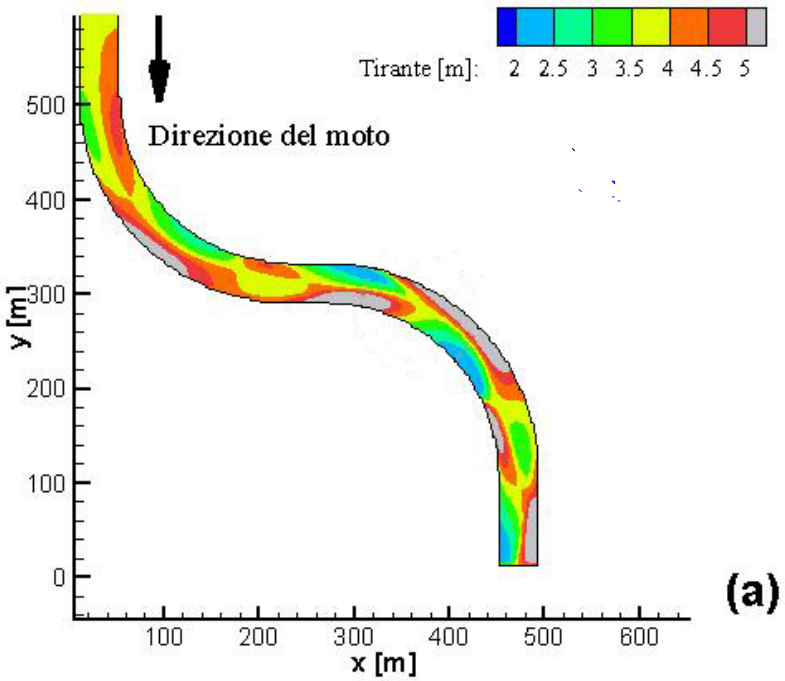


Figura 128 – Esempio di distribuzione dei tiranti lungo un tratto fluviale

L'individuazione dei tratti in cui il tirante idrico risulta insufficiente ai fini della navigazione commerciale è stata condotta analizzando i dati dei rilievi giornalieri eseguiti dai tecnici dell'Ufficio Navigazione Interna di AIPO effettuati nel periodo 1994-2013, per le località caratterizzate dalla presenza di bassi fondali, in particolare nel tratto di fiume Po compreso tra foce Mincio e Po di Goro, che non è ancora stato interessato da interventi di sistemazione atti a realizzare un canale navigabile.

L'analisi è stata condotta sulla base dei dati disponibili, in particolare il dato fornito individua, per ciascuna località presa in considerazione, il numero di giorni annui in cui il tirante idrico risulta inferiore a 2,0 m.

Nelle tabelle successive si riportano, per ognuna delle località disponibili, i valori della persistenza, in giorni, di fondali inferiori a 2,00 metri per ciascun anno del periodo 1994 – 2013.

Nome Località	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FOCE MINCIO	0	5	0	9	9	9	0	0	31	129	32	50	64	12	0	0	0	0	5	0
FOCE SECCHIA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	5	42	75	93	19	0	0	0	19	0
SABBIONCELLO	0	0	0	0	7	0	10	0	6	8	34	103	74	105	64	35	32	11	60	44
BONIFICA SABBIONCELLO	0	0	0	3	0	0	0	0	36	103	4	44	45	6	2	36	20	1	70	0
MONTE QUINGENTOLE	0	7	11	60	24	28	17	0	36	89	38	97	186	239	98	14	0	4	18	72
VALLE QUINGENTOLE	0	0	9	2	32	0	46	0	6	42	69	83	181	214	87	99	7	82	73	48
PEREROLO	0	0	0	18	15	28	0	0	0	0	7	67	61	0	0	22	2	10	106	37
MONTE CARLETTE	0	4	0	2	0	0	19	0	0	82	0	54	70	38	0	0	0	0	0	0
CARLETTE	0	21	10	6	25	0	0	0	0	33	32	69	152	175	134	109	58	33	58	15
FORNACI	0	0	0	52	38	34	18	0	0	43	21	63	76	104	63	16	75	78	84	68
PAGLIOTTA	9	10	0	0	36	10	6	0	0	72	0	63	82	59	6	25	2	6	73	13
MONTE OSTIGLIA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
MONTE P.TE REVERE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	0	23	40	0	0	0	0	0	0	0
RONCHI	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	71	124	137	13	0	7	0	0	0
BONIZZO	18	18	5	63	35	21	45	6	23	69	3	37	82	180	71	1	0	0	72	18
MELARA	13	44	13	15	36	28	41	4	24	9	9	51	85	210	46	73	95	133	193	121
VALLE MELARA	0	28	0	92	0	0	36	0	0	2	0	41	145	190	128	0	11	0	0	36
PRADONI	0	2	0	28	22	33	11	8	32	97	58	71	122	135	65	109	7	0	47	0
MERICONDA	0	0	0	11	10	0	25	0	0	79	0	91	91	95	12	99	25	1	14	3
ISOLA CANTUTTI	0	27	0	41	18	26	32	0	48	0	28	87	100	9	4	6	15	0	0	0
VALLE ISOLA CANTUTTI	0	0	0	0	0	0	0	19	34	74	29	77	79	73	12	27	0	38	102	35
BARONI	0	10	0	10	5	0	0	0	25	11	24	9	60	62	0	0	0	3	80	0
BERGANTINO	12	4	0	0	1	0	0	0	0	67	20	33	74	2	1	0	0	0	0	3
CROSSINE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0	19	67	89	13	0	0	0	0	0
MONTE P.TE	15	12	0	2	0	0	0	0	12	131	57	75	100	81	6	22	13	34	91	15
PONTE CASTELMASSA	9	3	5	3	0	0	0	0	0	71	29	55	81	61	1	0	0	0	15	0
CASTELMASSA	0	0	0	0	21	40	56	0	0	109	58	95	197	239	109	0	24	0	1	0
BOSCO CAPOSOTTO	45	69	7	34	34	43	42	13	55	122	63	125	126	108	35	37	44	71	194	70
CALTO	40	9	19	47	41	25	0	0	22	167	58	71	114	155	104	27	43	99	185	120
FELONICA	0	11	19	28	20	27	8	0	3	117	58	70	177	217	113	74	68	69	150	42
CHIAVICA DI CALTO	0	0	0	0	0	21	14	0	54	140	66	90	98	127	124	124	60	113	124	44
ISOLA MALAVASI	32	19	4	15	28	6	5	0	6	0	25	80	221	175	0	0	40	125	225	124
Nome Località	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**
MERLINO	1	4	2	44	0	0	0	0	0	0	0	36	104	178	10	0	4	111	82	0
CA' POLESINE	39	10	0	37	23	23	4	0	0	47	0	14	71	94	37	20	0	53	103	61
FRONTE FICAROLO	0	7	0	48	0	0	0	0	10	127	16	94	180	119	11	0	0	0	35	0
CHIAVICA PILASTRESI	14	30	4	17	36	45	5	0	15	92	10	94	178	175	101	0	0	0	0	1
FONDO CALZA	0	0	4	7	5	0	0	0	0	78	29	33	31	0	0	0	0	0	0	0
GAIBA	48	35	9	45	24	49	30	1	0	25	0	0	29	36	72	0	0	8	2	3
VALLE GAIBA	0	10	0	60	28	0	84	23	69	110	41	118	161	240	150	144	19	116	177	59
RAVALLE	39	12	7	0	33	32	26	2	15	46	0	69	115	97	103	109	48	128	179	95
BONELLO	34	0	0	50	7	34	77	30	47	83	42	92	111	88	44	11	1	40	160	123
MONTE STIENTA	0	0	0	0	0	0	19	0	33	24	0	0	0	0	2	0	0	101	160	38
STIENTA	0	0	0	0	3	26	71	22	64	119	52	89	115	87	107	111	4	0	0	0
CA' PRINELLA	22	14	0	39	32	40	36	6	78	95	20	77	114	117	29	41	29	123	162	43
OCCHIOBELLO	0	0	0	0	0	0	2	0	0	16	0	25	68	85	67	29	0	5	136	0
MALCANTONE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	1
PONTELAGOSCURO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	72	99	172	91	24	0	0	68	0
ISOLA BIANCA	30	31	7	66	33	47	52	8	56	129	27	66	75	93	75	38	49	163	191	81
FRANCOLINO	27	0	11	67	41	36	0	3	12	82	24	75	91	81	3	39	8	33	57	22
PAVIOLE	27	18	18	13	30	40	40	22	73	76	30	107	150	176	148	37	26	72	83	1
BORGO DI PESCARA	0	10	7	37	9	32	44	0	1	42	2	98	102	41	66	60	16	62	96	38
GAROFALO	0	4	0	61	25	28	21	11	38	0	0	85	114	81	33	3	10	49	90	19
MONTE ZOCCA	0	0	0	17	2	0	0	0	0	0	0	0	6	104	15	0	0	0	0	0
PONTE POLESELLA	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CRESPINO	29	0	8	87	52	57	87	0	91	87	62	139	91	57	15	7	39	33	112	61
PASSETTO	0	0	0	0	0	0	29	0	0	140	5	18	108	112	1	0	0	0	0	1
VICENTINA	0	0	0	41	0	0	0	0	0	56	0	0	57	36	1	0	0	0	0	0
CANALNUOVO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
CA' MATTE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	168	6	47	0	0	0	0	0	0	0	0
VALLE S. MARIA IN PUNTA	0	0	0	0	0	0	1	0	0	230	0	0	0	14	6	0	0	0	0	0
CORBOLA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
BOTTRIGHE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	24
MAZZORNO IN DESTRA	15	11	0	59	0	5	151	1	21	117	0	7	0	0	0	55	27	0	48	62
MAZZORNO IN SINISTRA	8	0	26	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAVANELLA	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 53 - Valori di persistenza dei bassi fondali lungo l'asta del Po a valle di foce Mincio

a media annuale del numero di giorni con fondali insufficienti calcolata sull'intero campione delle località disponibili, descrive naturalmente una estrema variabilità del dato, evidenziando però un aumento, negli ultimi anni, del numero di giorni complessivi in cui i fondali non sono sufficienti alla

navigazione, con un periodo particolarmente siccitoso fra il 2003 e il 2007 in cui per quasi 1/3 dell'anno il fiume non risultava navigabile nel tratto preso in considerazione.

Tali considerazioni sono illustrate nel grafico successivo da cui risulta evidente quanto precedentemente illustrato.

Oltre ai valori che fanno riferimento a fondali minimi pari a 2 metri, AIPO ha disponibili i valori relativi a fondali minimi pari a 2,5 metri. Naturalmente il numero di giorni in cui i fondali non raggiungono il valore di riferimento aumentano in modo significativo, con punte di oltre 100 giorni all'anno per quelli più siccitosi.

Parametro	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
MEDIA ANNUALE	8	8	3	21	13	13	19	3	17	61	18	53	83	87	39	26	14	31	62	26

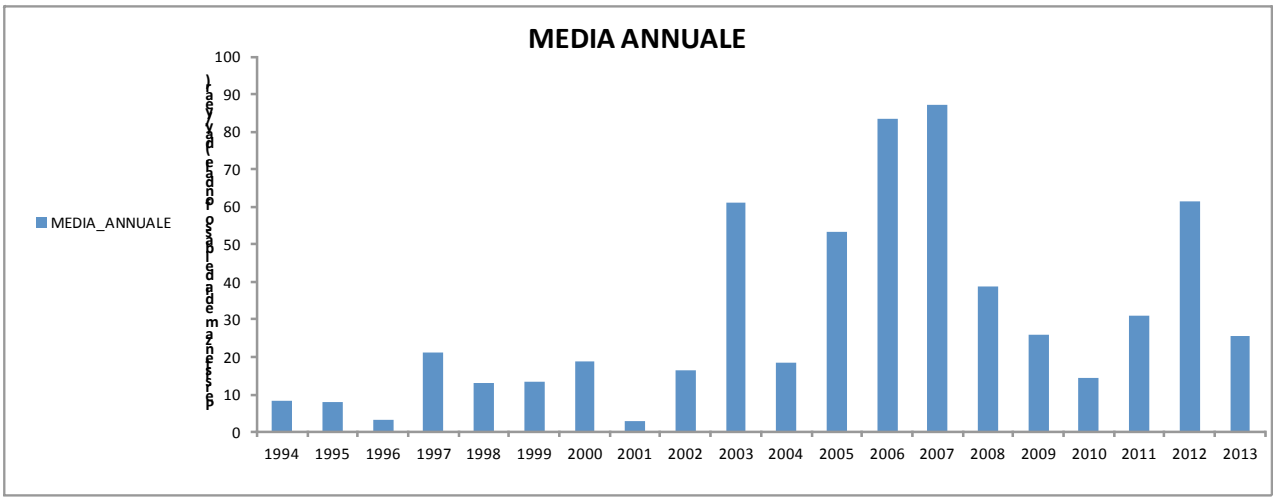


Figura 129 – media annuale del numero di giorni con fondali insufficienti calcolata sull'intero campione delle località disponibili

Alla luce delle caratteristiche sopra evidenziate si è quindi deciso di valutare differenti scenari per l'analisi del campione di dati come descritto nel seguito.

Per ogni località caratterizzata dalla presenza di bassi fondali sono state calcolate le medie dei seguenti periodi: 1994 – 2013 (campione completo); 2003 – 2013 (ultimo decennio); 2003 – 2007 (condizioni più gravose registrate) e sono quindi stati individuate le località per le quali le medie delle persistenze dei bassi fondali sono maggiori di 25 giorni; inoltre per individuare le località caratterizzate dalle criticità maggiori si è definita una scala cromatica in funzione del grado di persistenza come sotto riportato.

COLORE	DESCRIZIONE	GIORNI DI PERSISTENZA DEL FONDALE "G"
	TRATTO A RIDOTTA PERSISTENZA	*0 < G < 25*
	TRATTO A MEDIA PERSISTENZA	*25 < G < 35*
	TRATTO AD ELEVATA PERSISTENZA	*35 < G < 50*
	TRATTO CRITICO	*G > 50*

Nome Località	MEDIA 1994 - 2013	MEDIA 2003 - 2013	MEDIA 2003 - 2007
VALLE ISOLA CANTUTTI	30,0	49,6	66,4
BARONI	15,0	22,6	33,2
BERGANTINO	10,9	18,2	39,2
CROSSINE	11,5	20,8	43,2
MONTE P.TE	33,3	56,8	88,8
PONTE CASTELMASSA	16,7	28,5	59,4
CASTELMASSA	47,5	75,6	139,6
BOSCO CAPOSOTTO	66,9	90,5	108,8
CALTO	67,3	103,9	113,0
FELONICA	63,6	105,0	127,8
CHIAVICA DI CALTO	60,0	100,9	104,2
ISOLA MALAVASI	56,5	92,3	100,2
MERLINO	28,8	47,7	63,6
CA' POLESINE	31,8	45,5	45,2
FRONTE FICAROLO	32,4	52,9	107,2
CHIAVICA PILASTRESI	40,9	59,2	109,8
FONDO CALZA	9,4	15,5	34,2
GAIBA	20,8	15,9	18,0
VALLE GAIBA	80,5	121,4	134,0
RAVALLE	57,8	89,9	65,4
BONELLO	53,7	72,3	83,2
MONTE STIENTA	18,9	29,5	4,8
STIENTA	43,5	62,2	92,4
CA' PRINELLA	55,9	77,3	84,6
OCCHIOBELLO	21,7	39,2	38,8
MALCANTONE	0,3	0,5	0,8
PONTELAGOSCURO	27,2	49,4	72,0
ISOLA BIANCA	65,9	89,7	78,0
FRANCOLINO	35,6	46,8	70,6
PAVIOLE	59,4	82,4	107,8
BORGO DI PESCARA	38,2	56,6	57,0
GAROFALO	33,6	44,0	56,0
MONTE ZOCCA	7,2	11,4	22,0
PONTE POLESELLA	0,7	0,1	0,2
CRESPINO	55,7	63,9	87,2
PASSETTO	20,7	35,0	76,6
VICENTINA	9,6	13,6	29,8
CANALNUOVO	0,1	0,1	0,0
CA' MATTE	11,1	20,1	44,2
VALLE S. MARIA IN PUNTA	12,6	22,7	48,8
CORBOLA	0,2	0,4	0,0
BOTTRIGHE	1,4	2,5	0,0
MAZZORNO IN DESTRA	29,0	28,7	24,8
MAZZORNO IN SINISTRA	4,2	0,0	0,0
CAVANELLA	0,4	0,0	0,0

Tabella 54 - Valori medi di persistenza dei bassi fondali lungo l'asta del Po a valle di foce Mincio

Dalle analisi sopra riportate si ha quindi una panoramica della situazione del fiume Po allo stato attuale rispetto alla persistenza dei bassi fondali. Visualizzando in un grafico i tre valori medi analizzati si nota come il periodo 2003-2007 incida in modo particolarmente significativo sui risultati dell'elaborazione statistica essendo questi anni caratterizzati da un prolungato stato di siccità.

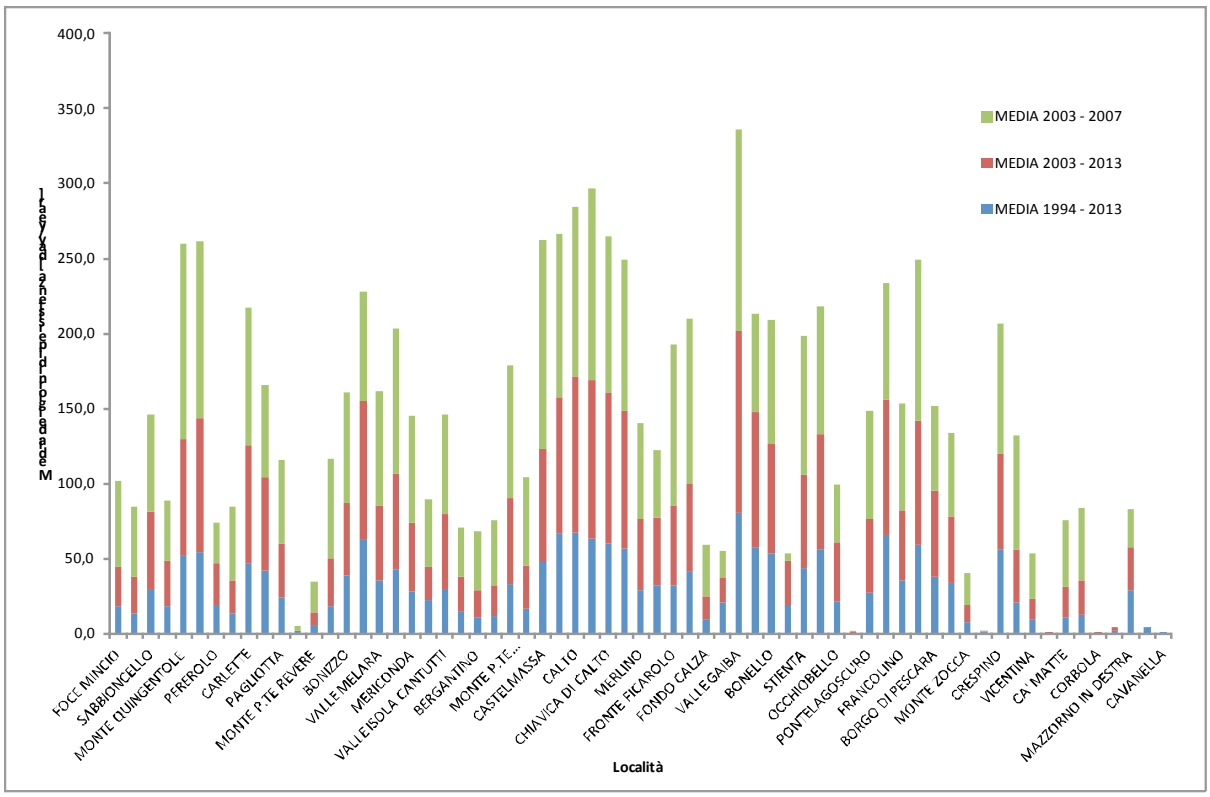


Figura 130 – Media, relativa ai diversi periodi considerati, della persistenza di bassi fondali per le diverse località lungo il fiume Po a valle di foce Mincio

Sulla base dei dati disponibili aggiornati emerge che per l'intero periodo considerato il tirante di 2 metri risulta disponibile mediamente per circa 335 giorni all'anno; la stessa statistica calcolata per i due sottointervalli, porta a valori mediamente inferiori, pari a 320 giorni per l'intervallo 2003-2013 e 305 giorni per l'intervallo 2003-2007.

Sulla base delle analisi precedenti sono state tracciate delle planimetrie dell'intero tratto del fiume oggetto di analisi da foce Mincio a Po di Goro sulle quali, con la medesima scala cromatica indicata nella presente relazione, sono state individuate le località per le quali la persistenza media dei bassi fondali è superiore ai 25 giorni/anno come quelle indicate di seguito a titolo di esempio.

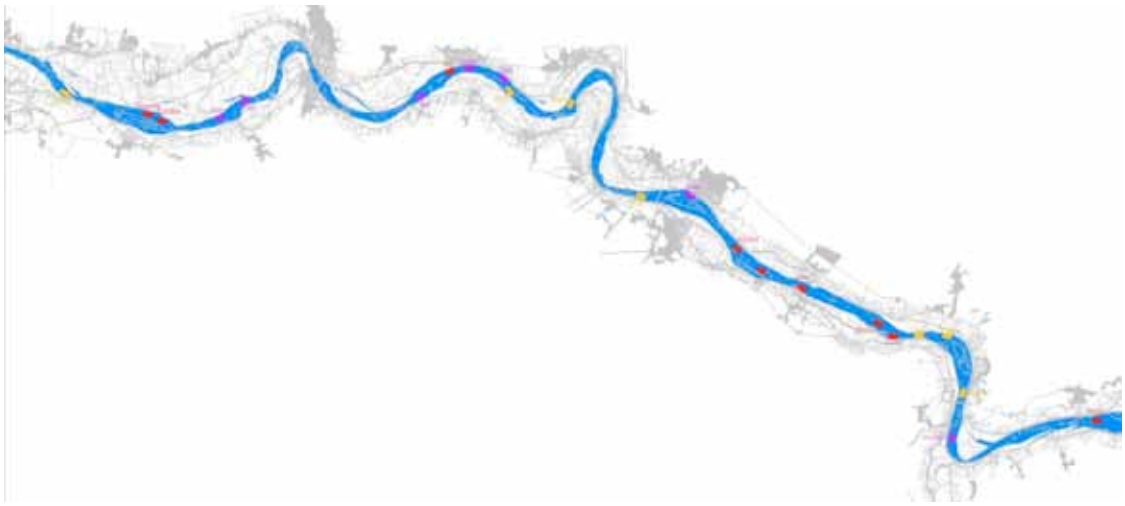


Figura 131 – Bassi fondali (< 2 m) individuati tra Foce Mincio e Valle Gaiba



Figura 132 – Bassi fondali (< 2 m) individuati tra Valle Gaiba e Po di Goro

6.6 TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO. ANALISI MODELLISTICA BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO DEI BASSI FONDALI ALLO STATO ATTUALE

Al fine di mettere a punto il necessario strumento modellistico per la valutazione delle condizioni di navigabilità, è stato implementato un modello idraulico bidimensionale a fondo fisso relativo all'alveo inciso del fiume Po compreso tra foce Mincio e l'incile del Po di Goro.

In particolare, l'analisi modellistica è stata utilizzata per verificare le attuali condizioni di navigabilità del fiume Po nel suddetto tratto, considerando i seguenti valori minimi di riferimento:

- fondale di 2,00 m per una durata media annua di 340 giorni/anno;
- fondale di 2,50 m per una durata media annua di 300 giorni/anno.

Inoltre, sono stati considerati anche i seguenti parametri:

- fondale di 2,00 m con riferimento ad una portata pari a 350 m3/s, assunta come valore di portata minima che occorre garantire alla sezione di Pontelagoscuro durante i periodi particolarmente siccitosi, attraverso la gestione dei rilasci degli invasi e delle regolazione/limitazione delle derivazioni idriche superficiali;
- fondale di 2,80 m per una durata media annua di 340 giorni/anno, considerata come condizione ottimale per la navigazione.

6.6.1 Principali caratteristiche del modello bidimensionale a fondo fisso

Anche in questo caso, come per le simulazioni esposte nel successivo paragrafo 6.4 relativo alle opere di regimazione, il modello è stato implementato mediante il programma di calcolo INFOWORKS 2D ICM di Innovyze, che permette di analizzare il campo di moto a partire da un D.T.M. (Digital Terrain Model), rappresentativo della geometria del dominio di calcolo, basandosi sulla risoluzione di tre equazioni non lineari alle differenze finite per la determinazione del campo di moto della corrente su di un piano bidimensionale (x,y). Due di queste sono le equazioni del moto nelle direzioni x e y; la terza equazione è data dalla legge di continuità che garantisce la conservazione della massa all'interno del dominio di calcolo.

In particolare, il D.T.M. utilizzato è quella dell'Autorità di bacino del fiume Po effettuato nel 2005.

Il tratto di fiume implementato con il modello sopra richiamato ha un'estensione longitudinale complessiva pari a circa 110 km. L'intero tratto è stato suddiviso in tre parti:

1. da foce Mincio a Sermide, per un'estensione complessiva di circa 35 km;
2. da Sermide a Pontelagoscuro, per un'estensione complessiva di circa 35 km;
3. da Pontelagoscuro fino all'incile del Po di Goro, per un'estensione complessiva di circa 40 km.

Tale suddivisione è stata effettuata per poter utilizzare come condizione al contorno dei singoli tratti i valori di portata e livello registrati presso gli idrometri di Sermide e Pontelagoscuro.

Per tutti i tre tratti il dominio di calcolo si estende all'alveo inciso del fiume Po.

La superficie delle singole maglie di calcolo che costituiscono il dominio del modello è compresa tra 50 e 250 mq. Nelle zone in prossimità delle opere presenti all'interno dell'alveo inciso (pennelli) il reticolo è ancor più dettagliato con la definizione di una superficie della maglia di calcolo compresa tra 25 e 50 mq.

Complessivamente ciascun modello bidimensionale implementato presenta un numero di elementi della maglia (triangoli) pari complessivamente a:

1. da foce Mincio a Sermide: 376'000 celle;
2. da Sermide a Pontelagoscuro: 310'000 celle;
3. da Pontelagoscuro fino all'incile del Po di Goro: 293'000 celle.

Nelle figure seguenti sono rappresentati i domini di calcolo generati per i tre tratti di interesse.

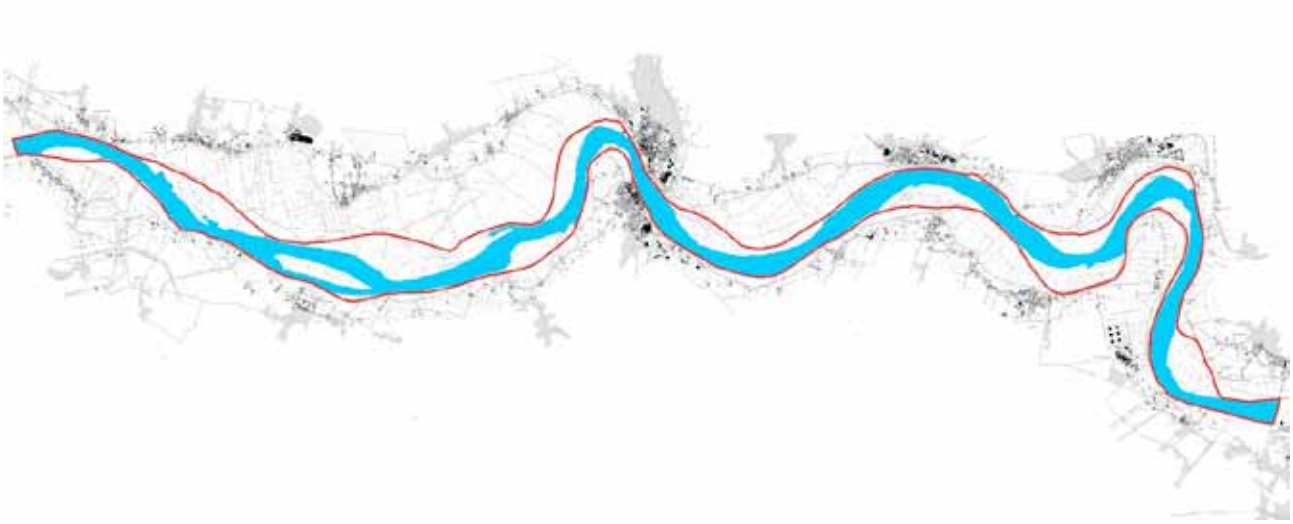


Figura 133 – Dominio di calcolo del tratto compreso tra foce Mincio e Sermide



Figura 134 – Dominio di calcolo del tratto compreso tra Sermide e Pontelagoscuro



Figura 135 – Dominio di calcolo del tratto compreso tra Pontelagoscuro e l'incile del Po di Goro

6.6.2 Condizioni al contorno del modello bidimensionale a fondo fisso

Il modello è stato sempre utilizzato in regime di moto permanente e cioè imponendo in input nella sezione di monte un valore costante della portata e in corrispondenza della sezione finale un livello idrico costante.

Per ciascun tratto sono state considerate le seguenti condizioni al contorno:

- condizione di monte: portata costante corrispondente agli scenari definiti in precedenza: portata di durata media annua di 340 giorni/anno, portata di durata media annua di 300 giorni/anno, portata minima obbiettivo a Pontelagoscuro (pari a 350 m3/s);
- condizione di valle: quote idriche dedotte dagli idrometri di Sermide (I tratto), Pontelagoscuro (II tratto); per il III tratto si è considerato come condizione di valle presso l'incile del Po di Goro il valore di 0,0 m s.m..

Per definire le portate di riferimento in base a cui effettuare le analisi modellistiche, si è fatto riferimento alla scala di deflusso delle portate del Po a Pontelagoscuro. La portata valutata in tale sezione è valida per l'intero tratto posto a valle di foce Mincio/Secchia, in quanto gli unici apporti residui (confluenza Panaro e apporto della falda freatica) sono, in condizione di magra, molto limitati; inoltre lungo il tratto sono presenti delle derivazioni irrigue che sostanzialmente compensano tali apporti.

Di seguito si riporta la scala delle portate del Po a Pontelagoscuro, ricavata dagli annali idrologici pubblicati dall'ARPA Emilia Romagna - Servizio Idrometeorologico - Area Idrologia nel 2013.

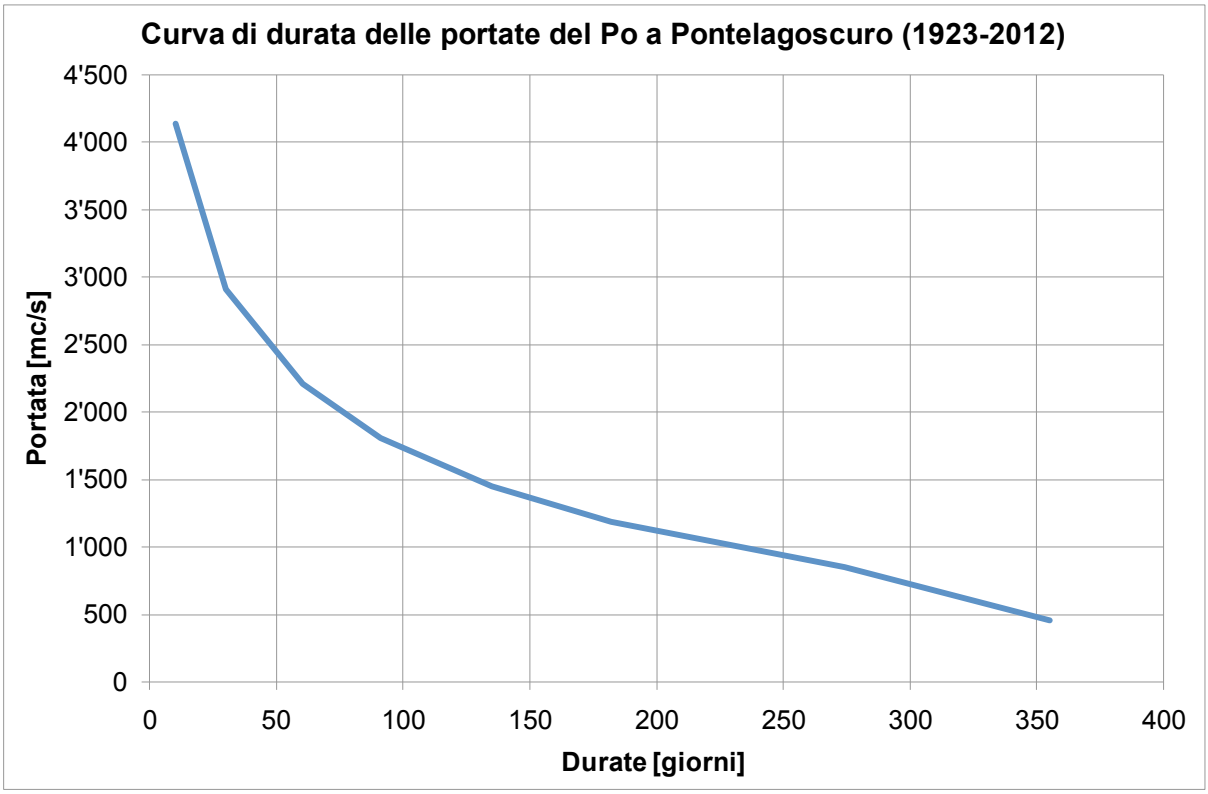


Figura 136 – Curva di durata delle portate del fiume Po a Pontelagoscuro

Da tale curva sono stati dedotti i valori della portata corrispondente alle durate 340 e 300 giorni, di seguito riportate:

- portata di durata media annua di 340 giorni/anno: 530 m3/s;
- portata di durata media annua di 300 giorni/anno: 725 m3/s.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno di valle, in relazione ai dati contenuti negli annali idrologici pubblicati dall'ARPA Emilia Romagna - Servizio Idrometeorologico - Area Idrologia, sono state considerate le seguenti quote assolute:

- livello a Sermide per Q = 530 m3/s: 5.91 m s.m. (da annale 2008);
- livello a Sermide per Q = 725 m3/s: 6.39 m s.m. (da annale 2008);
- livello a Sermide per Q = 350 m3/s: 5.41 m s.m. (da annale 2012);
- livello a Pontelagoscuro per Q = 530 m3/s: 1.92 m s.m. (da annale 2005);
- livello a Pontelagoscuro per Q = 725 m3/s: 2.37 m s.m. (da annale 2005);
- livello a Pontelagoscuro per Q = 350 m3/s: 1.41 m s.m. (da annale 2005);
- livello all'incile del Po di Goro per Q = 530 m3/s: 0.00 m s.m.;
- livello all'incile del Po di Goro per Q = 725 m3/s: 0.00 m s.m.;
- livello all'incile del Po di Goro per Q = 350 m3/s: 0.00 m s.m..

6.6.3 Taratura del modello 2D a fondo fisso

Ai fini della taratura dei modelli bidimensionali dei tre tratti di alveo considerati, si è fatto riferimento ai dati idrometrici registrati e pubblicati negli annali annali idrologici pubblicati dall'ARPA Emilia Romagna - Servizio Idrometeorologico - Area Idrologia.

La taratura del modello è avvenuta utilizzando come parametri di controllo le scabrezze dell'alveo di magra, che rappresenta l'unica porzione dell'alveo interessata dai deflussi considerati in questa

fase, e come termini di confronto le quote idriche in corrispondenza delle sezioni munite di idrometri, ossia Sermide e Pontelagoscuro.

In particolare il livello misurato dall'idrometro di Sermide è stato utilizzato per calibrare il modello del secondo tratto, compreso tra Sermide e Pontelagoscuro, mentre il livello misurato dall'idrometro di Pontelagoscuro è stato utilizzato per calibrare il modello del terzo tratto, compreso tra Pontelagoscuro e l'incile del Po di Goro. Per il primo tratto non si ha a disposizione un idrometro con misura in quote assolute del livello corrispondente ad una data portata, per cui si è utilizzato il medesimo coefficiente di scabrezza ottenuto dalla taratura dei due tratti di valle (l'idrometro ufficiale più vicino a foce Mincio è quello di Borgoforte, che è posto 22 km a monte).

Il processo di taratura effettuato ha portato a definire la scabrezza dell'alveo, lungo l'intero tratto tra foce Mincio e l'incile del Po di Goro, pari a 0,028 m-1/3 s secondo Manning.

Di seguito si riportano i risultati di confronto tra i livelli misurati e i corrispondenti valori calcolati dal modello bidimensionale.

Tratto	Portata	Livello misurato [m s.m.]	Livello calcolato [m s.m.]	Differenza [m]
Da Sermide a Pontelagoscuro (misure presso idrometro di Sermide)	350	5.41	5.25	0.16
	530	5.91	5.87	0.04
	725	6.39	6.43	-0.04
Da Pontelagoscuro all'incile del Po di Goro (misure presso idrometro di Pontelagoscuro)	350	1.41	1.50	-0.09
	530	1.92	1.97	-0.05
	725	2.37	2.40	-0.03

Tabella 55 - Confronto tra livelli misurati presso gli idrometri e i livelli calcolati dal modello 2D

Si segnala che la taratura del modello tra Pontelagoscuro e l'incile del Po di Goro ha portato ad utilizzare anche un coefficiente di scabrezza di Manning pari a 0.014 m-1/3 s, limitatamente al tratto compreso tra Pontelagoscuro e Polesella, in quanto ampie zone del D.T.M. utilizzato per implementare il modello bidimensionale sono state ricavate come interpolazione tra il rilievo batimetrico realmente effettuato e il rilievo laser-scanner delle porzioni di alveo emerse, come probabile sovrastima delle quote di alcune porzioni dell'alveo di magra.

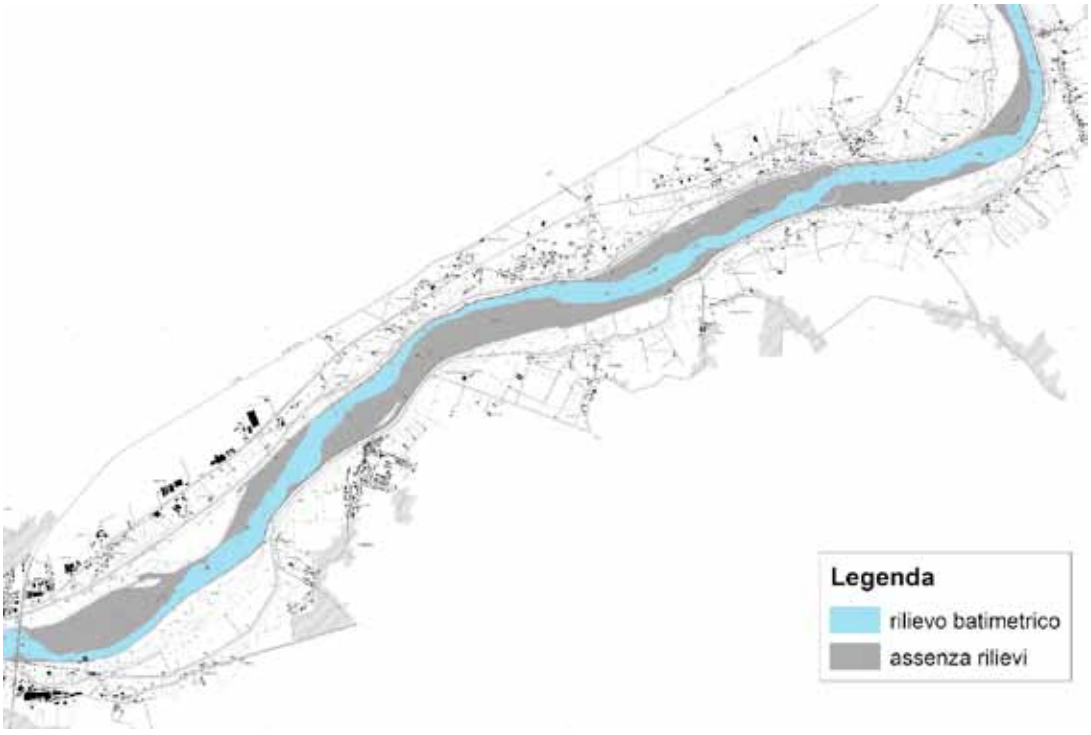


Figura 137 - Tratto di fiume Po tra Pontelagoscuro e Polesella. Estensione presenza/assenza rilievo batimetrico

6.6.4 Risultati del modello 2D a fondo fisso

Attraverso le analisi modellistiche sono state individuate, per l'intero tratto fluviale tra foce Mincio e l'incile del Po di Goro, le aree dell'alveo di magra caratterizzate da (v. ALLEGATO n. 3):

- tirante idrico maggiore di 2,20 m (2,00 + 0,20 di franco) con riferimento ad una portata pari a 530 m3/s (v. Allegato 3.1);
- tirante idrico maggiore di 2,70 m (2,50 + 0,20 di franco) con riferimento ad una portata pari a 725 m3/s (v. Allegato 3.2);
- tirante idrico maggiore di 2,20 m (2,00 + 0,20 di franco) con riferimento ad una portata di 350 m3/s (v. Allegato 3.3);
- tirante idrico maggiore di 3,00 m (2,80 + 0,20 di franco) con riferimento ad una portata pari a 530 m3/s (v. Allegato 3.4).

Tenuto conto che l'obiettivo di queste analisi modellistiche è quello di verificare le anzidette criticità per la navigazione in condizioni di magra, si sintetizzano qui di seguito le risultanze in merito alle larghezze della corrente ove sono presenti i sopraccitati fondali minimi. In particolare:

- andamento della larghezza dell'alveo navigabile caratterizzato da tirante maggiore di 2.2 m per una portata pari a 530 m3/s (v. ALLEGATO 3.1);
- andamento della larghezza dell'alveo navigabile caratterizzato da tirante maggiore di 3.0 m per una portata pari a 530 m3/s (v. ALLEGATO 3.2)
- andamento della larghezza dell'alveo navigabile caratterizzato da tirante maggiore di 2.7 m per una portata pari a 725 m3/s (v. ALLEGATO 3.3);
- andamento della larghezza dell'alveo navigabile caratterizzato da tirante maggiore di 2.2 m per una portata pari a 350 m3/s (v. ALLEGATO 3.4).

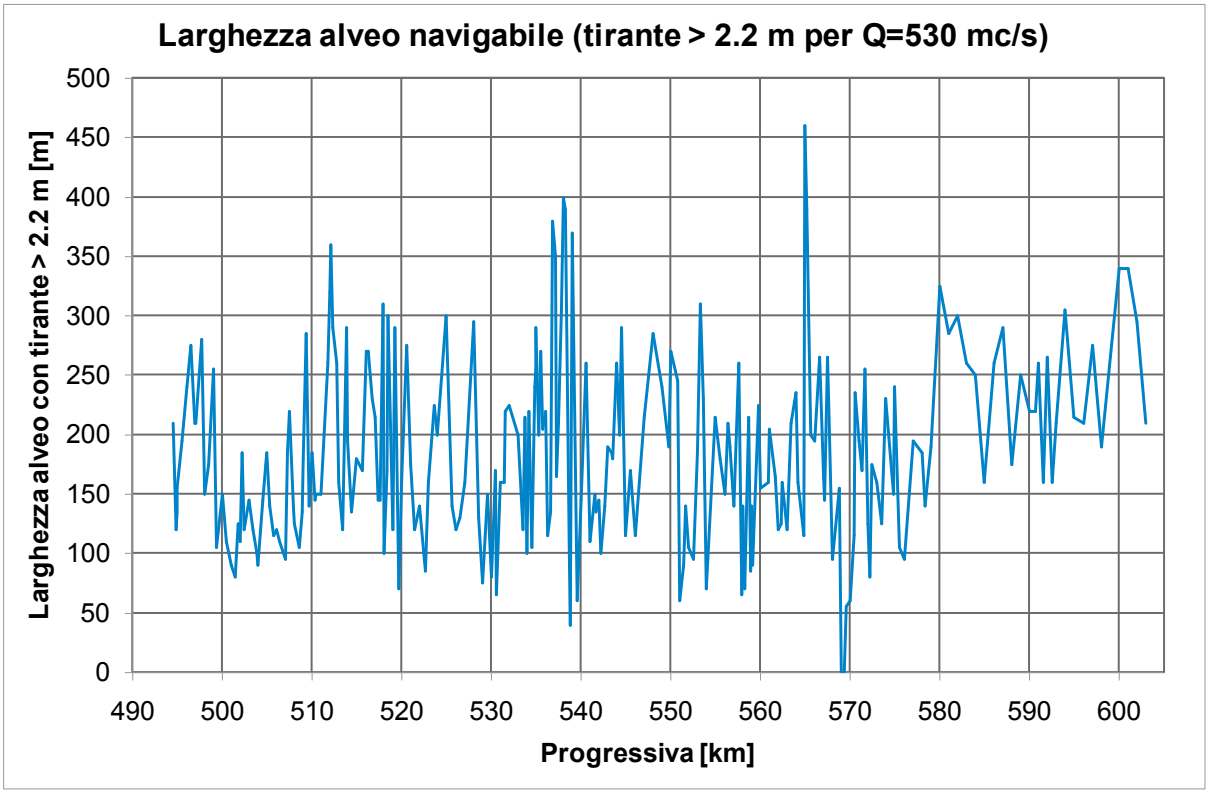


Figura 138 - Andamento della larghezza dell'alveo navigabile caratterizzato da tirante maggiore di 2.2 m per una portata pari a 530 mc/s (portata media annua di 340 gg/anno)

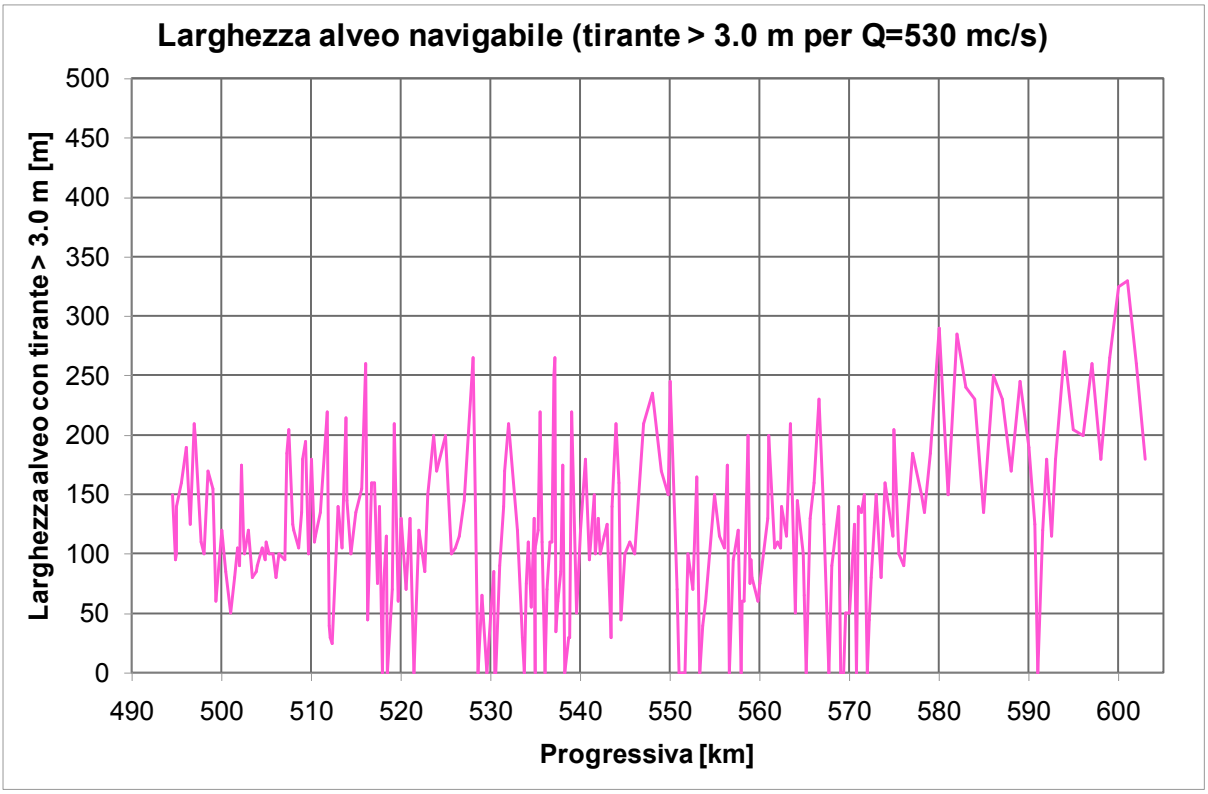


Figura 139 - Andamento della larghezza dell'alveo navigabile caratterizzato da tirante maggiore di 3.0 m per una portata pari a 530 mc/s (portata media annua di 340 gg/anno)

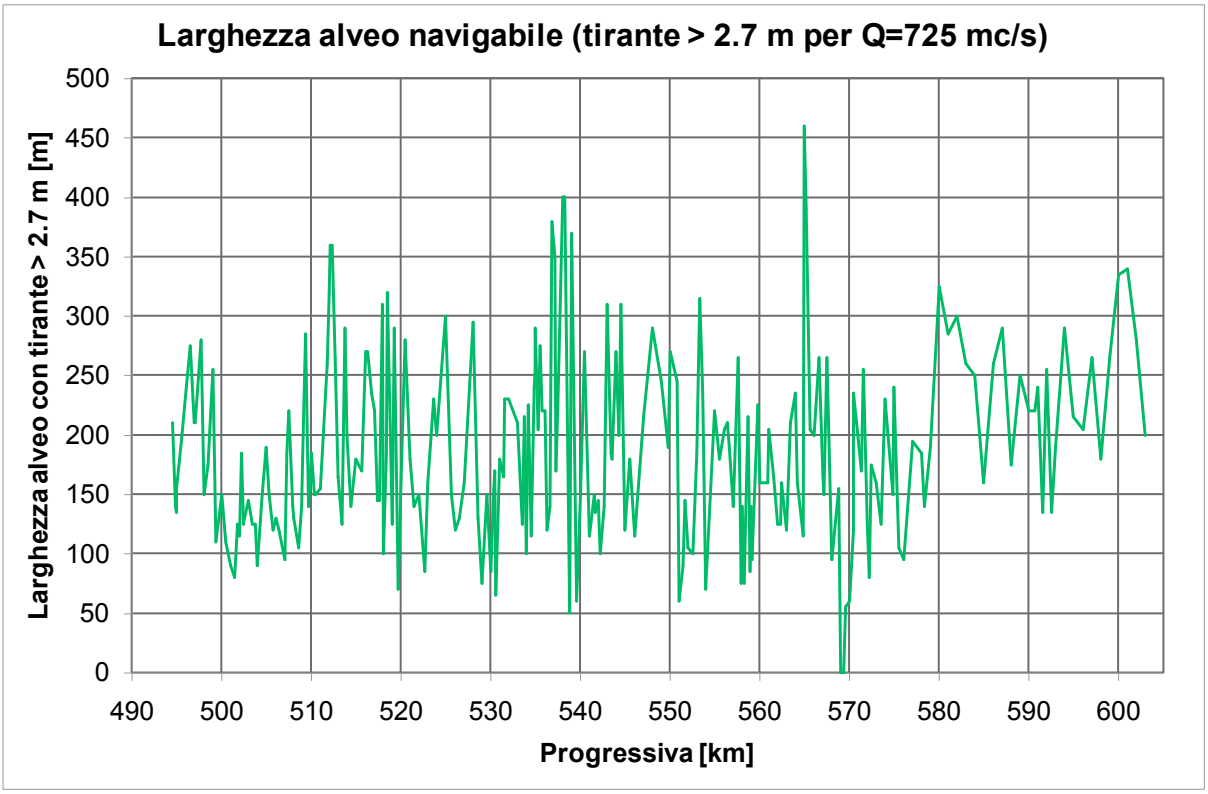


Figura 140 - Andamento della larghezza dell'alveo navigabile caratterizzato da tirante maggiore di 2.7 m per una portata pari a 725 mc/s (portata media annua di 300 gg/anno)

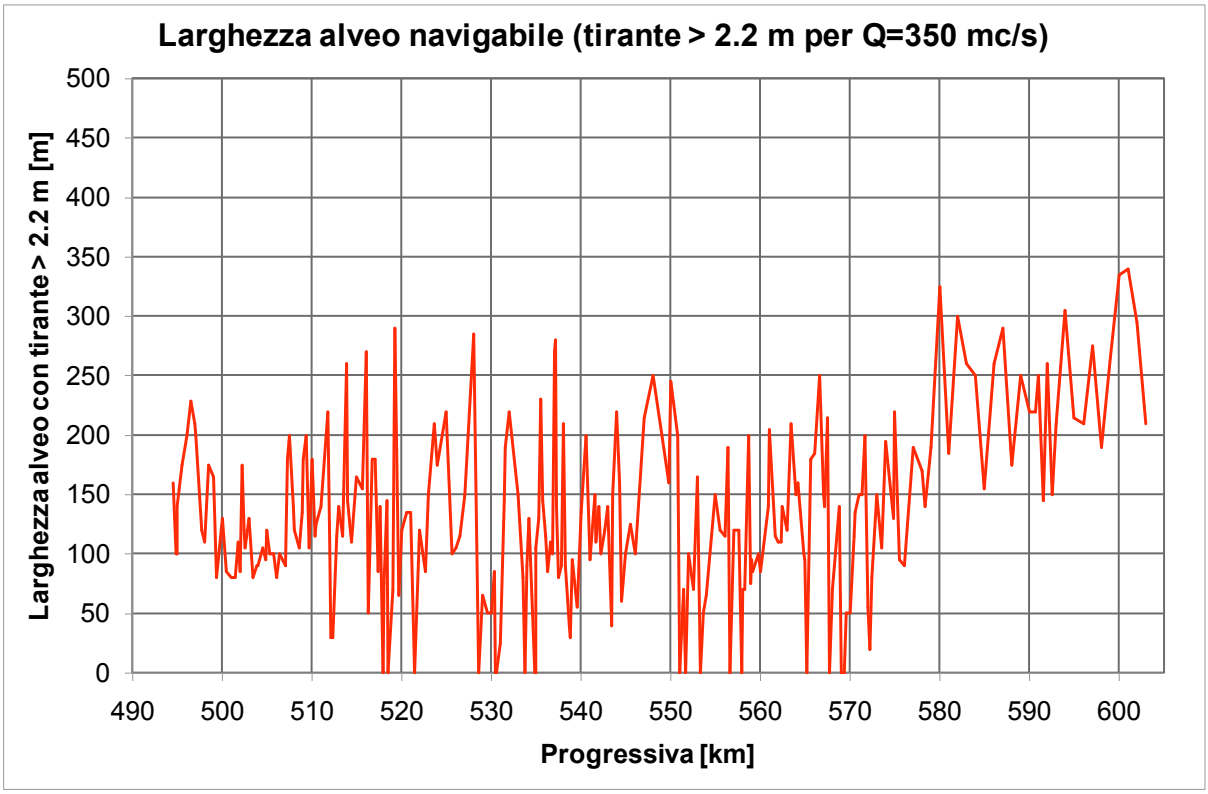


Figura 141 - Andamento della larghezza dell'alveo navigabile caratterizzato da tirante maggiore di 2.2 m per una portata pari a 350 mc/s

6.6.5 Punti critici con riferimento al fondale minimo di 2.2 m con portata di 530 m3/s (durata 340 gg/anno)

Rimandando ai citati allegati per i risultati di dettaglio, di seguito, per una più agevole e sintetica comprensione, vengono elencati i tratti che presentano situazioni critiche dal punto di vista della navigabilità.

Considerando i seguenti criteri per definire la presenza di criticità:

- portata pari a 530 m3/s (portata con durata media annua di 340 giorni/anno),
- tirante idrico maggiore di 2.2 m s.m.,
- larghezza alveo caratterizzato da tali tiranti inferiore a 100 m,

si ha che i tratti che presentano problemi per la navigazione sono localizzati:

- a Quingentole, dal km 500.5 al km 501.5;
- a Carlette/Pieve di Coriano, al km 504;
- a Pagliotta (monte di Ostiglia), al km 507;
- a Mericonda/Borgofranco sul Po, al km 518;
- a Isola Cantutti/Carbonara di Po, tra il km 519 e il km 520;
- a Bergantino, al km 522.5;
- a Sermide/Castelmassa, tra il km 530 e il km 531;
- a Isola Malavasi, al km 539.6;
- tra Gaiba e Ravalle, dal km 551 al km 552.5;
- a Bonello (a monte di Stienta), al km 554;

- a Cà Prinella/Occhiobello, tra il km 557.8 e il km 559.2;
- a Francolino, al km 568 e dal km 569 al km 570.2 (si evidenzia che tra il km 569 e il km 569.3 l'alveo ha tiranti inferiori a 2.2 m per l'intera larghezza);
- a Borgo di Pescara/Fossa d'Albero, al km 572.2;
- a Ro, nei pressi del km 576.

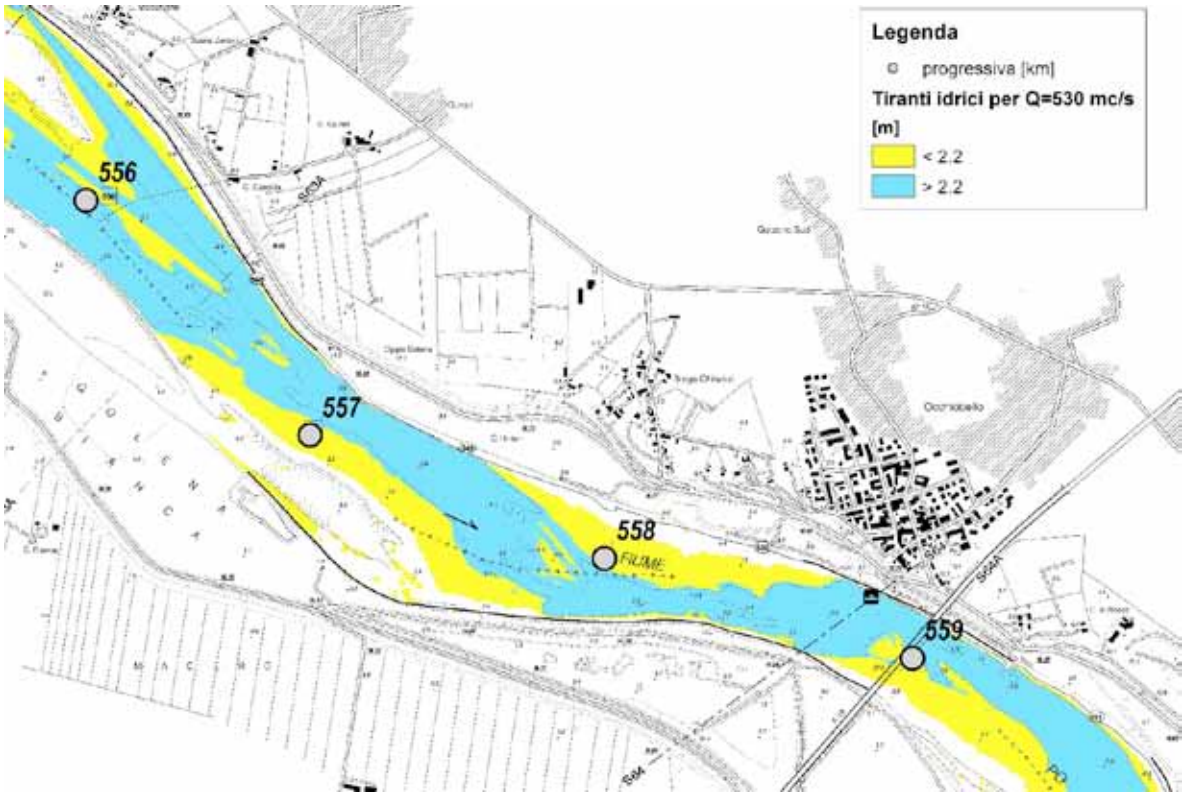


Figura 142 - Stralcio della cartografia riportata nell'Allegato 2.3 con rappresentati i tiranti in condizioni di magra (Q=530 m3/s) nei pressi di Occhiobello

6.6.6 Punti critici con riferimento al fondale minimo di 2.2 m con portata di 350 m3/s (portata obiettivo a Pontelagoscuro)

Rimandando ai citati allegati per i risultati di dettaglio, di seguito, per una più agevole e sintetica comprensione, vengono elencati i tratti che presentano situazioni critiche dal punto di vista della navigabilità.

Considerando i seguenti criteri per definire la presenza di criticità:

- portata pari a 350 m3/s (valore di portata minima che occorre garantire alla sezione di Pontelagoscuro durante i periodi particolarmente siccitosi, attraverso la gestione dei rilasci degli invasi e delle regolazione/limitazione delle derivazioni idriche superficiali),
- tirante idrico maggiore di 2.2 m s.m.,
- larghezza alveo caratterizzato da tali tiranti inferiore a 100 m,

si ha che i tratti che presentano problemi per la navigazione sono localizzati:

- a Bonifica Sabbioncello, al km 499.4;
- a Quingentole, dal km 500.2 al km 502;
- a Carlette, Fornaci, Pagliotta, dal km 503 al km 507;
- a Ronchi, dal km 512 al km 512.5;

- a Melara, al km 516.3;
- a Mericonda/Borgofranco sul Po, tra il km 518 e il km 519 (si evidenzia che al km 518 l'alveo ha tiranti inferiori a 2.2 m per l'intera larghezza);
- a Isola Cantutti/Carbonara di Po, tra il km 519 e il km 520;
- a Baroni, al km 521.4 (l'alveo ha tiranti inferiori a 2.2 m per l'intera larghezza);
- a Bergantino, al km 522.5;
- a Sermide/Castelmassa, tra il km 528 e 529 e tra il km 530 e il km 531 (l'alveo ha tiranti inferiori a 2.2 m per l'intera larghezza);
- a Calto e Felonica, tra il km 533.5 e il km 535;
- a Chiavica di Calto, Isola Malavasi e Merlino, tra il km 536 e il km 540;
- a Ficarolo, tra il km 543.0 e il km 543.5;
- a Chiavica Pilastresi, tra il km 544.5 e il km 545.0;
- a Gaiba, Ravalle e Bonello, dal km 551 al km 554.5;
- a Stienta (Golena Bianca), tra il km 556.5 e il km 557.0;
- a Cà Prinella e Occhiobello, tra il km 557.8 e il km 560.2;
- a Isola Bianca, nell'intorno del km 565;
- a Francolino e Paviole, dal km 567.5 al km 570.2 (si evidenzia che tra il km 569 e il km 569.3 l'alveo ha tiranti inferiori a 2.2 m per l'intera larghezza);
- a Borgo di Pescara/Fossa d'Albero, al km 572.2;
- a Ro, dal km 575.5 al km 576.

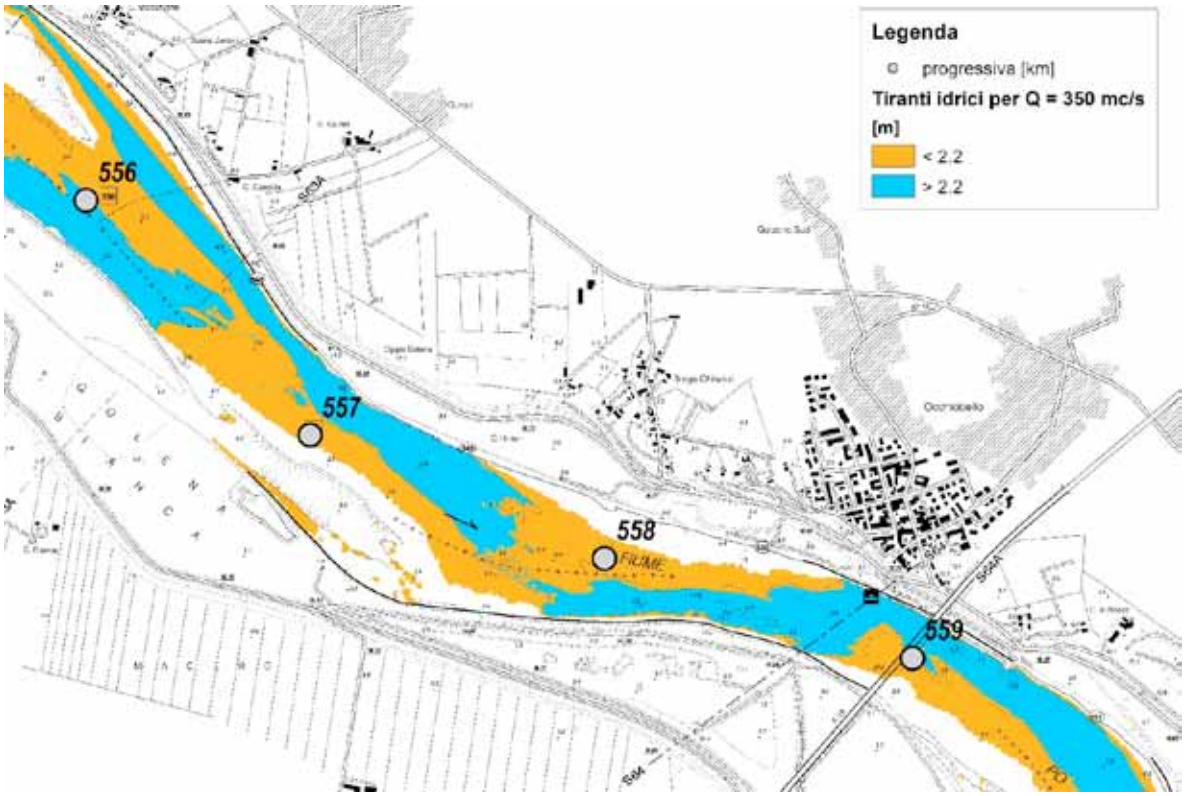


Figura 143 - Stralcio della cartografia riportata nell'Allegato 2.3 con rappresentati i tiranti in condizioni di magra (Q=350 m3/s) nei pressi di Occhiobello

6.6.7 Conclusioni

Dall'analisi dei risultati delle analisi modellistiche effettuate mediante modello bidimensionale a fondo fisso, si ha una sostanziale conferma delle criticità per la navigazione già individuate analizzando i rilievi giornalieri dei bassi fondali eseguiti dai tecnici dell'Ufficio Navigazione Interna di AIPO nel periodo 1994-2013.

6.7 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI E DELL'ASSETTO DI PROGETTO DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA

Il tratto di Po a valle di foce Mincio risulta ancora privo di interventi significativi di sistemazione a corrente libera se non per alcuni interventi locali molto limitati per la definizione di alcune curve di navigazione e la protezione di piedi arginali particolarmente soggetti a fenomeni di erosione e di dissesto.

Fra le attività previste nell'ambito del presente studio rientra l'individuazione delle opere necessarie alla realizzazione della così detta sistemazione a corrente libera dell'alveo di magra per la definizione di un canale navigabile avente caratteristiche geometriche e morfologiche adeguate al transito di imbarcazioni della Va classe C.E.M.T.

Nella individuazione degli interventi si è tenuto anche conto di quanto proposto nell'ambito del progetto preliminare di "*adeguamento delle condizioni di navigabilità dell'alveo di magra del fiume Po per navi di Va classe – Revere-Ferrara*" predisposto da AIPo per la sistemazione di alcuni tratti del fiume a valle di foce Mincio.

Il tratto a valle di foce Mincio e fino a Po di Goro, interessato dalla sistemazione a corrente libera, si estende dalla chilometrica 495 alla chilometrica 595 per un estensione totale pari a circa 100 km.

Lungo l'intero tratto sono state ipotizzate una serie di opere sia di tipo longitudinale che trasversale che intervengo su un totale di 34 curve in modo tale da disegnare un alveo di magra che garantisca i tiranti necessari alla navigazione. Le opere si rifanno alle tipologie già utilizzate negli interventi effettuati in situazioni analoghe da AIPo e si caratterizzano per un'altezza tale da essere sormontate, nella maggior parte dei casi, per portate dell'ordine di 800 m3/s in modo da contenere le portate di magra del fiume, ma essere sormontate non appena le portate salgono a valori superiori. Tale conformazione garantisce la continuità delle dinamiche fluviali mantenendo i processi di trasporto solido nelle aree retrostanti con opere che sono sempre più basse delle aree golenali limitrofe.

I pennelli trasversali, come noto, hanno lo scopo di concentrare il filone del canale di navigazione in una zona determinata entro la quale far passare il percorso navigabile, favorendo al tempo stesso il deposito nelle zone comprese fra i pennelli e la sponda che risulta in tal modo protetta dai fenomeni erosivi.

Le difese spondali a loro volta vengono poste sull'esterno della curva di navigazione per disegnarne l'andamento planimetrico e innescare i fenomeni idrodinamici che permettono la formazione di un canale sufficientemente profondo per garantire i tiranti necessari al passaggio dei natanti.

Dal punto di vista planimetrico, nel tratto a valle di foce Mincio sono state individuate complessivamente un totale di circa 33,5 km di nuove opere longitudinali di difesa spondale, 23 km circa di pennelli trasversali e 2,5 km di opere esistenti da demolire, per un totale di 56/57 km di nuove opere. A queste vanno aggiunte le opere già esistenti, realizzate in parte a protezione dei rilevati arginali e in parte per il disegno delle curve planimetriche, che ammontano complessivamente a 80 km circa, che sommate alle precedenti portano ad un totale complessivo pari a circa 133 km.

Nel tratto di monte da Cremona a foce Mincio, lungo complessivamente 125 km, già sistemato con gli interventi per la realizzazione della corrente libera, lo sviluppo complessivo delle opere, comprese quelle del progetto definitivo di AIPo per la correzione di alcuni bassi, ammonta complessivamente a circa 166 km, di cui 161 km circa, di opere longitudinali e 5 km circa di pennelli trasversali.

Come riepilogato nella tabella successiva, l'incidenza media nei due tratti risulta equivalente, con un'incidenza di opere pari a circa 1,3 km di opere ogni chilometro d'alveo di fiume, confermando la sostanziale equivalenza, in termini di opere di sistemazione, fra il tronco a monte di foce Mincio e quello a valle dello stesso.

Totale opere di sistemazione a corrente libera nel tratto mediano e nel tratto inferiore del Po	Opere esistenti		Opere in progetto					
	Opere longitudinali (km)	Pennelli trasversali (km)	Opere longitudinali (km)	Pennelli trasversali (km)	Opere in demolizione (km)	Lunghezza tratto (km)	Totale opere (km)	Incidenza chilometrica (km/km)
Tratto Cremona - foce Mincio	155,32	1,23	6,13	3,68	0,62	125	165,74	1,33
Tratto foce Mincio - Po di Goro	80,4	0,82	23,04	33,58	4,21	100	133,63	1,34
TOTALE Cremona - Po di Goro	235,72	2,05	29,17	37,26	4,83	225	299,37	1,33

Di seguito si riportano alcune immagini con la rappresentazione della proposta di configurazione delle opere per la corrente libera in due sezioni significative.

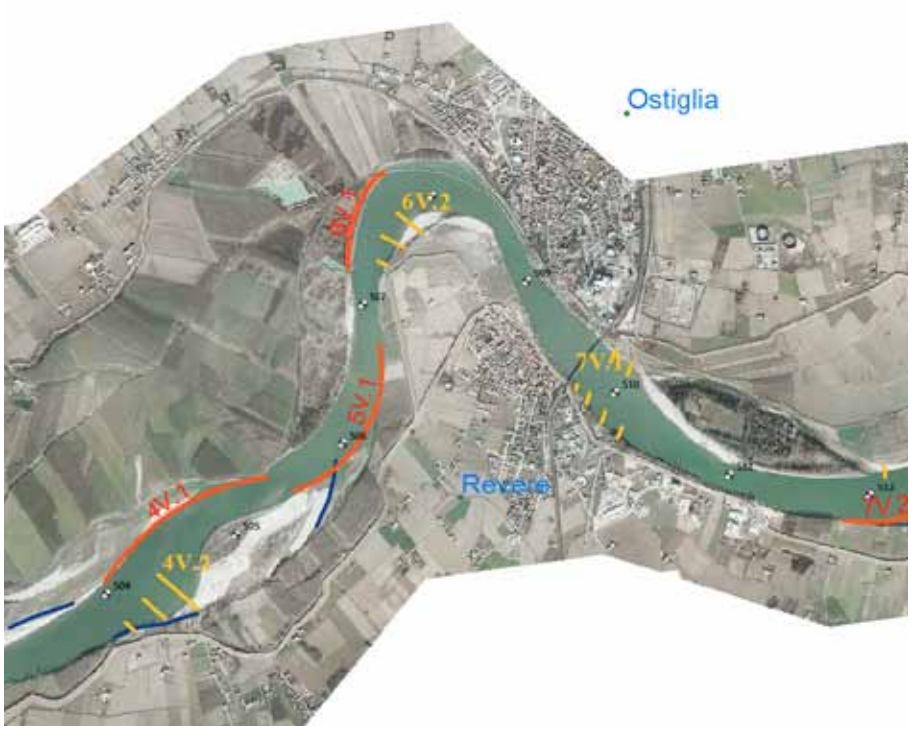


Figura 144 - esempio di sistemazione in corrispondenza della curva di Revere-Ostiglia, in rosso le nuove opere longitudinali, in arancione i pennelli trasversali, in blu le opere esistenti da demolire



Figura 145 - esempio di sistemazione in corrispondenza della curva di Ficarolo

Il ricorso ad un maggior utilizzo di pennelli trasversali rispetto a quanto fatto sul tratto a monte di foce Mincio, dove la sistemazione a corrente libera è stata ottenuta principalmente mediante la realizzazione di opere longitudinali con cui sono state disegnate le curve e controcurve secondo le regole geometriche precedentemente descritte, permette un controllo e una maggiore flessibilità nella realizzazione delle opere che possono essere modificate, integrate o riviste anche in corso d'opera in base agli effetti e ai risultati ottenuti durante la realizzazione delle stesse.

Questo rende la sistemazione a corrente libera una tipologia di intervento molto flessibile e adattabile in funzione delle necessità che dovessero manifestarsi nel corso dei lavori di realizzazione degli interventi di progetto previsti.

I pennelli trasversali hanno altresì lo scopo di contenere la larghezza dell'alveo in corrispondenza dei tratti in cui non è possibile disegnare opere longitudinali con i corretti raggi di curvatura per mancanza degli spazi necessari, come nel tronco di valle del Po dove l'alveo si stringe significativamente e la distanza fra le arginature maestre si riduce a poche centinaia di metri, a differenza di quanto accade nel tratto di monte dove le golene hanno ampiezze anche di qualche chilometro. In questi tratti l'unica soluzione possibile diventa quella di contenere le portate di magra all'interno di un alveo attivo sufficientemente stretto da garantire i tiranti necessari alla navigazione. Naturalmente l'altezza delle opere deve risultare tale da renderle sormontabili non appena la portata del fiume sale al di sopra dei valori che innescano i fenomeni di trasporto solido al fondo in modo che risultino trasparenti ai fini degli effetti morfodinamici.

Da questo punto di vista la sistemazione a corrente libera, associata alla realizzazione di soglie di fondo che blocchino l'approfondimento dell'alveo di magra nei tratti in cui questo è ancora in corso, può essere ritenuto un intervento dal costo modesto, realizzabile anche per piccoli step, che rispetta le caratteristiche morfologiche del fiume garantendo allo stesso tempo la navigabilità dell'asta e la sicurezza delle opere di difesa idraulica senza che gli interventi proposti possano avere impatti sui livelli idraulici in caso di piena.

Le modalità costruttive delle opere necessarie alla realizzazione dei pennelli e delle difese spondali potranno rifarsi alle tipologie già individuate e proposte nell'ambito dei progetti predisposti da AIPo per la sistemazione di vari tratti dell'alveo nell'ambito dei progetti per la sistemazione a corrente libera dell'asta di Po. Nella figura successiva si riporta la sezione caratteristica di un pennello di altezza media pari a 5 m come esempio della composizione e dei materiali utilizzati per la loro realizzazione. Si può osservare da questo punto di vista come una parte dei materiali utilizzati nella realizzazione delle opere di sistemazione delle curve potranno essere recuperati direttamente dalle golene limitrofe in ambito demaniale con un risparmio importante nella fornitura dei materiali necessari alla realizzazione degli interventi previsti.

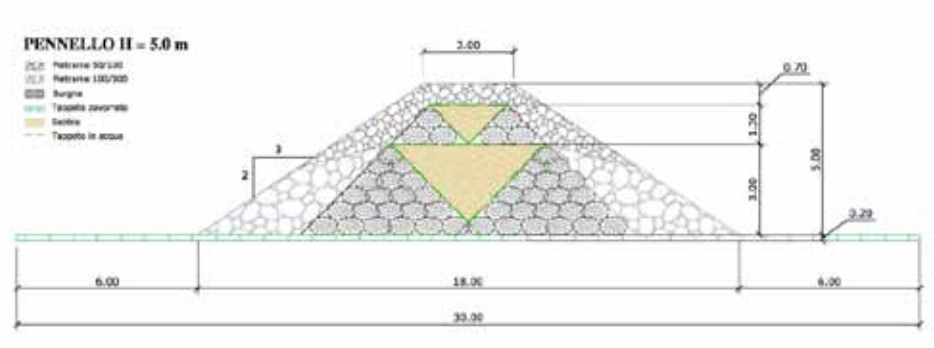


Figura 146 - esempio di sezione trasversale di un pennello di difesa

L'assetto delle opere così individuato è stato successivamente simulato mediante modello numerico bidimensionale a fondo mobile secondo due scenari temporali differenti pari a 2 e 10 anni, per determinare la batimetria finale al termine del periodo di simulazione come meglio descritto nel seguito del presente report.

Il confronto fra l'assetto inziale dell'alveo e quello al termine delle simulazioni ha permesso di valutare le modifiche indotte dalle opere alla morfologia del fiume, permettendo di individuare i tratti in deposito e/o in erosione, al fine di valutare le condizioni di sicurezza dei rilevati arginali, nonché i tiranti d'acqua che è possibile ottenere mediante la sistemazione a corrente libera secondo lo schema ipotizzato.

La simulazione a due anni è stata anche utilizzata per una prima valutazione delle opere individuate e per correggere quelle situazioni per le quali o non si ottenevano i fondali richiesti o si evidenziavano problematiche legate ad eccessivi approfondimenti dell'alveo dovuti alla presenza soprattutto delle opere longitudinali all'esterno delle curve.

Naturalmente tale metodologia, che prevede un progressivo affinamento della conformazione delle opere e la successiva valutazione delle stesse mediante modellazione numerica, potrà essere riproposta per una ulteriore messa a punto dell'assetto di progetto qualora se ne ravvisi la necessità.

I primi risultati ottenuti dalle modellazioni a due anni evidenziano come la conformazione delle opere ipotizzata per la sistemazione a corrente libera sia in grado di assicurare la formazione di un canale navigabile di sufficiente ampiezza e profondità per garantire le condizioni per la navigazione delle imbarcazioni commerciali di Va classe.

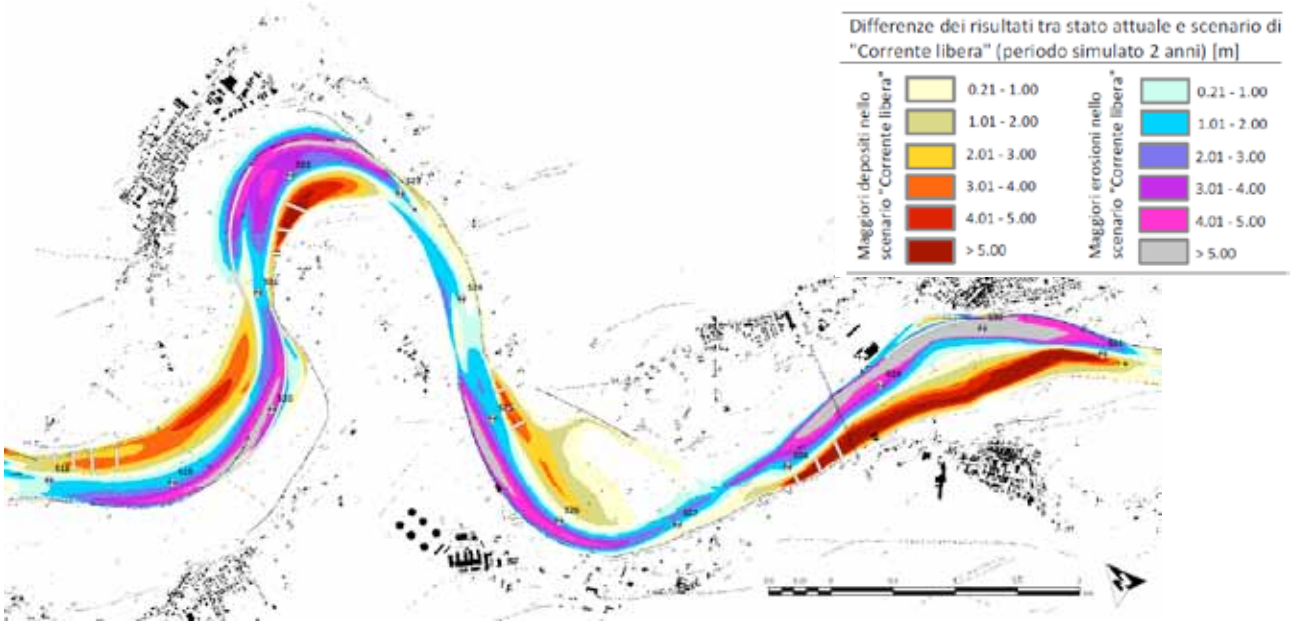


Figura 147 - risultato della modellazione a due anni dello scenario a corrente libera: differenze fra stato attuale e stato finale nella zona fra Bergantino e Castelmassa

L'assetto di sistemazione a corrente libera proposto cerca di definire una nuova filosofia progettuale che, facendo tesoro delle precedenti esperienze con pennelli radenti e repellenti trasversali, erosioni e depositi, magre prolungate e difesa dalle piene, ricorra ad opere molto basse, normalmente sommerse da portate anche di poco superiori alle minime di progetto, in grado di concentrare le magre più spinte al fine di ottenere il canale navigabile con il rettangolo di navigazione richiesto, lungo un tracciato ottimale per i natanti previsti, in grado di fissare l'alveo inciso anche ai fini della sicurezza. Tali opere potrebbero anche definire delle soglie in grado di fermare o rallentare l'erosione dell'alveo inciso, lasciando però libero il fiume di riattivare con buona frequenza le forme libere di alveo naturale, le lanche laterali, i tratti pluricursali e le isole. Questo potrebbe controllare la formazione delle fosse più profonde, evitando di mettere a rischio la stabilità delle opere maggiori di difesa. Le tecniche di intervento con materiali naturali e forme sapienti di evoluzione potrebbero favorire la navigazione, recuperando una maggiore naturalità ed equilibrio nella gestione della regione fluviale. A questo dovrebbero accompagnarsi, per completezza di intervento, il completamento degli argini maestri e delle opere di difesa dalle massime piene, che presentano oggi lunghi tratti con criticità non accettabili. Le notevoli difficoltà presenti per proseguire con l'unico criterio di rialzare gli argini maestri, ormai fortemente pensili sulle campagne laterali, con le conseguenze sulle interferenze

con i ponti, con gli impianti di sollevamento, con le chiaviche di chiusura, con il rischio crescente per i fontanazzi, anche sui tratti rigurgitati degli affluenti, impone che si studino scenari integrati di intervento, in particolare poi nel tronco di valle, dove la distanza trasversale tra gli argini maggiori si riduce e la portata di piena diventa massima, dopo la chiusura del bacino idraulico. Un intervento parallelo sulle golene medio-alte, che oggi vengono lambite solo dalle piene maggiori, innalzandosi ogni volta di decine di centimetri, per la conseguente bassa velocità della corrente, potrebbe favorire l'aumento delle sezioni di deflusso critiche, il riequilibrio del rapporto tra falde e piano di campagna lungo le golene, oggi fortemente deteriorato con diversi metri di abbassamento, la riapertura stabile delle lanche maggiori, nonché mettere a disposizione i materiali per la realizzazione delle opere e per l'industria delle costruzioni, in condizioni di perfetto controllo, consentendo di ricavare risorse preziose per finanziare il programma di riequilibrio del fiume, di sviluppo della navigazione commerciale e della sua messa in sicurezza.

Tale ipotesi di lavoro va comunque approfondita, studiata e sperimentata, perché in ogni caso è l'unica possibile per il tronco di valle del fiume, dopo l'ultimo degli sbarramenti ipotizzati, nonché probabilmente necessaria anche per i tratti di monte, sia per la parte superiore dei tratti rigurgitati, a valle degli sbarramenti, sia per la difesa dei tratti di opere in froldo, ai fini della sicurezza.

Non c'è dubbio quindi che una visione integrata e complementare delle opere e dei sistemi di intervento, sia lungo l'asta fluviale, sia nel tempo per i programmi attuativi da definire secondo fasi e priorità di intervento, possa costituire la giusta direzione da approfondire negli studi e nei progetti da sviluppare.

6.8 APPROFONDIMENTI PROGETTUALI RELATIVI ALLE OPERE DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA

A seguito della definizione dell'assetto di progetto delle opere per la sistemazione a corrente libera nel tratto di fiume compreso fra foce Mincio e Po di Goro, si è proceduto ad un approfondimento tecnico di massima per la definizione delle principali caratteristiche tipologiche e geometriche delle opere necessarie alla realizzazione della configurazione di progetto per la navigazione del fiume a corrente libera.

Per la sistemazione dell'alveo, secondo le modalità descritte in precedenza, si è fatto ricorso a tre differenti tipologie di opere come di seguito specificato:

- difese spondali;
- pennelli longitudinali;
- pennelli trasversali.

La prima tipologia si riferisce ad opere longitudinali che disegnano planimetricamente la curva appoggiandosi alla sponda esistente e che risultano protette unicamente sul lato verso il fiume mentre lato campagna o seguono la sponda esistente o sono colmate a tergo con materiali provenienti dagli scavi necessari alla loro realizzazione, quando si distaccano significativamente dalla linea di sponda. La quota di sommità di questo tipo di opere, per ragioni morfologiche, coincide in genere con quella della sponda a cui si appoggiano svincolandosi dalla quota idrometrica della portata di sormonto a cui invece si adeguano le altre due tipologie.

Il secondo tipo di opere è ancora di tipo longitudinale e si differenzia dalle precedenti essendo realizzate come un pennello vero e proprio di sezione trapezoidale, e quindi protetto su entrambi i lati, che viene utilizzato nel caso in cui l'opera si stacchi sensibilmente dalla linea di sponda rendendo troppo oneroso il riempimento a tergo dell'opera stessa. A differenza della precedente la quota di sommità di questo tipo di opere, proiettandosi direttamente all'interno dell'alveo attivo del fiume, rispetta i criteri adottati di sormonto per portate superiori agli 800 m3/s circa.

Il terzo tipo di opere, pennelli trasversali, è costituito da elementi simili a quelli longitudinali ma che si differenziano dai precedenti per essere posti in senso pseudo ortogonale al verso della corrente. In genere questo tipo di opere sono realizzate in schiere di due o più elementi e sono utilizzate per concentrare verso il centro dell'alveo il filone principale della corrente.

Le prime due tipologie di opere, ossia difese spondali e pennelli longitudinali, a volte si combinano insieme in un'unica opera in senso planimetrico costituita in una successione delle due tipologie, nel caso in cui lungo il tratto in cui vengono utilizzate siano presenti entrambe le condizioni richiamate in precedenza.

Come già descritto precedentemente, dal punto di vista della sezione trasversale e della tipologia costruttiva delle opere, si è ipotizzato, in questa fase, di fare riferimento a quanto già previsto da AIPo nell'ambito dei programmi e nei progetti di adeguamento del Po per la sistemazione a corrente libera dell'asta fluviale volti a migliorare le condizioni di navigabilità del fiume.

La tipologia costruttiva di tali opere prevede la realizzazione di un nucleo centrale zonato realizzato con gabbioni metallici opportunamente riempiti con massi di pezzatura adeguata e alleggerito con nuclei in sabbia confinata con geotessuti. Il nucleo centrale del pennello così costituito, risulta a sua volta rivestito esternamente da un paramento in massi ciclopici di diversa pezzatura variabile in funzione della profondità di posa dei massi e dell'altezza dell'opera. L'opera infine si appoggia alla base su un tappeto zavorrato anch'esso costituito da materassi metallici di spessore ridotto, riempiti con pietre di opportuna pezzatura. Tale base presenta in pianta una dimensione significativamente superiore alla larghezza del pennello per contenere eventuali fenomeni erosivi al contorno dell'opera stessa.

L'assetto di progetto di sistemazione dell'alveo a corrente libera è stato verificato, come meglio descritto nel seguito, mediante modellazione bidimensionale a fondo mobile, al fine di verificare le modificazioni morfometriche indotte dalle opere sulle sezioni d'alveo e valutare il raggiungimento degli obiettivi minimi ipotizzati relativi ai tiranti idrici utili alla navigazione.

I tiranti utili, a loro volta, sono stati verificati, come meglio descritto di seguito, mediante un modello bidimensionale a fondo fisso relativo all'alveo inciso del fiume Po compreso tra Cremona e l'incile del Po di Goro nei tre scenari individuati nello studio: assetto attuale, regimazione, sistemazione a corrente libera. Ciascun modello è stato costruito utilizzando la rispettiva batimetria di calcolo finale ottenuta dalla simulazione di periodo 10 anni con il modello bidimensionale a fondo mobile descritto nel successivo capitolo 9.

La verifica ha riguardato due portate di riferimento, ossia una portata caratterizzata da una durata media annua di 340 giorni/anno, variabile lungo l'asta del Po e una portata di magra, costante per l'intero tratto, pari a 350 m^3/s.

Per entrambe le simulazioni sono stati individuati i tratti per i quali il tirante idraulico risulta inferiore o superiore al tirante di riferimento assunto pari a 2,2 m (fondale di 2,00 m, necessario al transito delle imbarcazioni di classe Va + 0,20 m di franco).

La scelta della tipologia e la configurazione planimetrica delle opere per la sistemazione a corrente libera, è stata guidata dalla necessità di contenere il più possibile l'impatto delle opere sull'ambito fluviale, limitandone l'altezza e per quanto possibile lo sviluppo lineare, ma sempre con la necessità di garantire, anche in condizioni di magra, un canale di larghezza e profondità sufficiente al passaggio delle imbarcazioni commerciali di Va classe.

La configurazione delle opere, come detto, è stata dapprima verificata con una modellazione a 2 anni per valutare preliminarmente l'evoluzione morfologica indotta dalle opere e successivamente, dopo alcune correzioni adottate a seguito delle verifiche preliminari, rivista nella stesura definitiva con una simulazione a 10 anni.

L'adozione di un processo iterativo come quello descritto che preveda l'affinamento progressivo della configurazione ottimale attraverso successive verifiche su modello a fondo mobile, potrà permettere di risolvere anche quelle situazioni locali che ancora permangono e che in questa fase non è stato possibile ottimizzare per non appesantire eccessivamente lo studio in oggetto.

Ulteriori approfondimenti, sia con modellazioni matematiche che fisiche, potranno anche riguardare la possibilità di proteggere il fondo dell'alveo mediante realizzazione di tratti protetti con massi e/o elementi naturali, in tutte quelle situazioni in cui si evidenziano fenomeni erosivi eccessivi, come già sperimentato in ambiti analoghi su grandi fiumi Europei (si veda la sistemazione a corrente libera di alcuni tratti del Danubio).

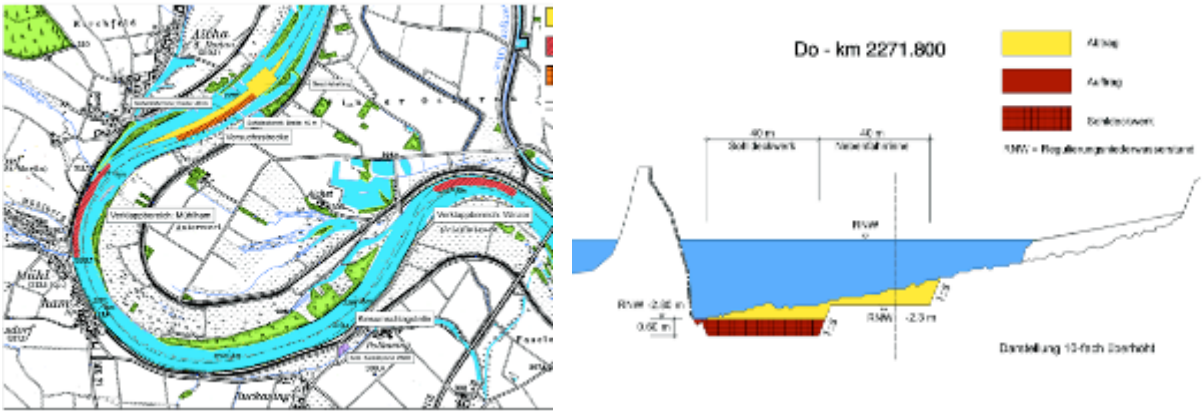


Figura 148 – sistemazione della curva presso Mühl sul Danubio, in rosso tratti di fondo stabilizzati mediante tappeti in elementi rocciosi

I risultati conseguiti, come verrà illustrato nei capitoli successivi, dimostrano la bontà delle scelte effettuate, in quanto la configurazione adottata si dimostra in grado di garantire, nel tratto compreso fra foce Mincio e Po di Goro, dove sono previste le nuove opere per la sistemazione dell'alveo a corrente libera, i tiranti sufficienti al transito delle imbarcazioni di riferimento su quasi tutto lo sviluppo considerato.

Restano alcune criticità locali che potranno essere migliorate e approfondite nelle successive fasi di progettazione e che comunque anche nel caso in cui non sia possibile risolvere mediante interventi di tipo strutturale, potranno essere limitate attraverso interventi di tipo locale, ad esempio mediante dragaggi, in grado di permettere l'officiosità della via navigabile anche in occasione delle magre più spinte.

Il ricorso ad un maggior utilizzo di opere trasversali rispetto a quanto fatto nel tratto di monte, dove si è fatto uso principalmente di difese spondali per il disegno del canale di navigazione, permette una maggiore flessibilità ed una maggiore adattabilità delle opere alle varie situazioni locali soprattutto in virtù del fatto che il tratto di valle, in particolare da foce Oglio in avanti, è morfologicamente molto differente dal tratto di monte già sistemato, visto che l'ambito fluviale, da argine ad argine, risulta decisamente più stretto.

Come già descritto in precedenza, tale situazione comporta come conseguenza il fatto che non è possibile descrivere curve che rispettino i criteri geometrici adottati nel tronco di monte, costringendo quindi a ricercare la configurazione ottimale attraverso considerazioni fisico-morfologiche che permettano di tracciare una successione di curve e controcurve in grado di attivare i giusti processi morfodinamici che portano alla formazione di un canale navigabile sufficientemente largo e profondo per il transito delle imbarcazioni prese a riferimento nello studio.

Quando la situazione morfologica è tale da permettere di appoggiare l'opera necessaria a definire la curva ad una sponda rialzata, si è fatto ricorso ad opere di tipo longitudinale costituite da difese spondali protette solo verso il fiume. Queste possono essere eventualmente prolungate con pennelli a doppia protezione quando le necessità geometriche richiedono di allungare l'opera all'interno dell'alveo attivo, in particolare in tutte quelle situazioni in cui risulta necessario indirizzare la corrente sulla sponda opposta.

Tale configurazione viene utilizzata soprattutto nelle condizioni di esterno curva dove occorre definire planimetricamente l'andamento della curva e dove è anche importante avere opere ben identificabili da parte dei natanti che percorrono il fiume.

Quando invece la necessità di contenere la larghezza del canale navigabile si determina in situazioni di sponde caratterizzate da presenza di barre, piccole lanche o sponde meno definite, si è ricorso a pennelli trasversali per indirizzare la corrente e contenere la larghezza del canale navigabile.

Tali elementi si prestano infatti ad una maggiore flessibilità e ad una maggiore possibilità di adattamento alle condizioni morfologiche in cui vanno ad inserirsi, prestandosi inoltre a possibili

sperimentazioni sul campo con la possibilità di modificare la conformazione delle opere in caso di necessità.

Al fine di approfondire e dettagliare le principali caratteristiche geometriche delle opere di sistemazione a corrente libera, si è proceduto a suddividere le opere in gruppi omogenei per tipologia e posizione planimetrica numerando le opere o i gruppi di opere in funzione della numerazione delle curve di valle.

Al fine di adottare un criterio semplice di identificazione delle opere, si è adottata una numerazione progressiva delle curve, identificate nell'ambito della sistemazione a corrente libera a valle di foce Mincio, a partire dalla curva di Sustinente a valle della quale sono state inserite le nuove opere di sistemazione.

Si sono quindi identificate un totale di 33 curve nel tratto compreso fra foce Mincio e Po di Goro indicandole con il suffisso "V" di valle per distinguerle dalle 51 curve di monte con cui viene suddiviso abitualmente il tratto di Po da Cremona a foce Mincio dove la sistemazione a corrente libera è già stata adottata e dove peraltro la numerazione cresce da valle verso monte.

In questo modo ogni opera longitudinale e i gruppi di pennelli trasversali afferenti ad una particolare curva nel tratto di valle sono stati identificati con un codice numerico del tipo "xV.y" in cui x si riferisce al numero progressivo della curva e y al numero progressivo della difesa longitudinale o dei pennelli trasversali nello sviluppo della curva stessa.

Dopo aver definito l'assetto planimetrico delle opere ed averne verificato gli effetti mediante il modello bidimensionale a fondo mobile, si è provveduto ad approfondire gli aspetti più strettamente geometrici dei singoli elementi precedentemente individuati.

In particolare sono stati individuati i principali parametri geometrici delle singole opere quali lunghezza, altezza media e massima, quote medie di fondo e di sommità, larghezza in sommità, superficie trasversale e volume medio.

Per far questo si è provveduto ad estrarre in corrispondenza di ciascun intervento una sezione trasversale, dai rilievi disponibili, rappresentativa della conformazione altimetrica media dell'alveo mediante la quale è stato possibile valutare sinteticamente i parametri geometrici medi prima ricordati.

Nel caso di pennelli trasversali, alla sezione trasversale dell'alveo, è stata associata anche una sezione longitudinale per definire altimetricamente l'andamento della sponda lungo la quale si inseriscono i singoli pennelli e poter valutare eventuali differenze nelle altezze dei singoli elementi dovute a variazioni altimetriche significative, come in effetti si verifica in vari casi.

I risultati ottenuti sono riassunti nell'allegato 6 del presente studio in cui sono rappresentate una serie di schede nelle quali, per ognuna delle opere o gruppo di opere individuate, vengono rappresentati gli inquadramenti planimetrici su C.T.R. ed ortofoto in scala 1:20.000, la planimetria dell'intervento su C.T.R. in scala 1:5.000, le sezioni con l'indicazione schematica dell'opera in oggetto, la sezione tipologica dell'opera e il dettaglio dei risultati del modello morfologico indotti dall'opera stessa.

A completamento delle schede grafiche, l'allegato 6 contiene una tabella riepilogativa dove sono riassunti i principali parametri tipologici e geometrici per ciascuno degli elementi che costituiscono l'insieme delle opere per la sistemazione del fiume a corrente libera.

6.9 COSTI DELLE OPERE DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA

Nella tabella successiva vengono riepilogati i costi stimati per gli interventi di sistemazione dell'alveo a corrente libera sia per il tratto a monte di foce Mincio che per il tratto di valle. A questi sono inoltre sommati i costi relativi alla barriera antisale da realizzare nel ramo del Po di Pila di cui si parlerà nel successivo cap. 12.

IPOTESI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA SULL'INTERO TRATTO FOCE ADDA PO DI GORO			
(Livello di approfondimento basato sulla stima del progetto definitivo del tratto di monte effettuato da Aipo)			
		Tratto foce Adda foce Mincio	**Tratto foce Mincio - incile Po di Goro**
		€ x 1.000.000	€ x 1.000.000
1	**Lavori di sistemazione a corrente libera**	100	340
2	**Costi addizionali**		
2,1	Imprevisti (5% di 1)	5	17
2,2	Espropri, indennizzi (3% di 1)	3	10
2,3	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 1)	10	34
2,4	IVA (22% di 1)	22	75
	Costo totale (1+2)	**140**	**476**

OPERE DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA	616
BARRIERA ANTISALE	60
TOTALE FINANZIAMENTO SISTEMAZIONE CORRENTE LIBERA	**676**

7 PROGETTO DI REGIMAZIONE DEL FIUME PO TRAMITE TRAVERSE DI SOSTEGNO DEI LIVELLI IDRICI DI MAGRA E CORRISPONDENTI CONDIZIONI DI SICUREZZA IDRAULICA DEL FIUME PO

7.1 IL PROGETTO DI REGIMAZIONE DEL FIUME PO IN BASE ALLO STUDIO DI FATTIBILITÀ DEL 2009

Il progetto di Regimazione del fiume Po, che già nel passato formò oggetto di numerosi studi e proposte tra le quali è da ricordare il ben noto Progetto SIMPO 1984, è stato più recentemente ripreso nello Studio di Fattibilità (qui indicato con la sigla AIPO 2009) "Attività e studi propedeutici relativi alla regimazione del Po nel tratto tra Cremona e foce Mincio – ipotesi, analisi e verifiche preliminari" (giugno 2009) condotto da AIPo e Infrastrutture Lombarde, successivamente integrato con lo Studio Integrativo (novembre 2009) condotto da AIPo.

Il progetto di regimazione nasce dalla constatazione di un avvenuto sconvolgimento ed approfondimento negli ultimi cinquant'anni dell'assetto del fondo del suo alveo, dovuto in gran parte ad una dinamica incontrollata dei suoi sedimenti, a causa di penalizzazioni del trasporto solido e dragaggi, poi opportunamente aboliti nel periodo più recente, che hanno determinato l'asporto e l'erosione del fondo alveo di ingenti quantità di materiali inerti. L'abbassamento dell'alveo del fiume, che in alcuni punti ha superato i cinque metri, ha determinato diverse criticità, tra cui: un'alterazione dell'aspetto paesaggistico delle rive e delle fasce attigue; un abbassamento del livello delle falde idriche; gravi difficoltà e penalizzazioni nella navigazione; l'indebolimento degli argini e scalzamento delle fondazioni dei ponti; l'impoverimento della vegetazione delle rive e delle golene; difficoltà per i prelievi ad uso irriguo e ad uso delle centrali termoelettriche.

In grande sintesi lo studio AIPo 2009 si basa sulla realizzazione di n. 5 nuove traverse di regolazione, a valle di quella già da tempo esistente di Isola Serafini, ubicate nei pressi di (v. Figura 149):

1. Motta Baluffi (CR) e Roccabianca (PR);
2. Viadana (MN) e Brescello (RE);
3. Borgoforte (MN) e Motteggiana (MN);
4. Sustinente (MN) e Quingentole (MN), a valle di foce Mincio;
5. Gaiba (FE) e Ferrara.



Figura 149 - Localizzazione della traversa di Isola Serafini e delle n. 5 traverse proposte (AIPo 2009) lungo il Po nel tratto tra Cremona e Gaiba

Il sostegno dei livelli idrici nei regimi di magra si propone di conseguire molteplici e importanti obiettivi:

- garantire la possibilità di navigazione lungo tutto il Po da Cremona al Delta con navigli di classe Va per una durata media annua di 365 giorni;
- il recupero morfologico e naturalistico delle dinamiche fluviali in aderenza ai principi della Direttiva 2000/60/CE e del Piano di Gestione del Distretto del Po elaborato dall'Autorità di Bacino del Po;

- la riqualificazione paesistica ed ambientale
- la produzione di energia idroelettrica nei regimi di magra attraverso l'utilizzazione del salto generato da ogni traversa;
- il miglioramento delle possibilità di derivazione a fini irrigui;
- la stabilizzazione delle falde idriche;
- una maggiore disponibilità di risorsa idrica da gestire durante i periodi siccitosi e possibilità di contrastare nelle magre eccezionali la risalita del cuneo salino nella zona del delta.

Tutti tali aspetti sono dettagliatamente analizzati e definiti nei suddetti studi di giugno e di novembre 2009. In particolare questi studi hanno previsto la realizzazione di traverse, puramente ad acqua fluente, ciascuna delle quali composta da uno sbarramento con luci equipaggiate con paratoie mobili, da una conca di navigazione idonea per navigli di classe Va, da una centrale di produzione idroelettrica e da un'opera specifica per il passaggio dell'ittiofauna.

Nelle figure seguenti sono rappresentate le principali caratteristiche (dati dimensionali, ubicazione e profili del pelo libero in magra) delle 5 traverse definite nello studio *AIPO 2009*.

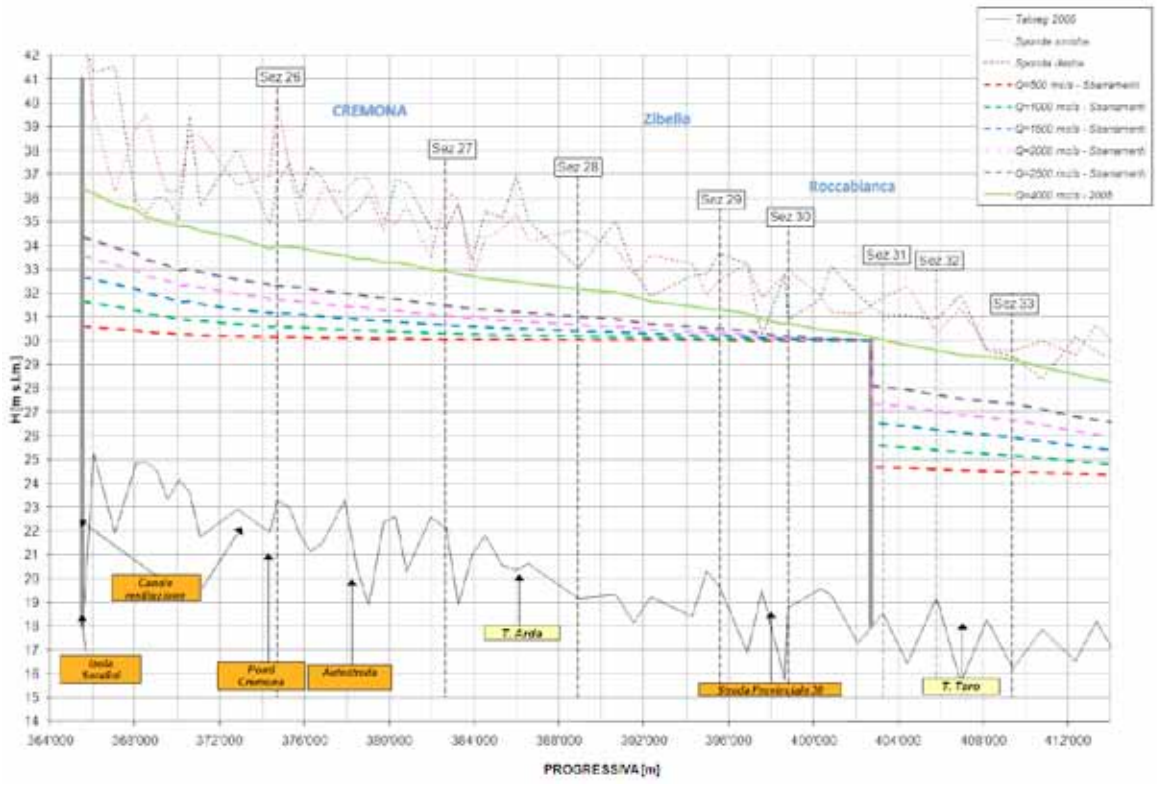
Traversa n. 1 a Motta Baluffi – Roccabianca

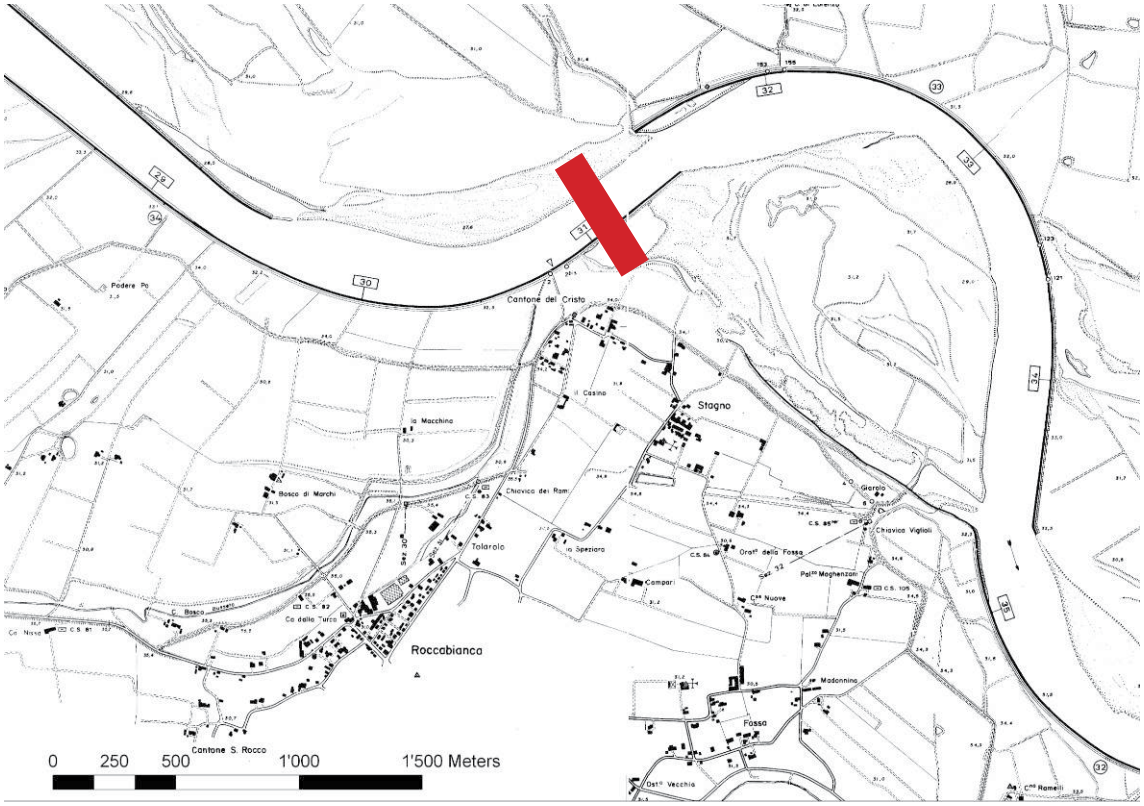
Livello di ritenuta (m s.m.)	30,0
Livello max Q200 (m s.m.)	34,8
Livello magra (Q=400 m3/s) (m s.m.)	22,7
Quota soglia traversa (m s.m.)	21,0/19,0
N. luci	9
Lunghezza traversa (m)	225
Quota coronamento traversa (m s.m.)	40,5
Quota fondo turbine (m)	9,4

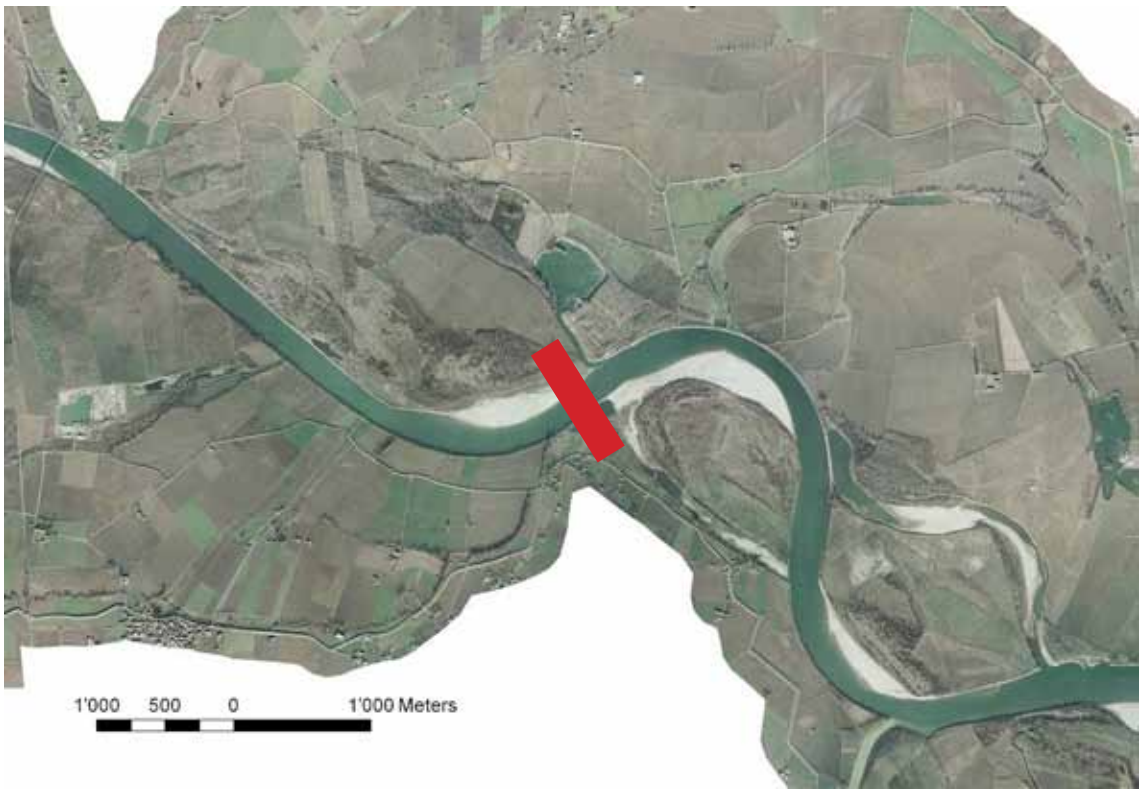
Portata (m^3/s)	Salto (m)
0	5,8
500	5,3
1000	4,4
1500	3,4
2000	2,6
2500	1,9

Potenza massima (per Q = 1750 m3/s e H = 3,06 m) = 46.500 kW

Energia annua producibile = 260.000 MWh




Cantone del Cristo
Stagno
Roccabianca
Fossa
Cantone S. Rocco
0 250 500 1'000 1'500 Meters


1'000 500 0 1'000 Meters

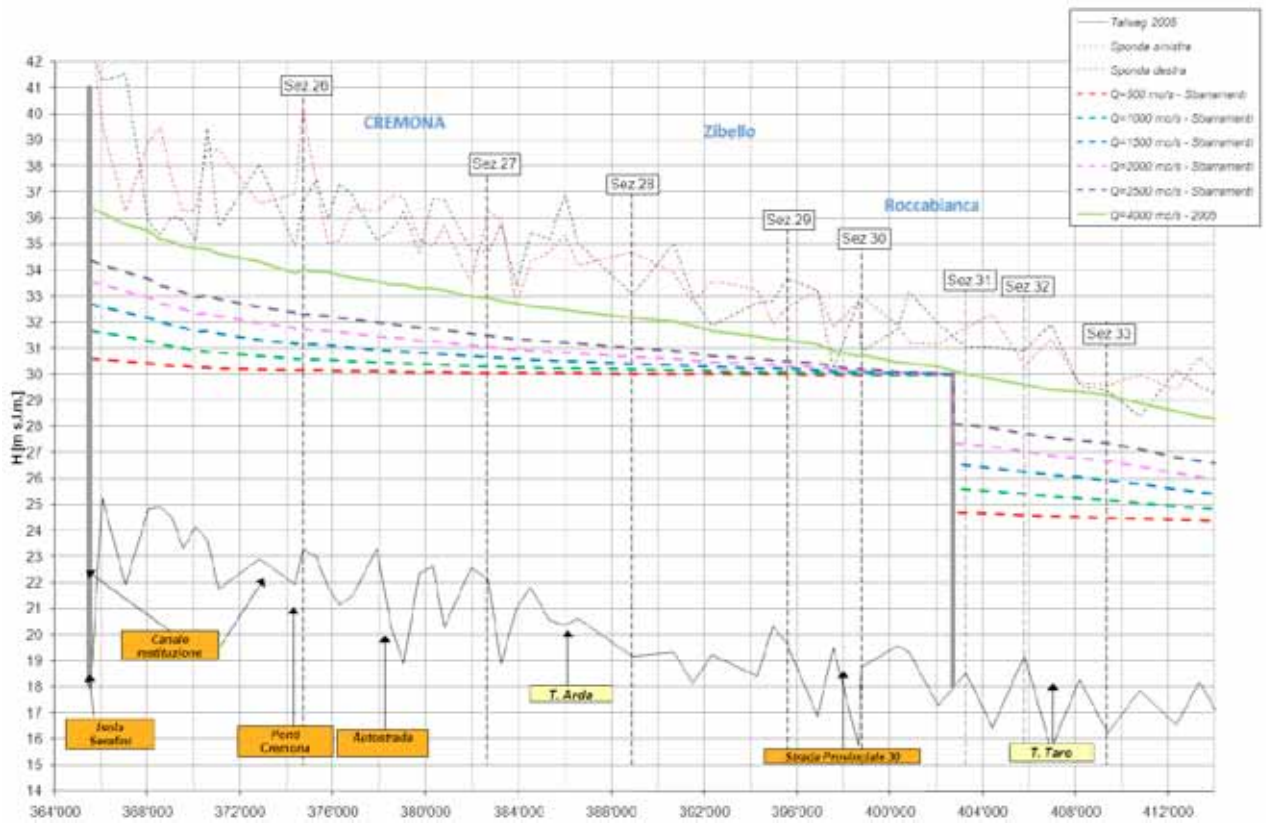
Traversa n. 2 a Viadana – Brescello a monte di foce Enza

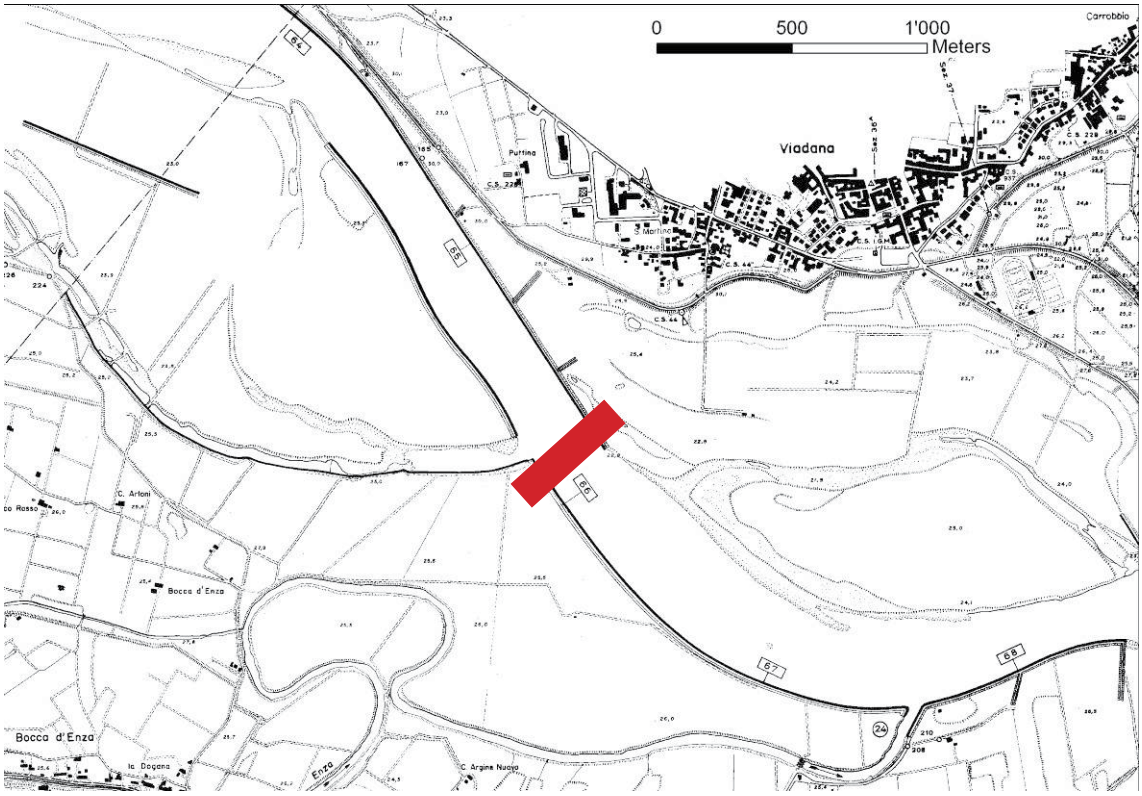
Livello di ritenuta (m s.m.)	24,2
Livello max Q200 (m s.m.)	30,0
Livello magra (Q=400 m3/s) (m s.m.)	16,83
Quota soglia traversa (m s.m.)	15,0/9,0
N. luci	10
Lunghezza traversa (m)	250
Quota coronamento traversa (m s.m.)	34,8
Quota fondo turbine (m)	3,7

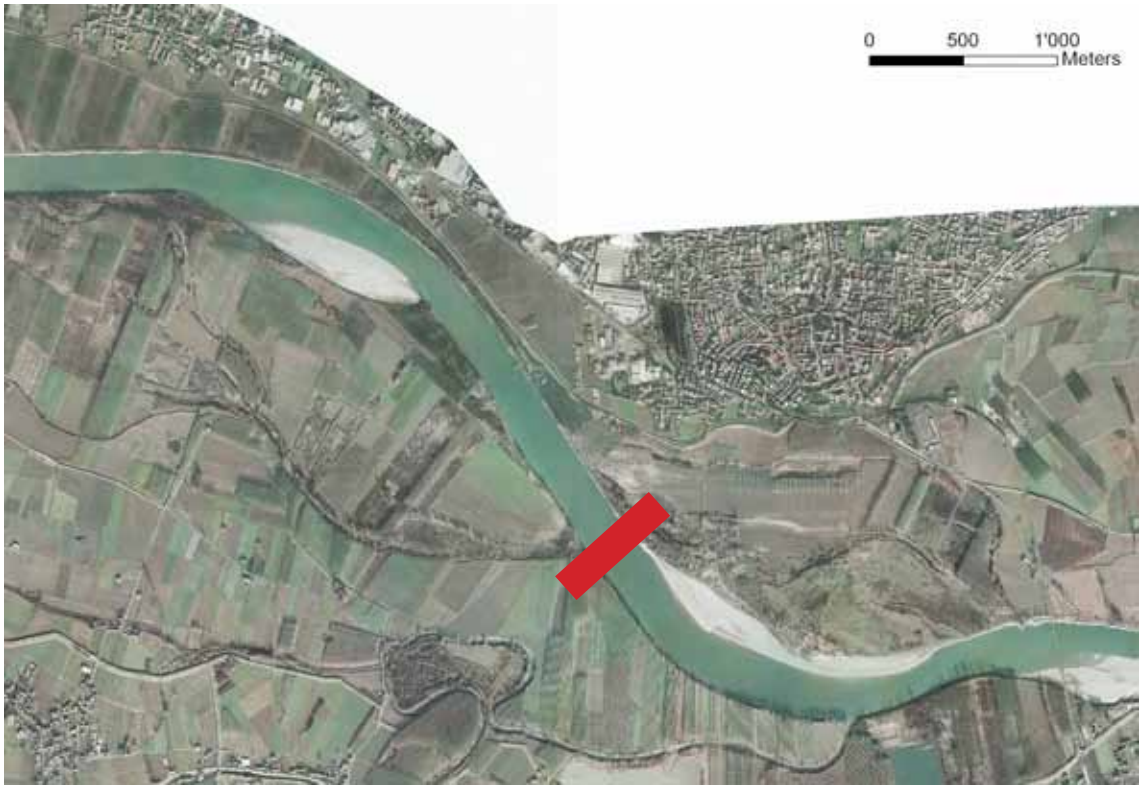
Portata (m^3/s)	Salto (m)
0	5,2
500	4,8
1000	4,1
1500	3,2
2000	2,5
2500	1,8

Potenza massima (per Q = 1700 m3/s e H = 2,92 m) = 43.100 kW

Energia annua producibile = 240.000 MWh




0
500
1'000
Meters
Viadana
Bocca d'Enza
Enza


0
500
1'000
Meters

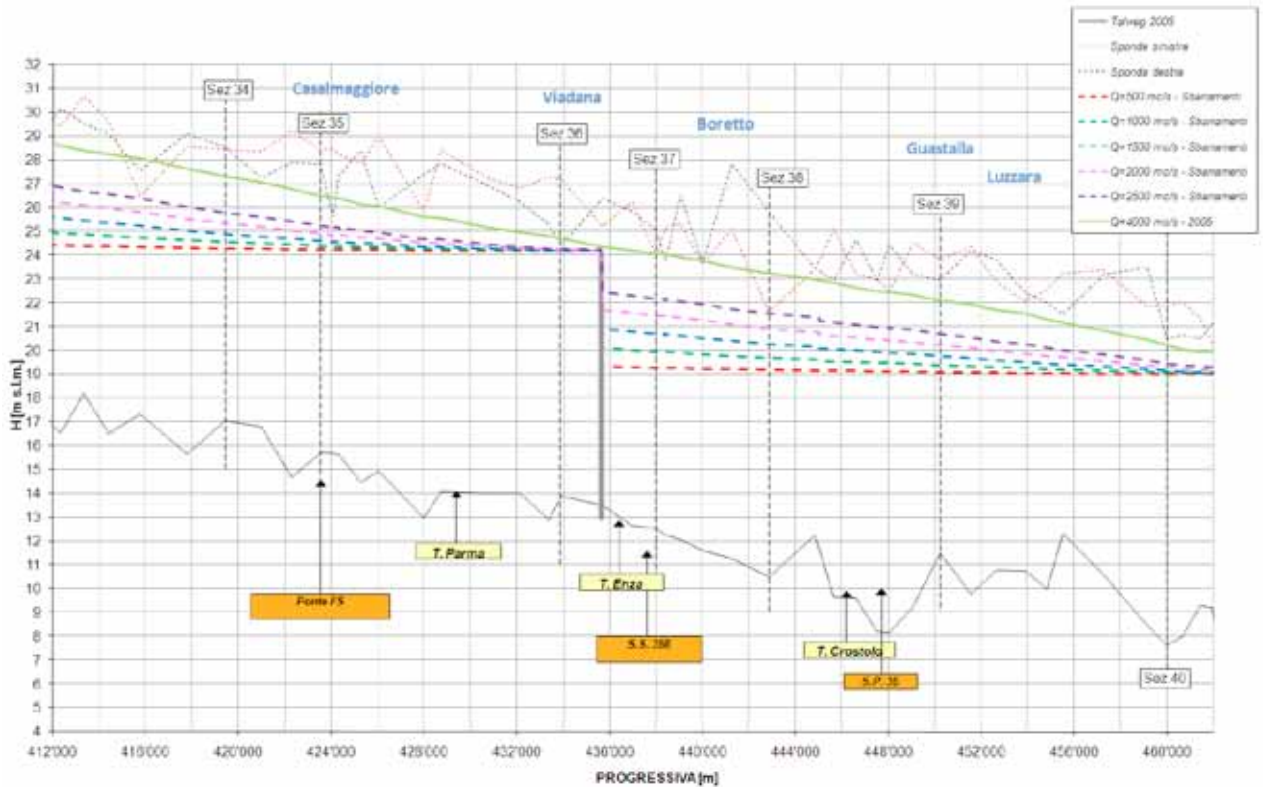
Traversa n. 3 a Borgoforte - Motteggiana

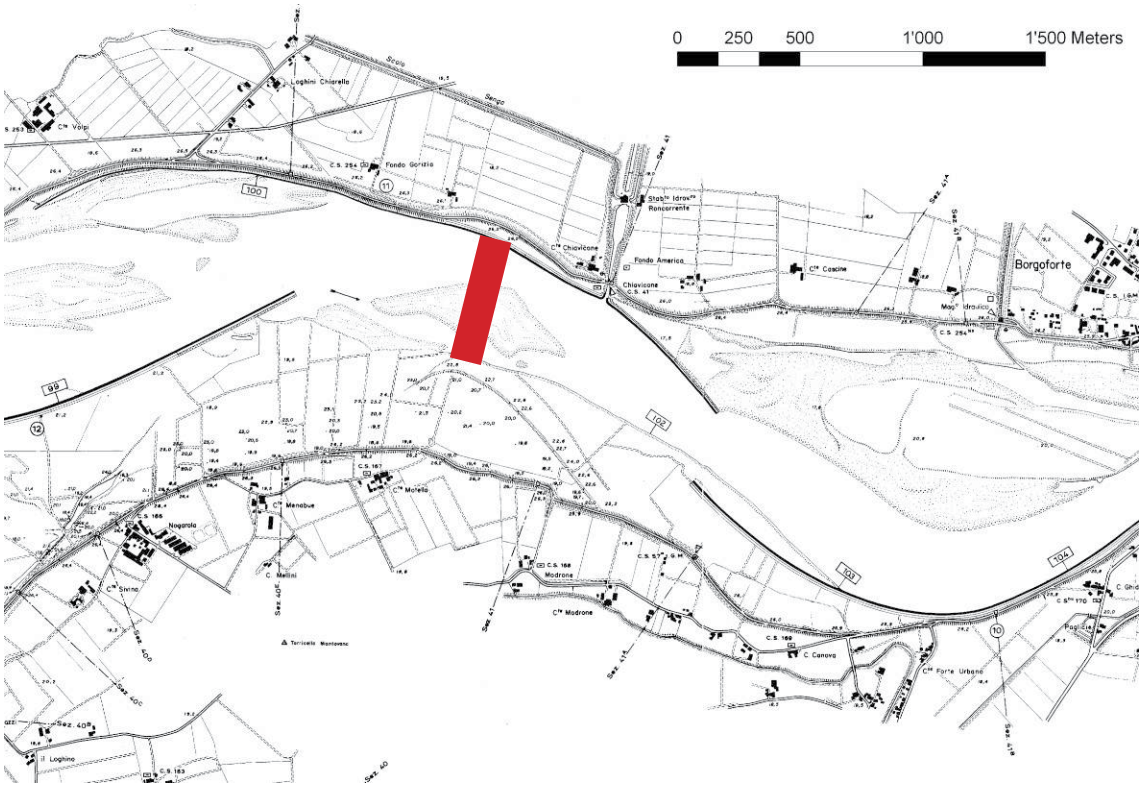
Livello di ritenuta (m s.m.)	19,0
Livello max Q200 (m s.m.)	26,85
Livello magra (Q=400 m3/s) (m s.m.)	11,9
Quota soglia traversa (m s.m.)	10,5/9,0
N. luci	10
Lunghezza traversa (m)	250
Quota coronamento traversa (m s.m.)	31,35
Quota fondo turbine (m)	0,25

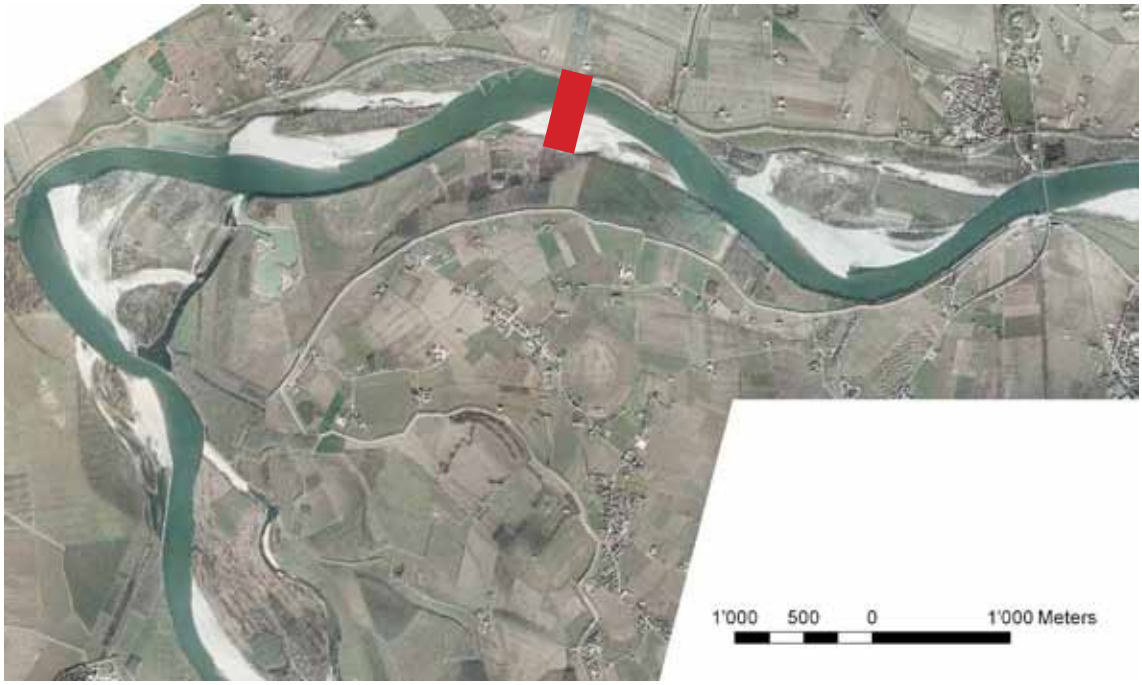
Portata (m^3/s)	Salto (m)
0	4,8
500	4,5
1000	3,9
1500	3,2
2000	2,6
2500	1,9

Potenza massima (per Q = 1700 m3/s e H = 2,92 m) = 43.100 kW

Energia annua producibile = 240.000 MWh




0 250 500 1'000 1'500 Meters
Borgoforte


1'000 500 0 1'000 Meters

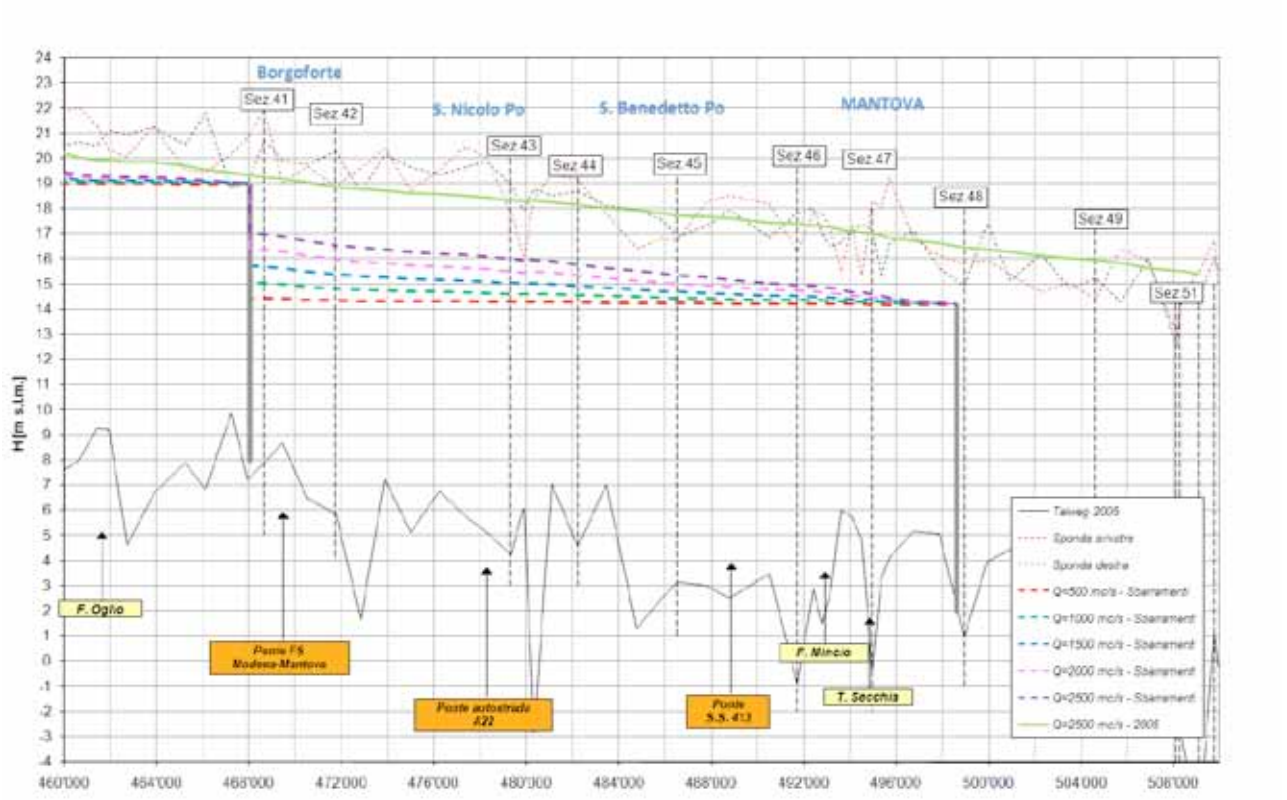
Traversa n. 4 a Sustinente – Quingentole

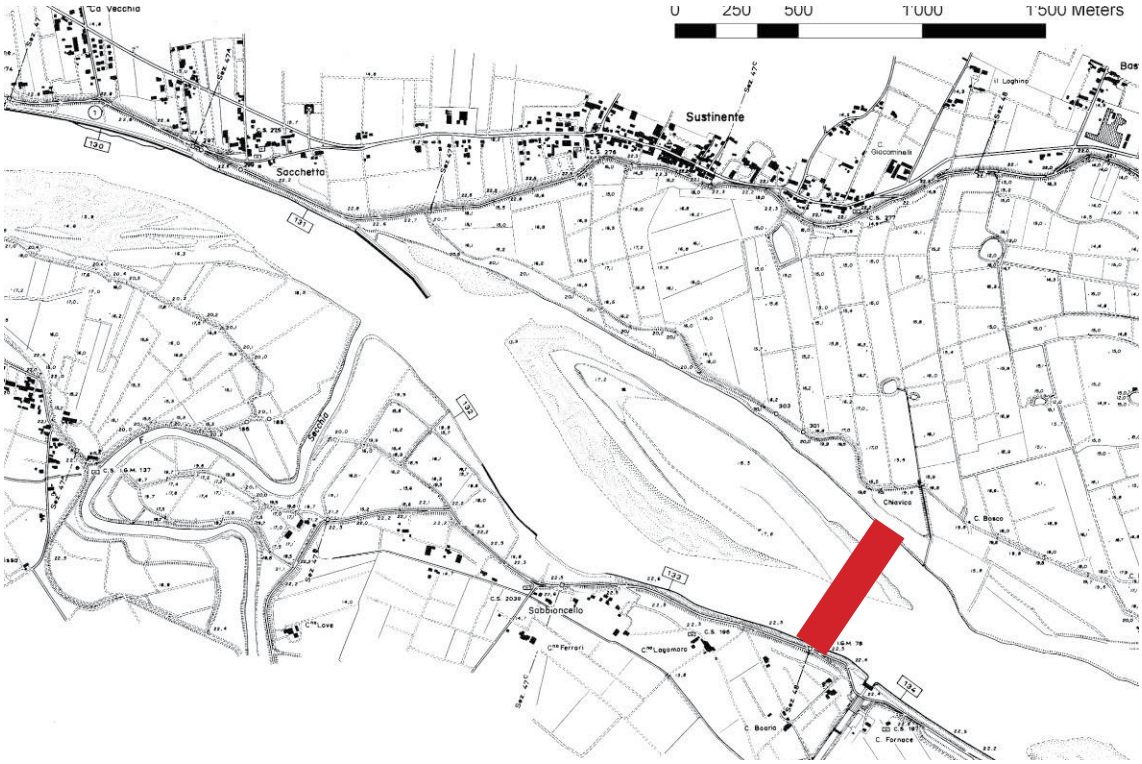
Livello di ritenuta (m s.m.)	14,2
Livello max Q200 (m s.m.)	22,56
Livello magra (Q=400 m3/s) (m s.m.)	8,70
Quota soglia traversa (m s.m.)	7,0/3,0
N. luci	11
Lunghezza traversa (m)	275
Quota coronamento traversa (m s.m.)	27,10
Quota fondo turbine (m)	- 4,0

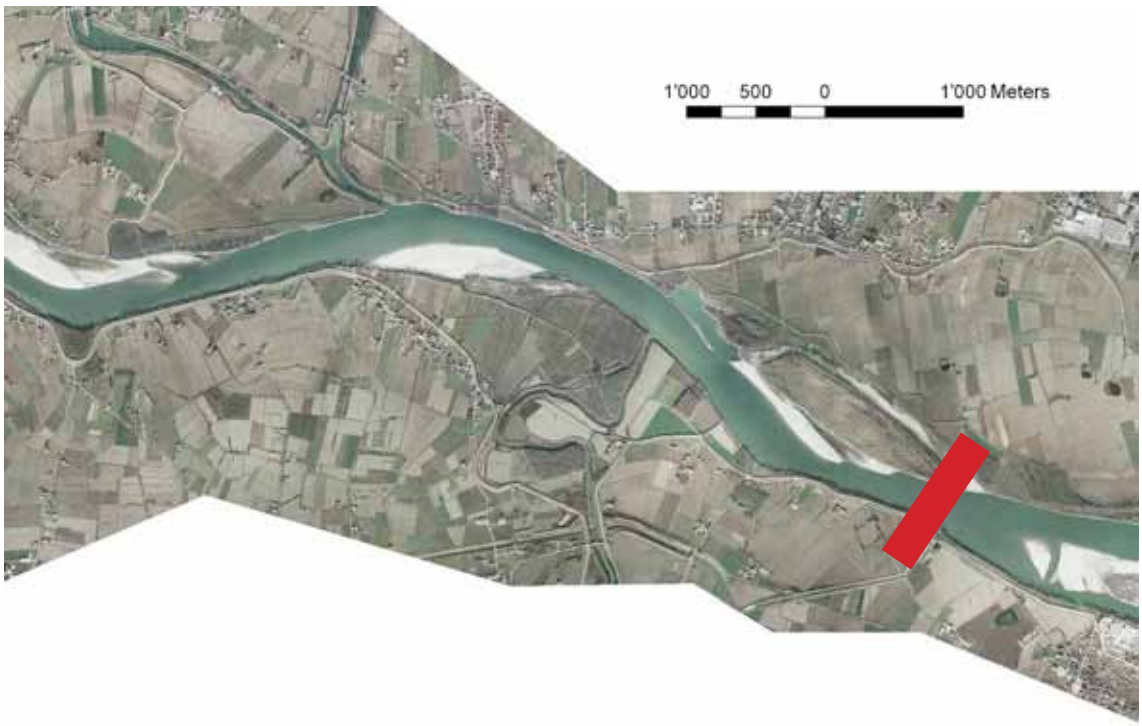
Portata (m^3/s)	Salto (m)
0	
500	4,8
1000	3,3
1500	2,0
2000	0,9
2500	0,0

Potenza massima (per Q = 1700 m3/s e H = 2,92 m) = 43.100 kW

Energia annua producibile = 240.000 MWh



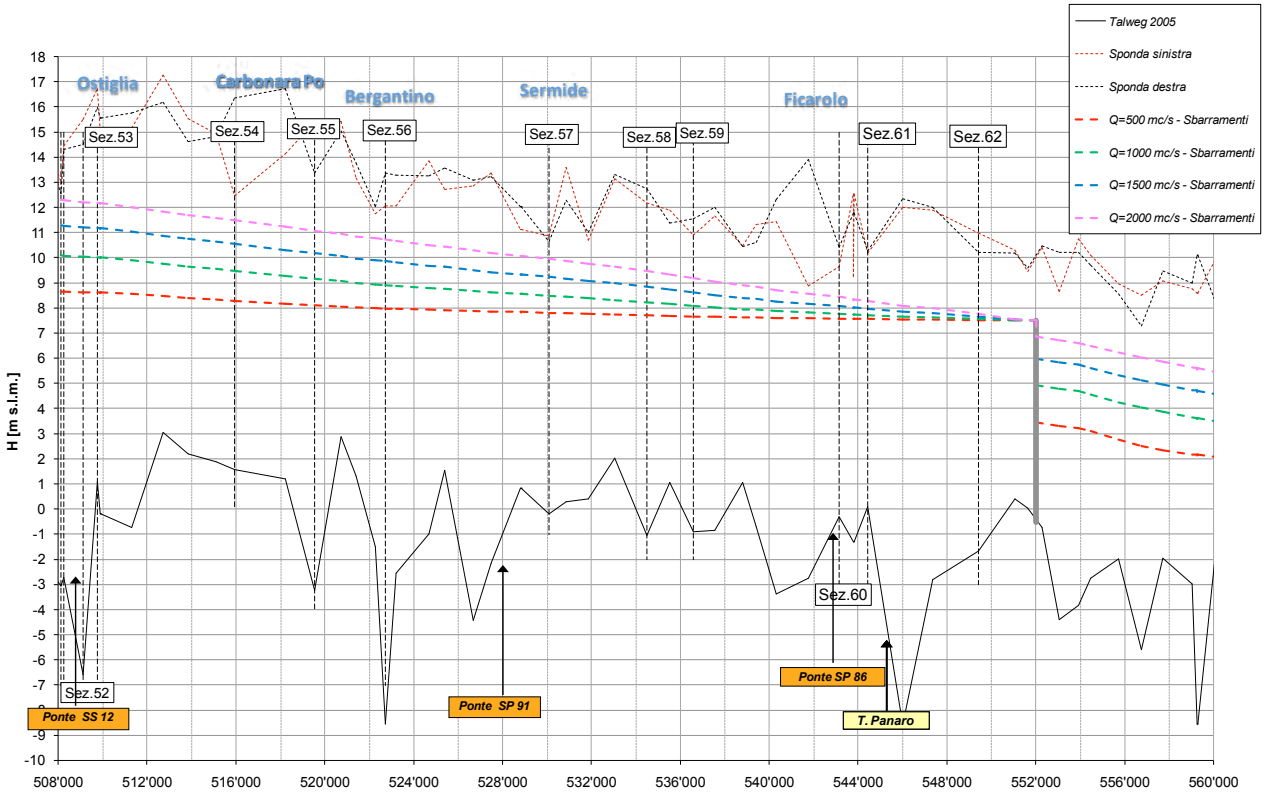

0 250 500 1'000 1'500 Meters
Sustinente
Sacchetta
Sabbioncello
C. Bosco
C. Fornace


1'000 500 0 1'000 Meters

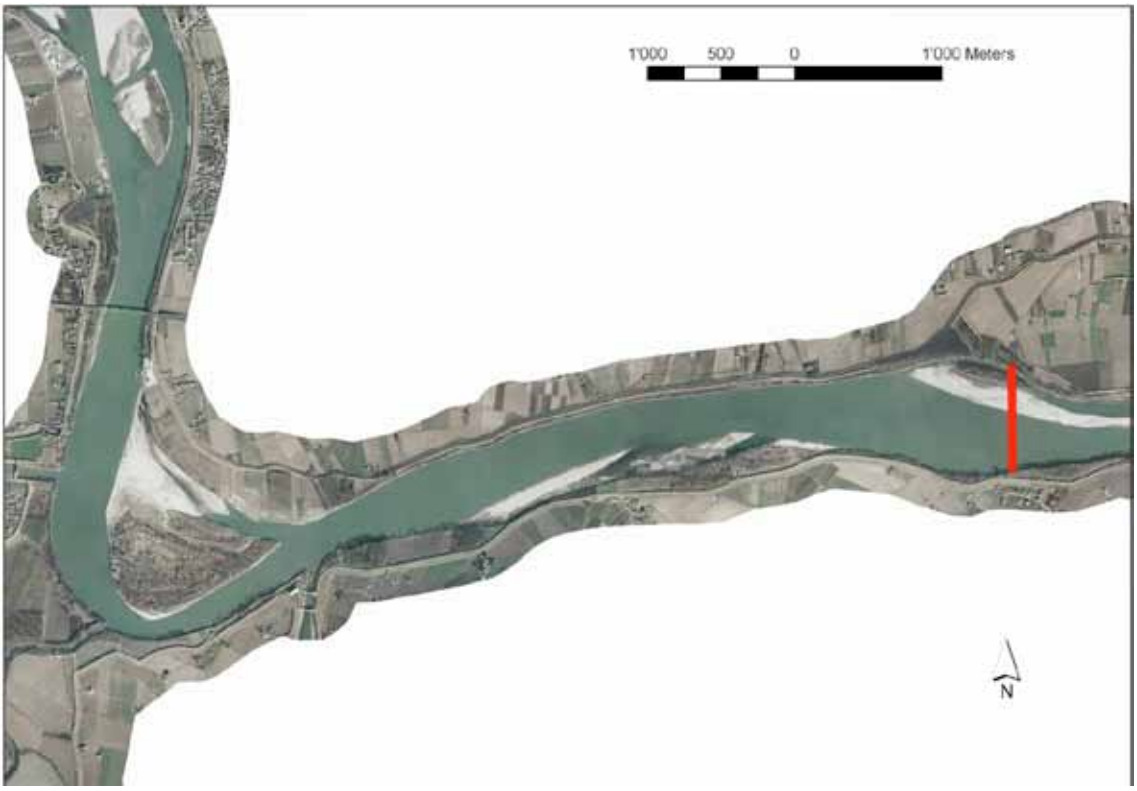
Traversa n.5 a Gaiba – Ferrara, 6 km a valle di foce Panaro

Livello di ritenuta (m s.m.)	7,5
Livello max Q200 (m s.m.)	15.97
Livello magra (Q=400 m3/s) (m s.m.)	2,9

Portata (m^3/s)	Salto (m)
500	4,0
1000	2,6
1500	1,5
2000	0,6






1'000 500 0 1'000 Meters
N

Nei citati studi le prime quattro traverse erano ubicate in posizioni tali da risultare limitrofe ad uno degli argini maestri in modo da facilitarne l'accessibilità anche in fase di piena e affiancando a tale accesso: conca di navigazione, centrale idroelettrica e traversa mobile di regolazione. Per la traversa n. 5, invece, era stata indicata solo la sezione di ubicazione ma senza entrare nel merito della sua configurazione strutturale.



Traversa n. 1 a Motta Baluffi – Roccabianca



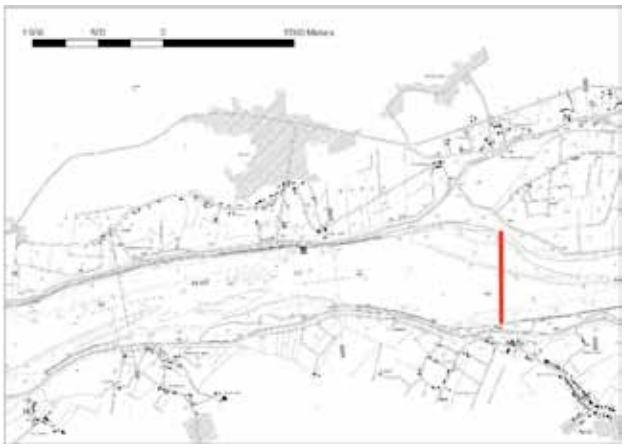
Traversa n. 2 a Viadana – Brescello



Traversa n. 3 a Borgoforte – Motteggiana



Traversa n. 4 a Sustinente – Quingentole

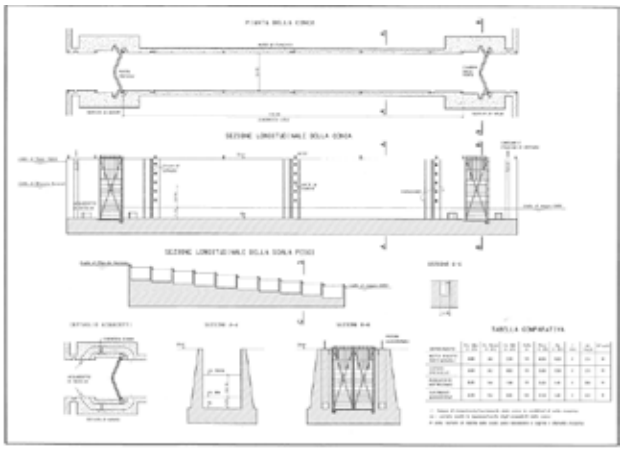


Traversa n. 5 a Gaiba - Ferrara

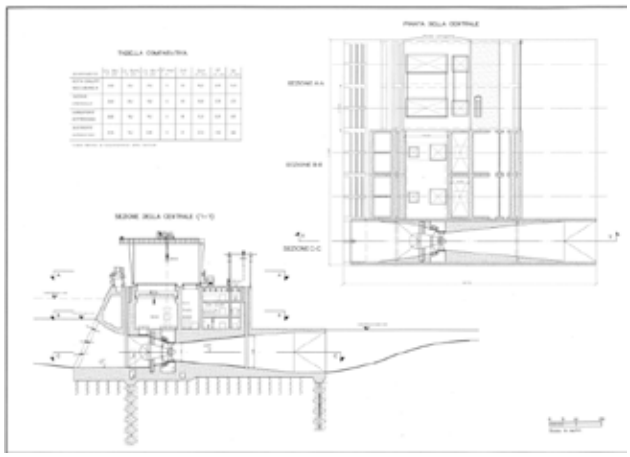
Figura 150 - Posizione delle traverse proposte nel tratto tra Cremona e Gaiba (da Studio 2009).

Inoltre tali opere erano definite, dato il livello di impostazione preliminare della progettazione, con opere-tipo analoghe per tutte le traverse, rappresentate nella seguente

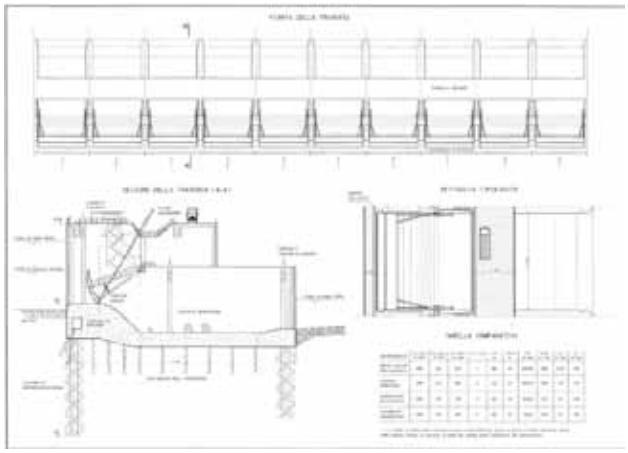
Figura 151



Conca di navigazione e scala di risalita delle specie ittiche



Centrale idroelettrica



Traversa mobile

Figura 151 - Schemi delle opere (da Studio 2009).

Nei riguardi dell'influenza delle traverse sui livelli liquidi del Po, a monte di ciascuna delle traverse si produce un innalzamento dell'attuale livello del Po che varia, in funzione della portata fluente e della corrispondente pendenza longitudinale del profilo di corrente, tra un massimo di 5 – 6 m, nelle fasi di magra con portate dell'ordine di 500 m3/s, ed un minimo tendente a zero nelle morbide fino a circa 2500 m3/s. In questo intervallo di portate l'innalzamento del pelo libero rimane comunque confinato all'interno dell'alveo inciso. Per valori maggiori della portata, essendo naturalmente annullato il dislivello idrico tra monte e valle delle traverse per effetto della maggior pendenza del pelo libero, le paratoie si aprono completamente, in modo da consentire il libero deflusso della corrente con profilo idraulico inalterato rispetto a quello naturale. A maggior ragione ciò vale anche per le piene ordinarie e straordinarie, come più oltre esposto. Le precedenti figure mostrano infatti come già con portata di 4.000 m3/s il profilo liquido si riporti naturalmente per tutte e cinque le traverse al di sopra del livello di regolazione e quindi al profilo naturale attuale.

E' importante sottolineare che le traverse, pur modificando il livello idrico del Po, ma come detto limitatamente al sopraccitato intervallo di portate di magra o morbida, non alterano minimamente il regime delle portate. Essendo esse infatti puramente ad acqua fluente, la portata turbinata e scaricata a valle di ciascuna traversa è uguale in ogni istante alla portata del Po in arrivo a monte di esso. Solo durante le saltuarie operazioni di riempimento e svuotamento (messa in esercizio iniziale,

manutenzione, rilasci per sopperire a periodi di scarsità idrica e successive fasi di ripristino del livello di regolazione, ecc.) sussistono delle differenze tra le portate a monte e a valle degli sbarramenti (fasi di invaso e svaso), tali peraltro da determinare scostamenti assolutamente trascurabili nelle curve di durata delle portate delle varie sezioni.

7.2 NUOVA CONFIGURAZIONE DELLE OPERE DI REGIMAZIONE

Nel presente studio la configurazione delle opere di regimazione di sostegno è stata nuovamente analizzata allo scopo di individuare soluzioni migliorative per prestazioni e fattibilità tecnico-economica.

La ricerca delle configurazioni più idonee delle cinque traverse ha naturalmente preso le mosse dalle tipologie strutturali prima richiamate definite nello studio di fattibilità AIPo – Infrastrutture Lombarde del 2009. Gli approfondimenti e i calcoli modellistici effettuati hanno poi condotto da un lato a confermare i livelli idrici di regolazione dello Studio AIPO 2009 per tutte le cinque traverse, ma dall'altro lato a variare l'ubicazione e la configurazione tipologica come di seguito esposto.

In particolare si è proceduto a:

verificare l'ubicazione delle traverse della soluzione 2009 e individuare eventuali posizioni alternative, pur restando nell'intorno dell'ubicazione prevista nello Studio del 2009, in modo da mantenerne il medesimo livello di regolazione;

definire mediante modellazioni idrauliche i campi di regolazione delle traverse e i corrispondenti profili di rigurgito a monte delle traverse atti a realizzare i desiderati sostegni dei livelli idrici di magra del Po;

definire a livello di larga massima le possibili configurazioni tecniche delle traverse e i relativi costi di costruzione e di gestione.

7.2.1 Ubicazione ottimale delle traverse di sostegno

La ricerca delle soluzioni ottimali è stata condotta con i seguenti criteri:

ottimizzazione della soluzione 2009 e proposta/e di variante/i, allo scopo di ottimizzare la funzionalità dell'opera nei riguardi della navigazione, in particolare garantendo manovrabilità degli accessi nei mandracchi della conca per navigli di classe Va;

verifica della soluzione 2009 e proposta/e di variante/i, allo scopo di minimizzare l'impatto delle opere fisse (strutture fisse costitutive della conca, delle pile della traversa, della centrale idroelettrica e delle opere accessorie e di accesso e manutenzione) nei confronti dei regimi di piena;

verifica della soluzione 2009 e proposta/e di variante/i, per rendere compatibili le opere con il regime degli affluenti, nei casi di prossimità con le corrispondenti foci, o con specifiche condizioni locali.

Le seguenti figure mostrano per ciascuna delle 5 traverse le configurazioni di tutte le soluzioni qui studiate attraverso analisi tecniche e modellistiche, sia quelle del progetto 2009, sia quelle alternative qui proposte.

per la traversa n. 1 a Motta Baluffi (CR) - Roccabianca (PR) si è studiata una ubicazione (Figura 152) posta poco più a monte rispetto a quella del progetto 2009, al fine di ottimizzare l'accesso dei navigli di classe Va alla conca di navigazione e ai relativi mandracchi di monte e di valle; nella nuova disposizione la traversa è posta in corrispondenza del ramo sostanzialmente rettilineo dell'alveo fluviale al contrario di quanto avviene con la posizione del progetto 2009. Inoltre nella nuova posizione è maggiore l'ampiezza complessiva dell'alveo di piena del Po con conseguente miglioramento complessivo del deflusso di piena e impatto trascurabile delle opere fisse della traversa;

per la traversa n. 2 a Viadana (MN) - Brescello (RE) la soluzione in variante, rispetto a quella del progetto 2009, prevede (Figura 153 e Figura 154) un'ubicazione a monte della foce del Parma in modo da evitarne il rigurgito in fase di piena;

per la traversa n. 3 a Borgoforte (MN) - Motteggiana (MN), avendo valutato le criticità della soluzione

del progetto 2009 relative alla navigabilità del ramo curvilineo e ristretto di Borgoforte, sono state configurate due soluzioni in variante (Figura 155, Figura 156), una ubicata poco a monte rispetto a quella del 2009, in un tronco fluviale che ottimizza maggiormente l'accesso dei navigli di classe Va alla conca di navigazione e ai relativi mandracchi di monte e di valle, e una a monte della confluenza con il fiume Oglio, allo scopo di eliminare gli impatti indotti dal livello idrico di regolazione della traversa con sistema di bonifica che afferisce al fiume Oglio stesso in prossimità della confluenza con il fiume Po (Consorzio di Bonifica Navarolo – Agro Cremonese Mantovano);

per la traversa n. 4 a Sustinente (MN) - Quingentole (MN), a valle di foce Mincio nel progetto 2009 era stata studiata una posizione poco a valle di foce Secchia; sono state configurate due varianti (Figura 157 e Figura 158): una ubicata a monte del Secchia e poco a valle di Sustinente, che prevede peraltro anche lo spostamento della foce di quest'ultimo verso valle e con andamento più opportuno, peraltro già previsti da AIPO; l'altra ancora a valle del Secchia e anche a valle di Quingentole, ma in condizioni più favorevoli rispetto alla navigabilità fluviale;

per la traversa n. 5 a Gaiba (FE) – Ferrara sono state configurate due varianti (Figura 159) rispetto alla posizione delineata nello studio del 2009; una ubicata subito a valle in posizione più favorevole rispetto alla navigabilità fluviale; l'altra ancora poco più a valle in modo tale da facilitare con il rigurgito creato dalla traversa la navigabilità del difficile ramo curvilineo di Stienta.

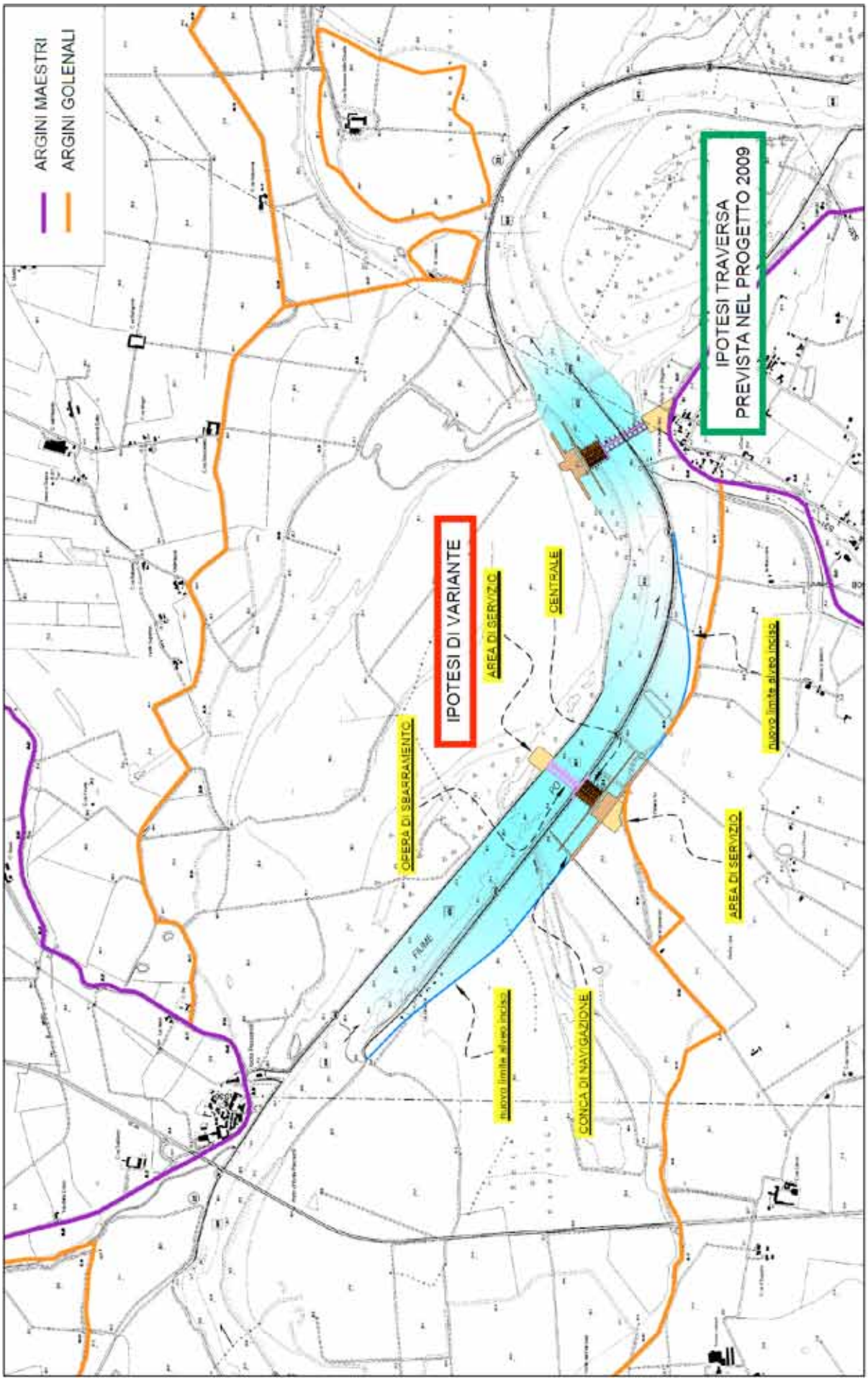


Figura 152 – Traversa n. 1 a Motta Baluffi (CR) – Roccabianca (PR). Ubicazioni del progetto 2009 e della proposta di variante 2015 (scala 1:20'000).

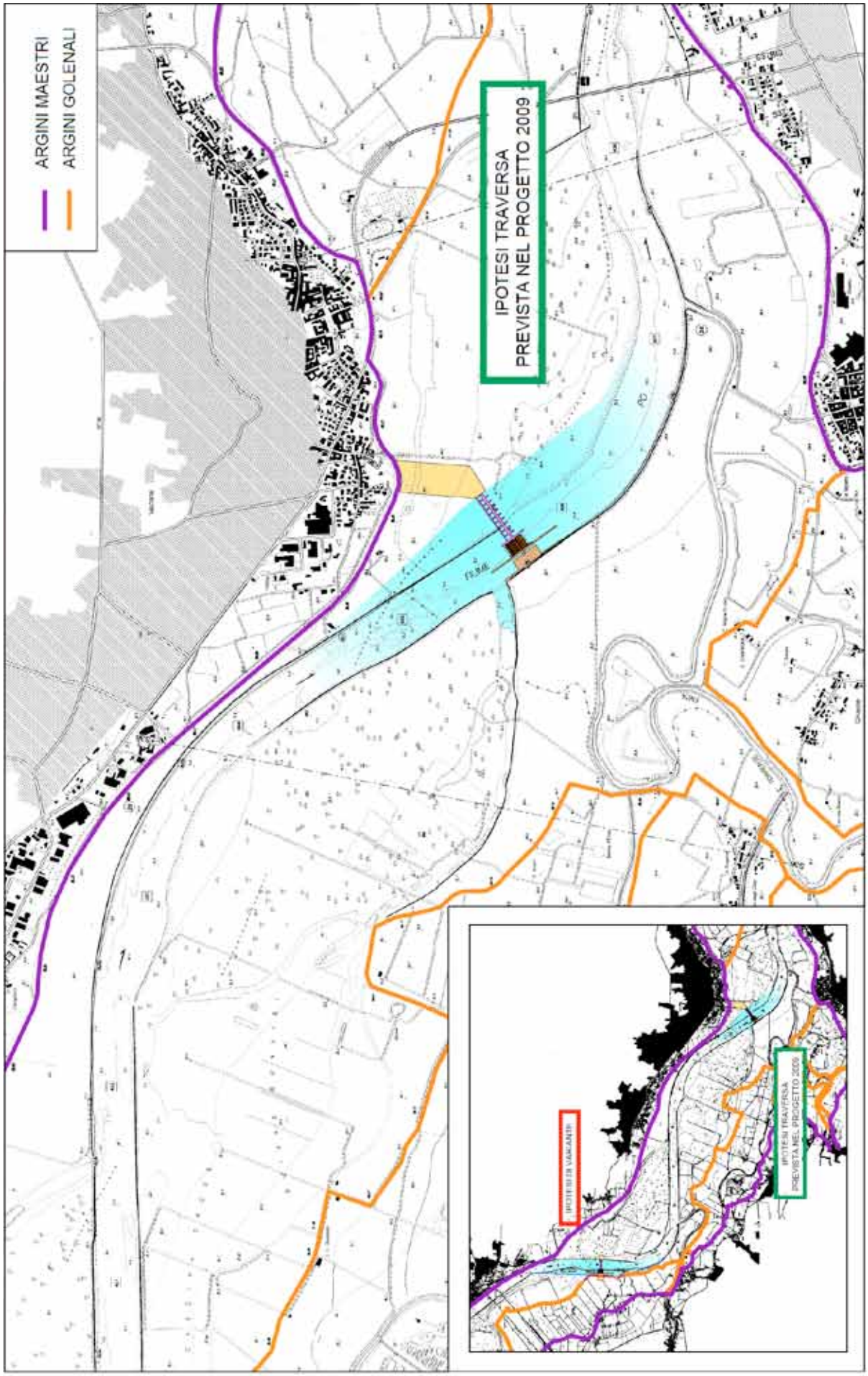


Figura 153 - Traversa n. 2 a Viadana (MN) - Brescello (RE). Ubicazioni del progetto 2009 (scala 1:20'000).

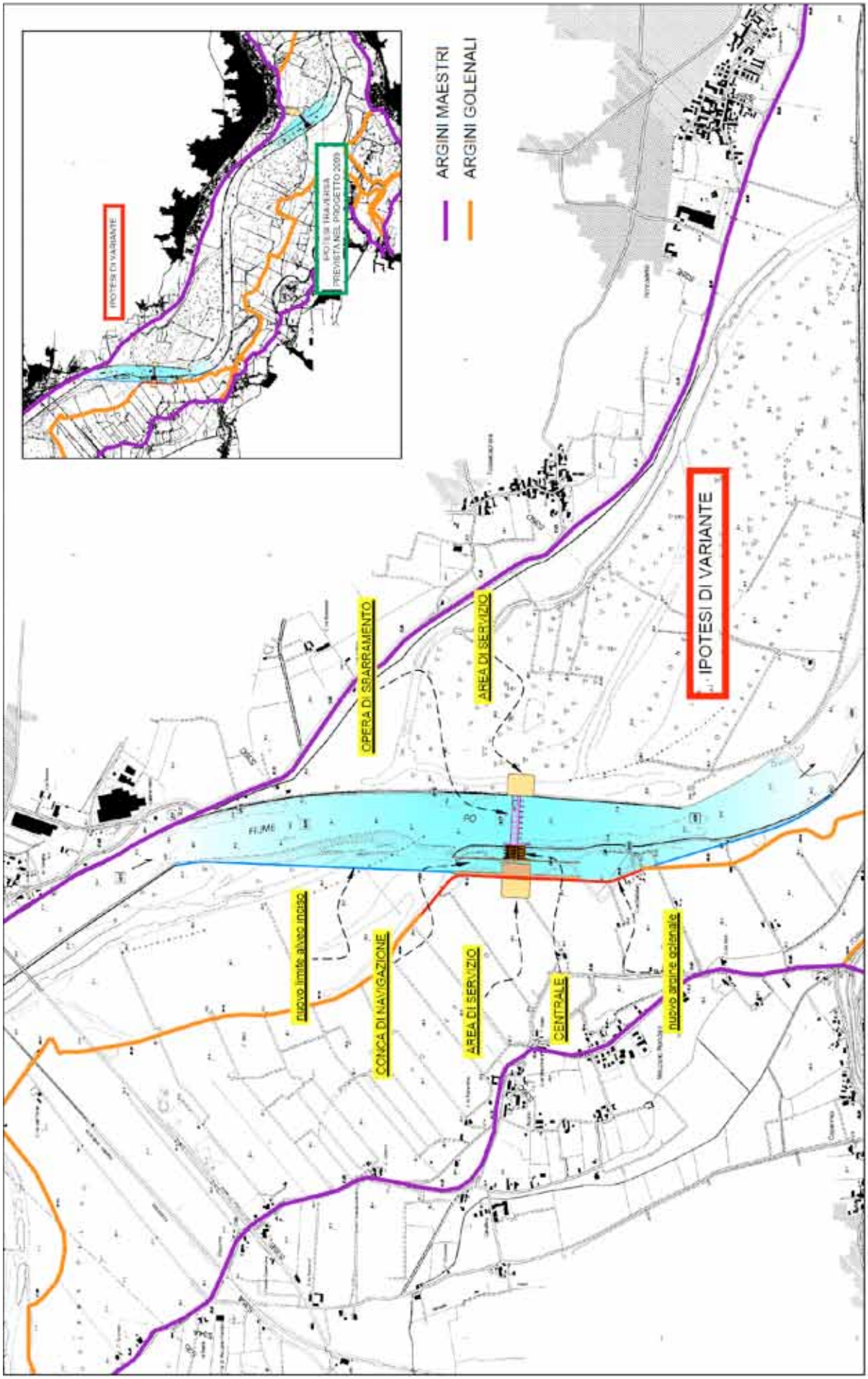


Figura 154 - Traversa n. 2 a Viadana (MN) - Brescello (RE). Ubicazioni della proposta di variante 2015 (scala 1:20'000).

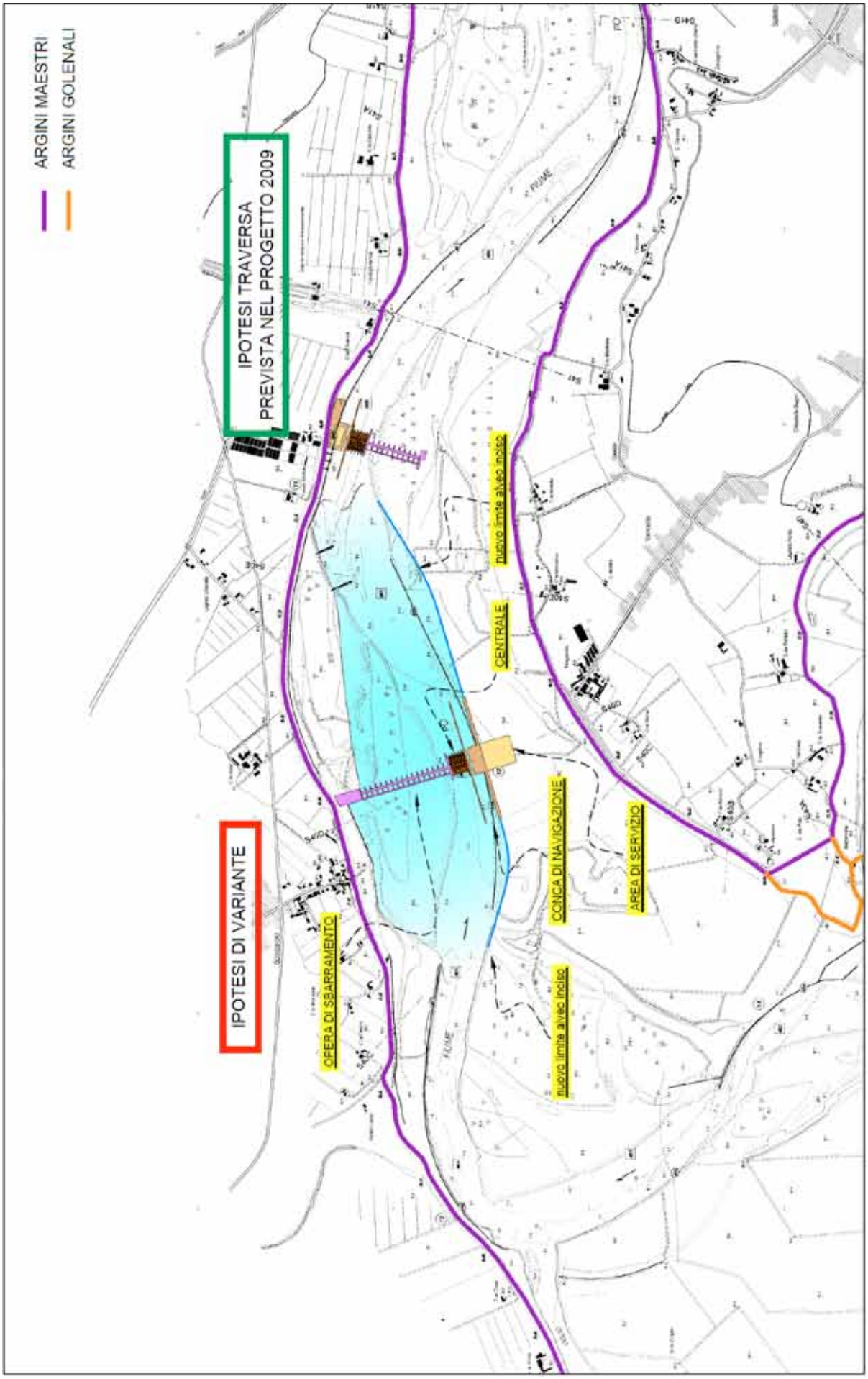


Figura 155 - Traversa n. n. 3 a Borgoforte (MN) - Motteggiana (MN). Ubicazioni del progetto 2009 e della proposta di variante 2015 (scala 1:20'000).

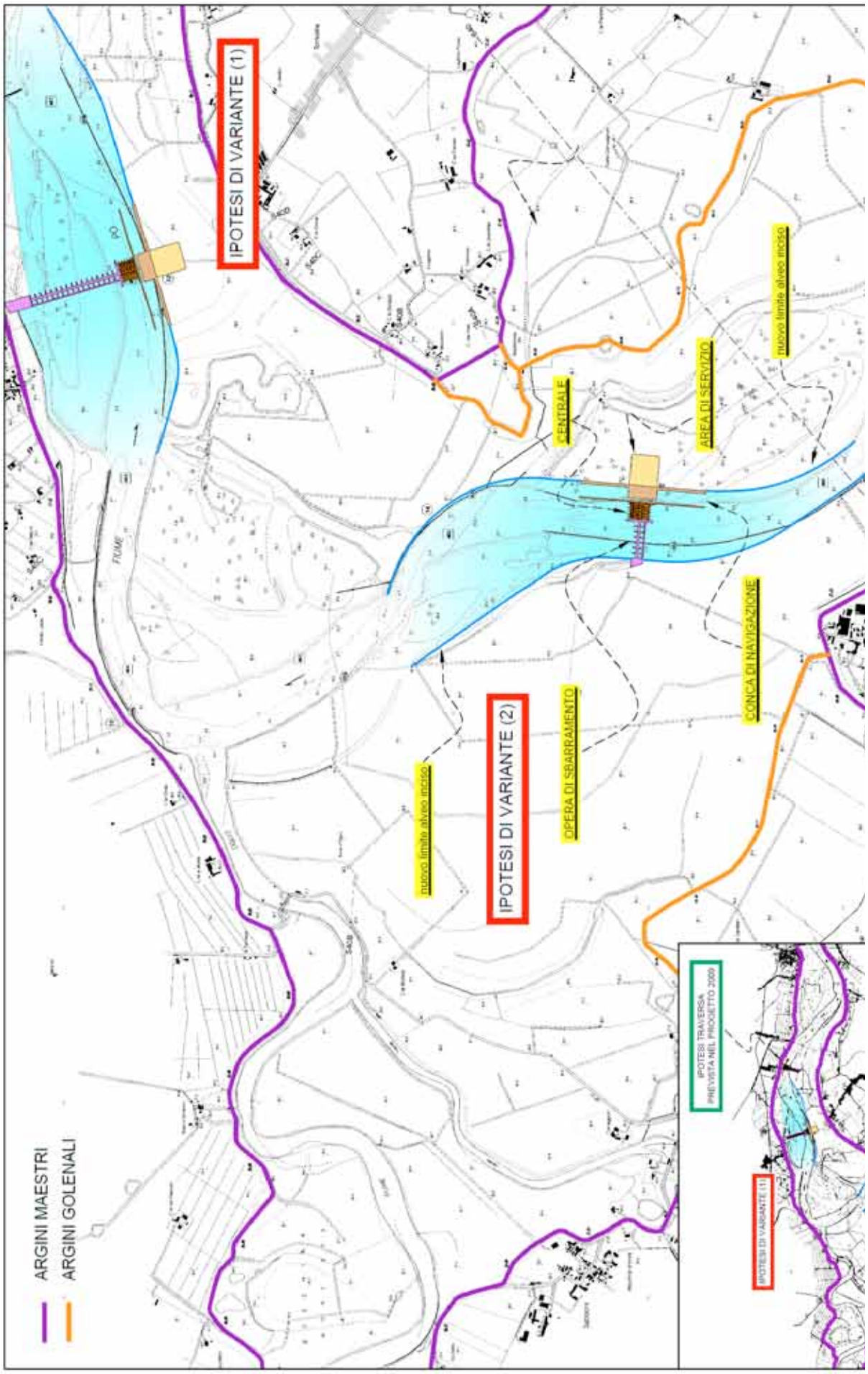


Figura 156 - Traversa n. n. 3 a Borgoforte (MN) - Motteggiana (MN). Ubicazioni del progetto 2009 e della proposta di variante 2015 (scala 1:20'000).

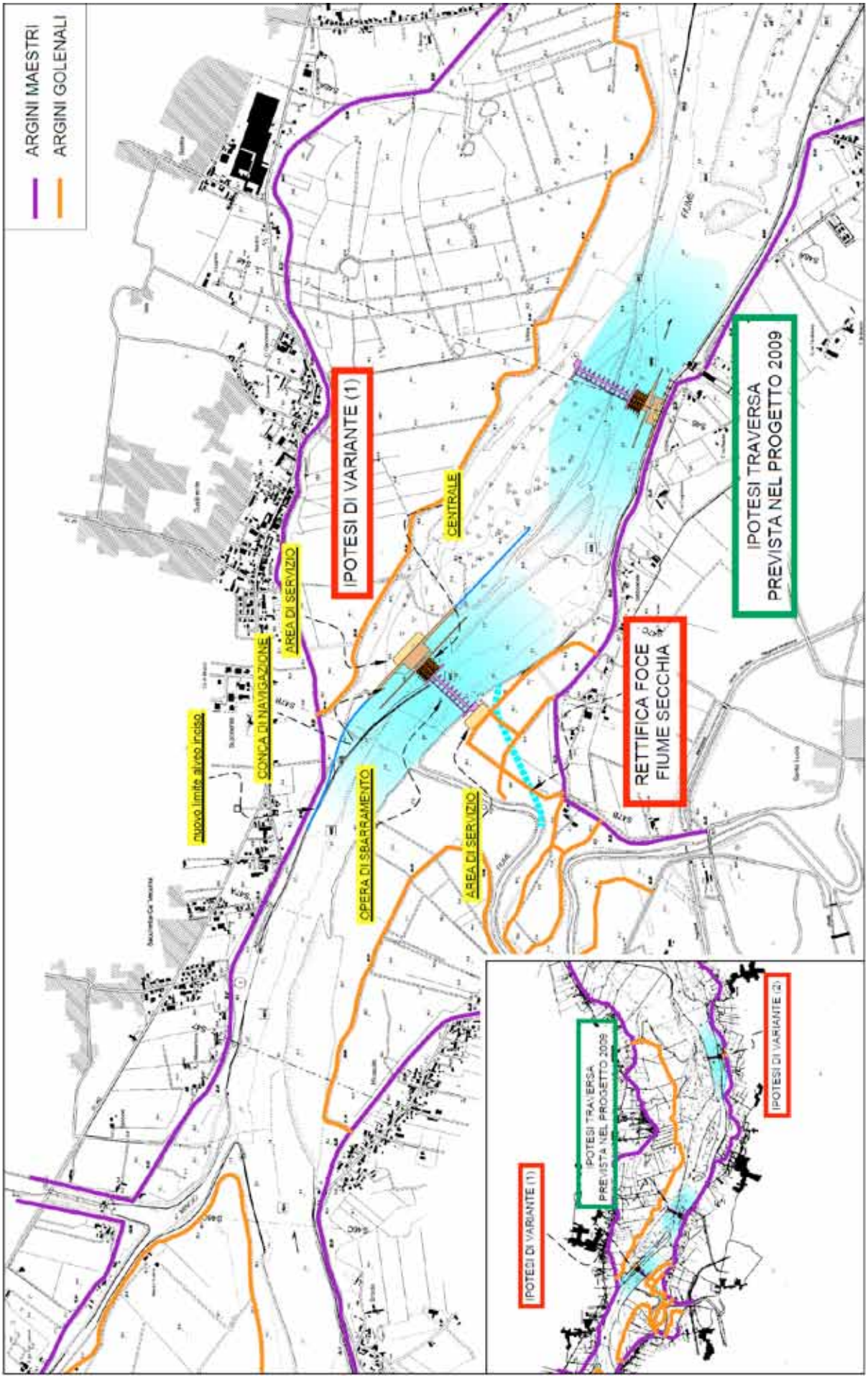


Figura 157 - Traversa n. 4 a Sustinente (MN) - Quingentole (MN). Ubicazioni del progetto 2009 e della proposta di variante 1 2015 (scala 1:20'000).

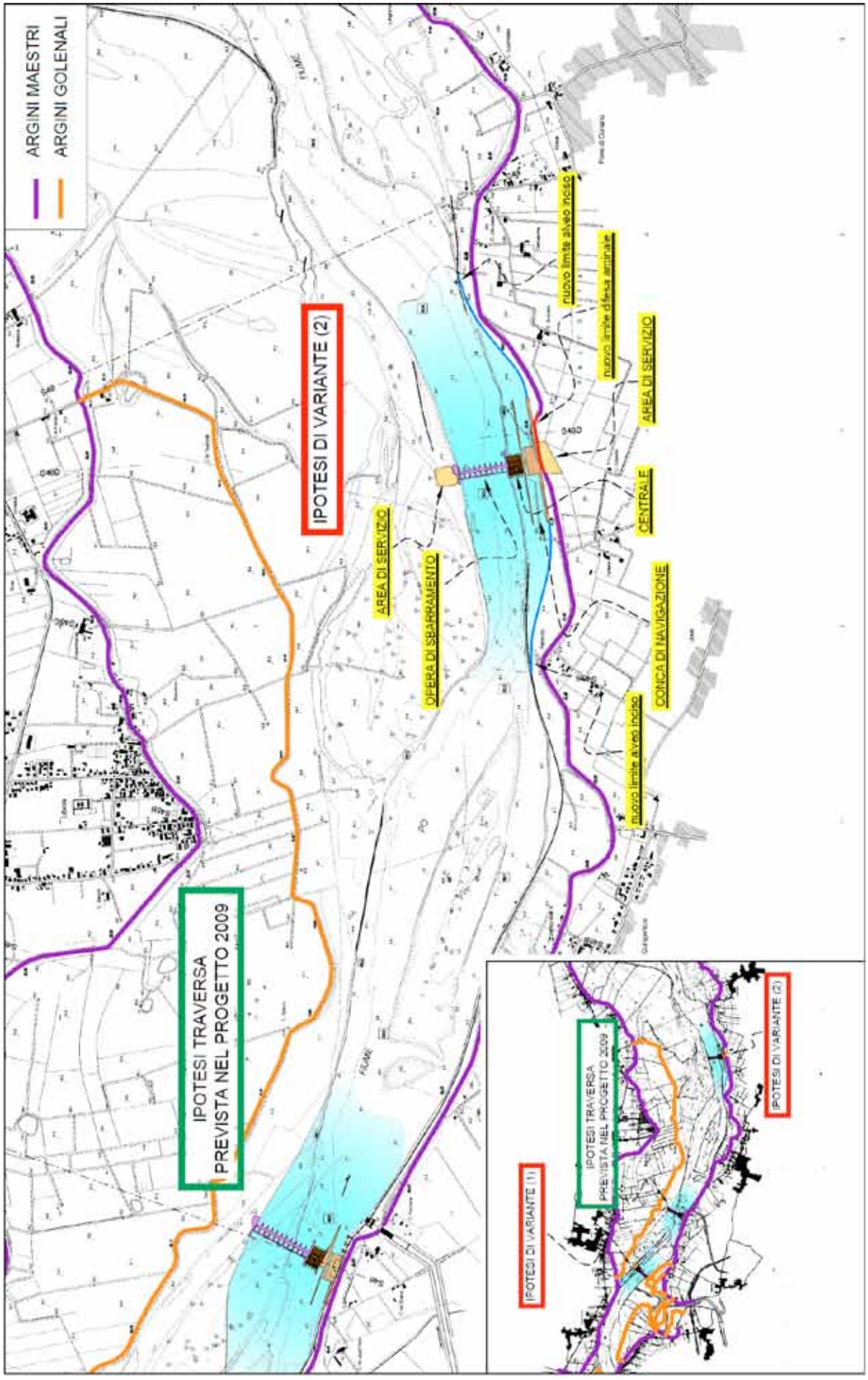


Figura 158 - Traversa n. 4 a Sustinente (MN) - Quingentole (MN). Ubicazioni del progetto 2009 e della proposta di variante 2 2015 (scala 1:20'000).

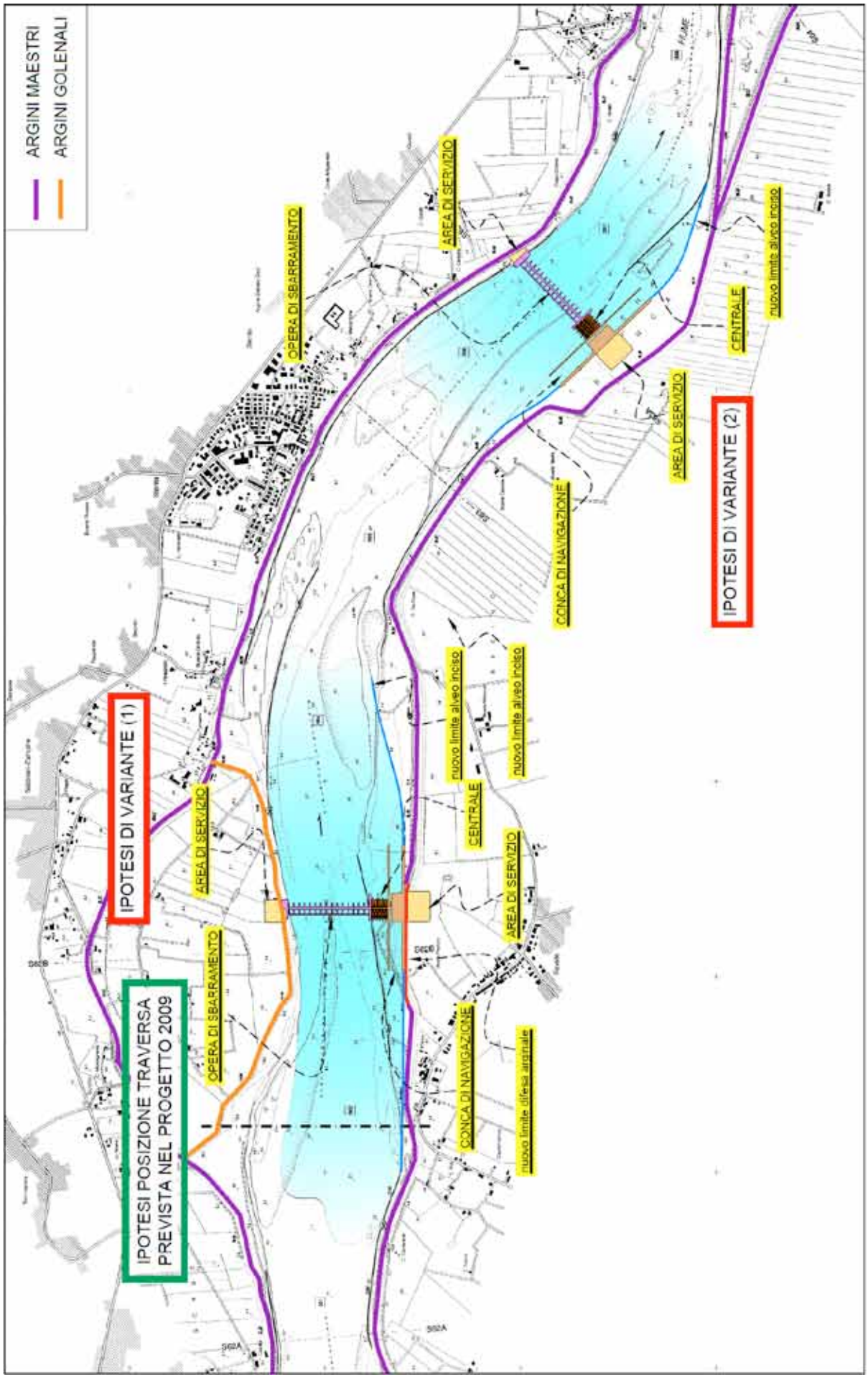


Figura 159 - Traversa n. 5 a Gaiba (FE) - Ferrara. Ubicazioni del progetto 2009 e della proposta di variante 2015 (scala 1:20'000).

7.2.2 Campi di regolazione delle traverse e relativi profili di rigurgito

Così definite le nuove posizioni delle cinque traverse si è proceduto al calcolo dei corrispondenti profili di rigurgito indotti dalle rispettive quote di regolazione. Nei riguardi di queste ultime, come già detto, anche le nuove verifiche effettuate hanno portato a confermare le medesime quote di regolazione assunte nello Studio AIPO 2009. Pertanto, posizioni e quote di regolazione dei cinque sbarramenti sono definitivamente fissate come riportato nella seguente Tabella.

TRAVERSA	PROGRESSIVA (Km)	QUOTA REGOLAZIONE (m s.m.)
Traversa n. 1 a Roccabianca	401	30,0
Traversa n. 2 a Mezzano Rondani	427	24,2
Traversa n. 3 a Cizzolo	461	19,0
Traversa n. 4 a Quingentole	503	14,2
Traversa n. 5 a Stienta	537	7,5

Tabella 56 - Progressive di ubicazione e quota di regolazione delle cinque traverse

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di moto permanente sia in assenza di sbarramenti sia in presenza degli stessi al variare della portata fluviale. I calcoli modellistici sono stati condotti con modellazione monodimensionale a fondo fisso (modello MIKE 11-DHI) sulla base delle sezioni rilevate nel 2005.

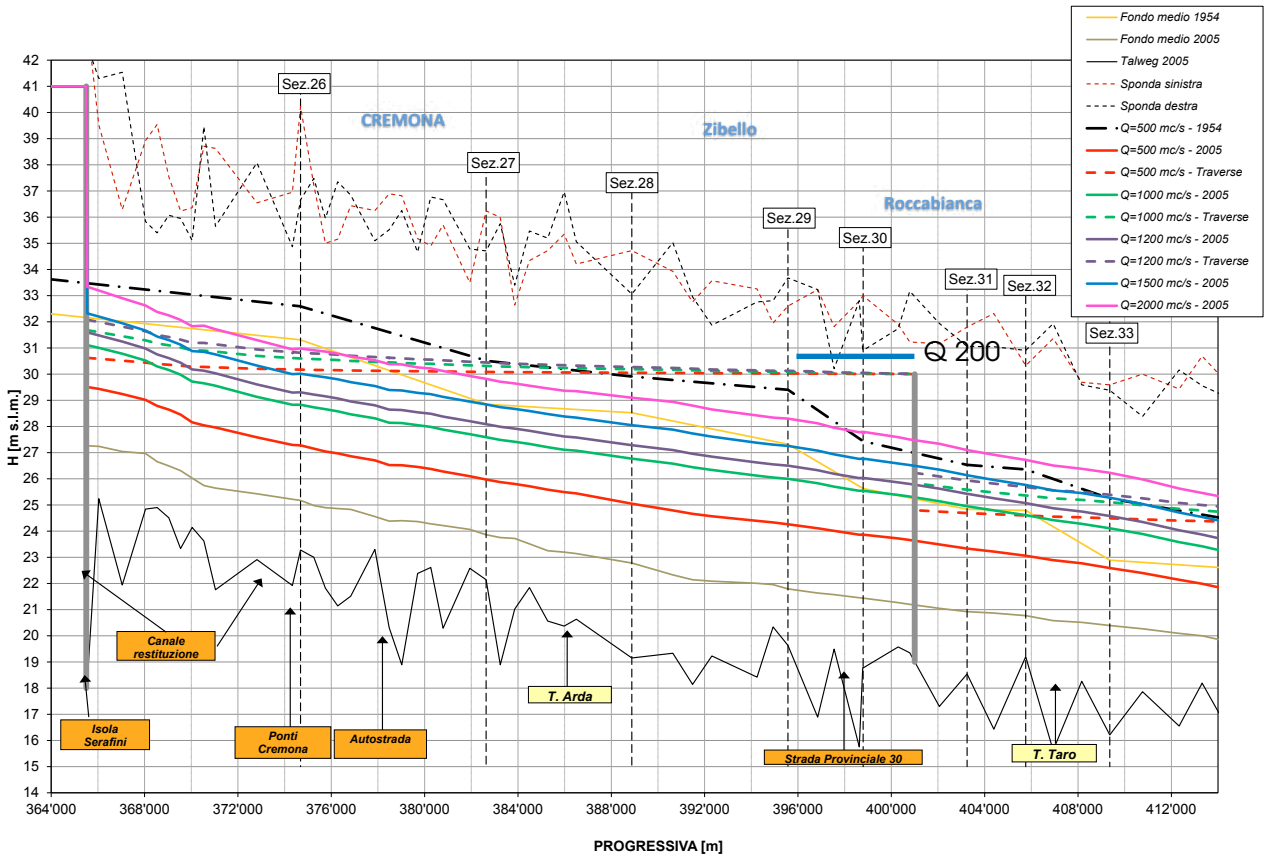


Figura 160 - Traversa esistente di Isola Serafini e Traversa n. 1 in progetto a Roccabianca. Profili idrici, riferiti alla batimetria 2005, naturali (senza sbarramenti) e indotti dalle quote di regolazione degli sbarramenti per portate fluviali fino a 2500 mc/s. È anche indicata la quota piena PAI Q200 nella sezione della traversa

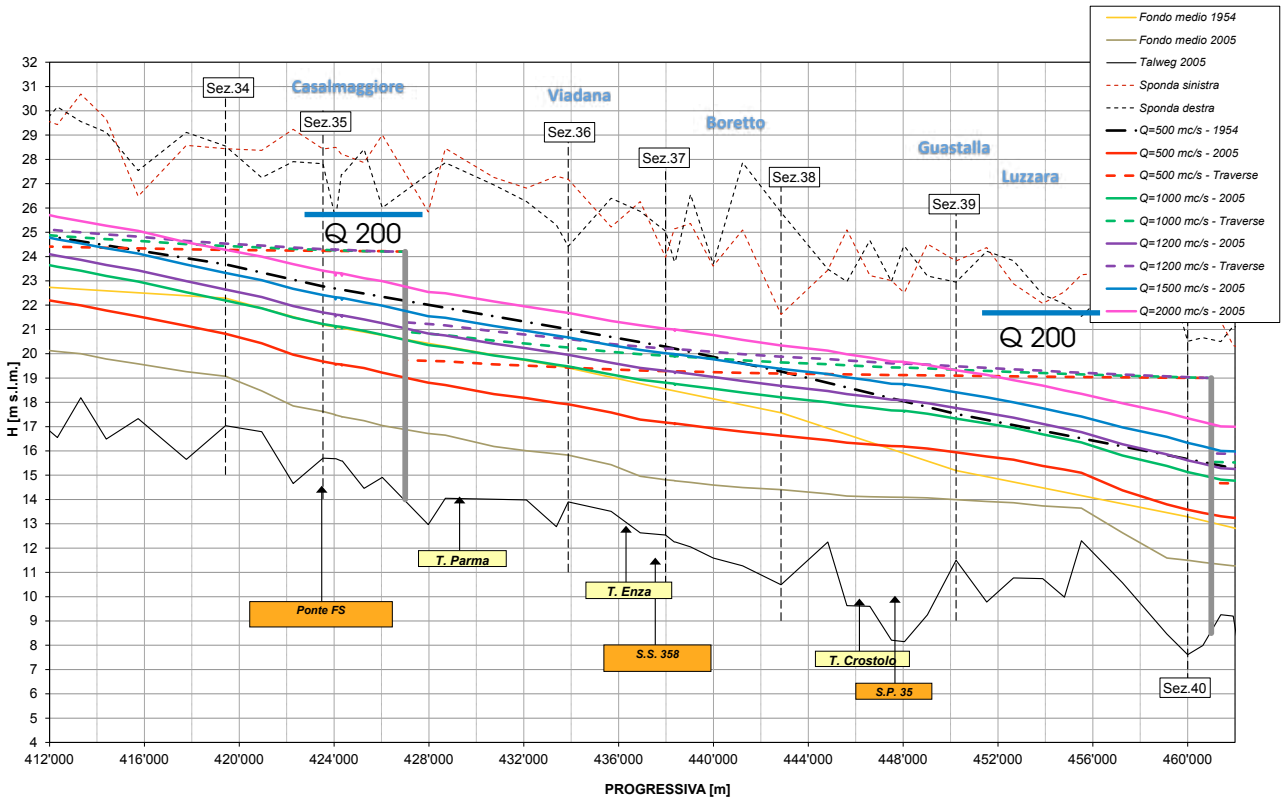


Figura 161 - Traverse in progetto n. 2 a Mezzano Rondani e n. 3 a Cizzolo. Profili idrici, riferiti alla batimetria 2005, naturali (senza sbarramenti) e indotti dalle quote di regolazione degli sbarramenti per portate fluviali fino a 2500 mc/s. È anche indicata la quota piena PAI Q200 nella sezione della traversa

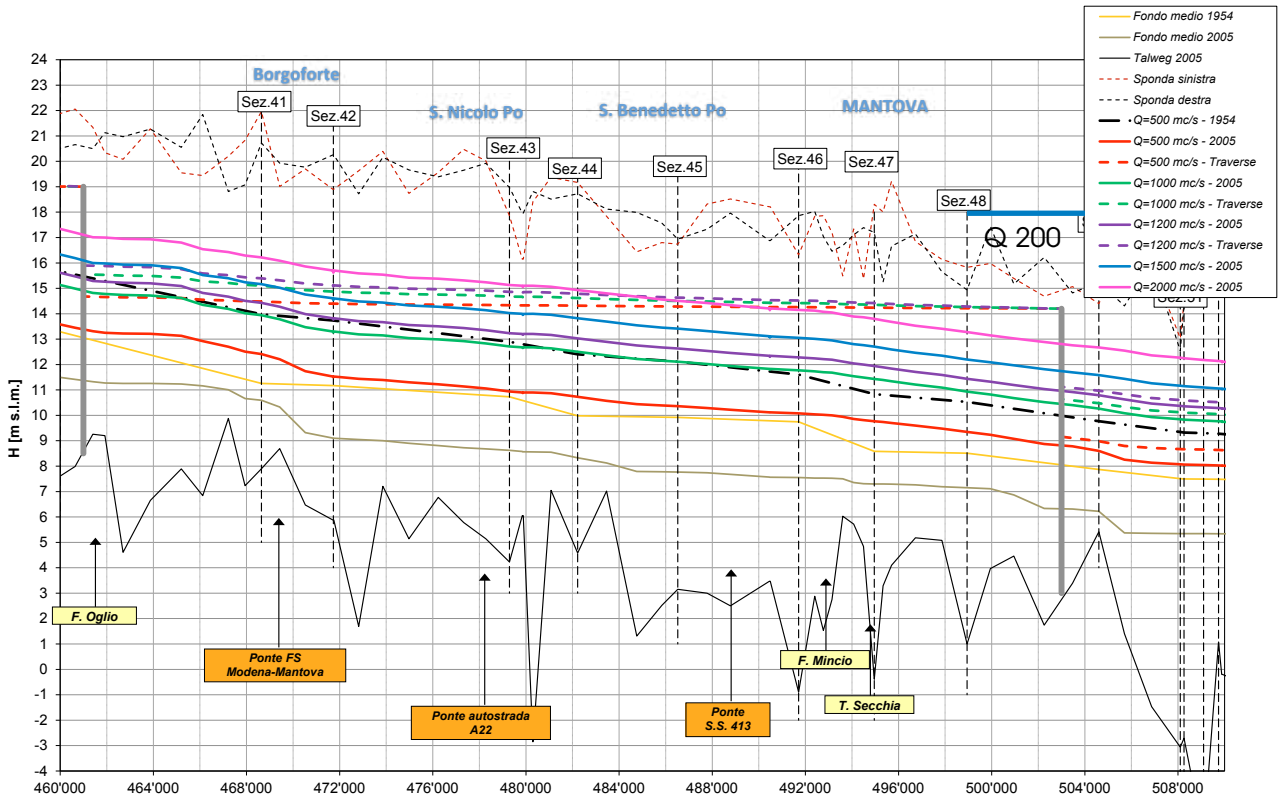


Figura 162 - Traverse in progetto n. 3 a Cizzolo e n. 4 a Quingentole. Profili idrici, riferiti alla batimetria 2005, naturali (senza sbarramenti) e indotti dalle quote di regolazione degli sbarramenti per portate fluviali fino a 2500 mc/s. È anche indicata la quota piena PAI Q200 nella sezione della traversa

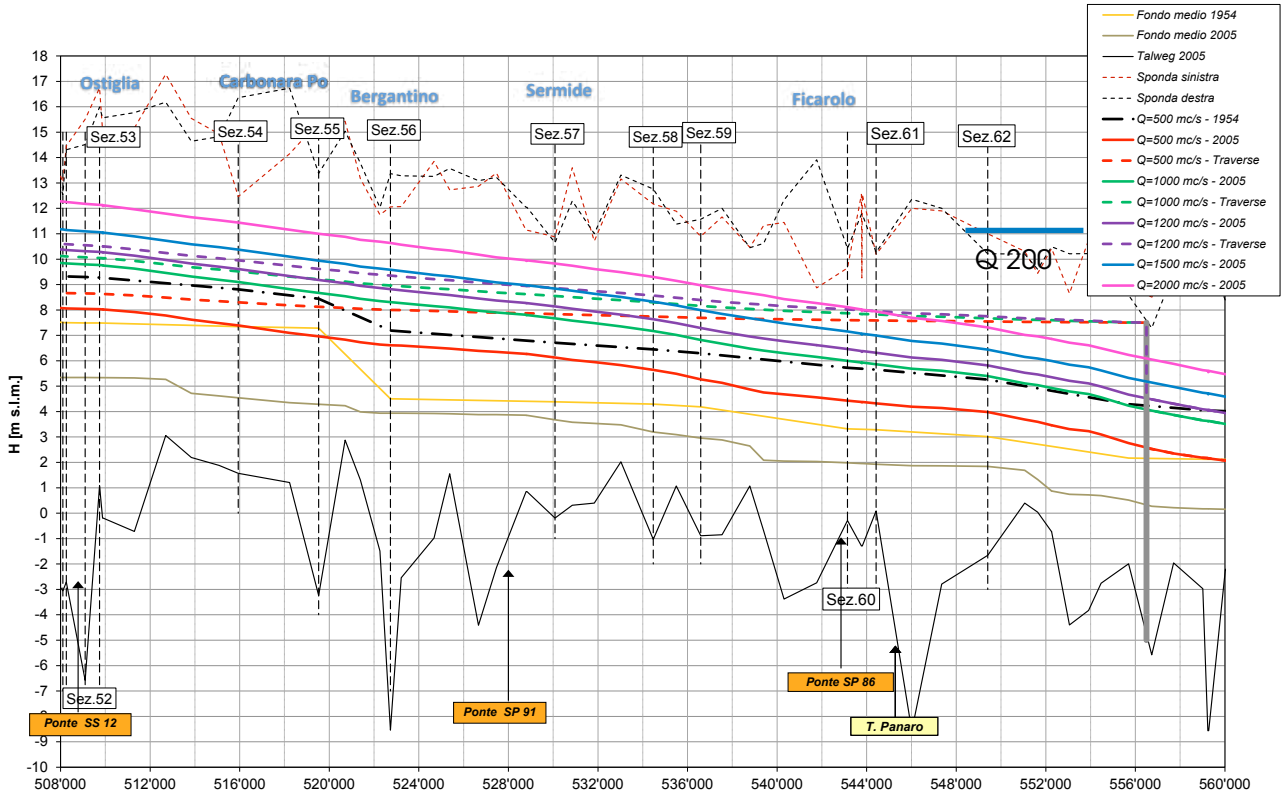


Figura 163 - Traversa in progetto n. 5 a Stienta. Profili idrici, riferiti alla batimetria 2005, naturali (senza sbarramenti) e indotti dalle quote di regolazione degli sbarramenti per portate fluviali fino a 2500 mc/s. È anche indicata la quota piena PAI Q200 nella sezione della traversa

7.3 INGEGNERIA DI MASSIMA DELLE OPERE DI REGIMAZIONE

Le analisi modellistiche delle interrelazioni delle opere costituenti i 5 sbarramenti con la corrente fluviale, liquida e solida, in condizioni di magra e di piena straordinaria, sono descritte nei capitoli successivi e ad esse si rimanda per ogni dettaglio.

Qui si entra nel merito di due importanti aspetti emersi dalle analisi modellistiche comportanti importanti riflessi sulle scelte progettuali:

A. la configurazione progettuale delineata nello Studio AIPO 2009, che prevede in affiancamento planimetrico sbarramento di regolazione - centrale idroelettrica - scala di risalita delle specie ittiche - conca di navigazione, richiede un notevole allargamento dell'alveo di magra del Po, onde consentire l'efficienza idraulica della conca di navigazione e della centrale idroelettrica; ma questo allargamento determina, alla luce dei risultati modellistici sulla dinamica morfologica (v. cap. 9), effetti significativi di tendenza al deposito del trasporto di fondo con possibili ingombri e ostacoli nei confronti della portata fluente in centrale e dell'officiosità della conca di navigazione; ne consegue che una diversa alternativa progettuale, meno allargata e più concentrata nell'alveo di magra attuale, può contribuire ad evitare tali criticità;

B. lo studio AIPO 2009 prevedeva, come prima esposto, di poter utilizzare il salto idraulico generato dagli sbarramenti per portate fino a 2'000 – 2'500 m3/s, dal momento che per portate maggiori il salto è del tutto annullato in base al naturale profilo idrico fluviale e pertanto è anche annullata la produzione energetica; conseguentemente, alla luce del legame portata-salto di ogni traversa, era valutata in circa 1'000 Gwh/anno la produzione energetica media annua globale delle 5 traverse; ma, essendo la durata media annua dei periodi di chiusura delle traverse (cioè quelli di produzione idroelettrica) pari a circa 320 gg/anno, la conseguente interruzione della continuità longitudinale del trasporto di fondo risulterebbe penalizzata, sempre alla luce dei risultati modellistici sulla dinamica morfologica; ne consegue la decisione, dettagliatamente discussa nel cap. 9, di prevedere un intervallo di portate turbinabili limitato a 1'200 m3/s, cui

corrisponde una durata di chiusura degli sbarramenti ben più ridotto (185 ÷ 255 gg/anno a seconda della traversa) e quindi ben più accettabile per la dinamica sedimentologica del fiume; conseguentemente la stima della producibilità media annua si riduce globalmente per le 5 traverse a circa 550 o 630 Gwh/anno, in relazione alle configurazioni della centrale più oltre descritta; ne consegue una minor redditività economica della produzione energetica anche tenendo presente l'attuale regime di minori incentivazioni tariffarie attinenti il settore idroelettrico; in questa ottica, pertanto, restano pienamente validi tutti gli obiettivi precedentemente esposti determinati dal progetto di regimazione (tra cui i principali attengono la navigabilità commerciale per 365 gg/anno e il recupero morfologico e ambientale del corridoio fluviale), salvo l'obiettivo della produzione energetica che appare di minor interesse per i motivi anzidetti.

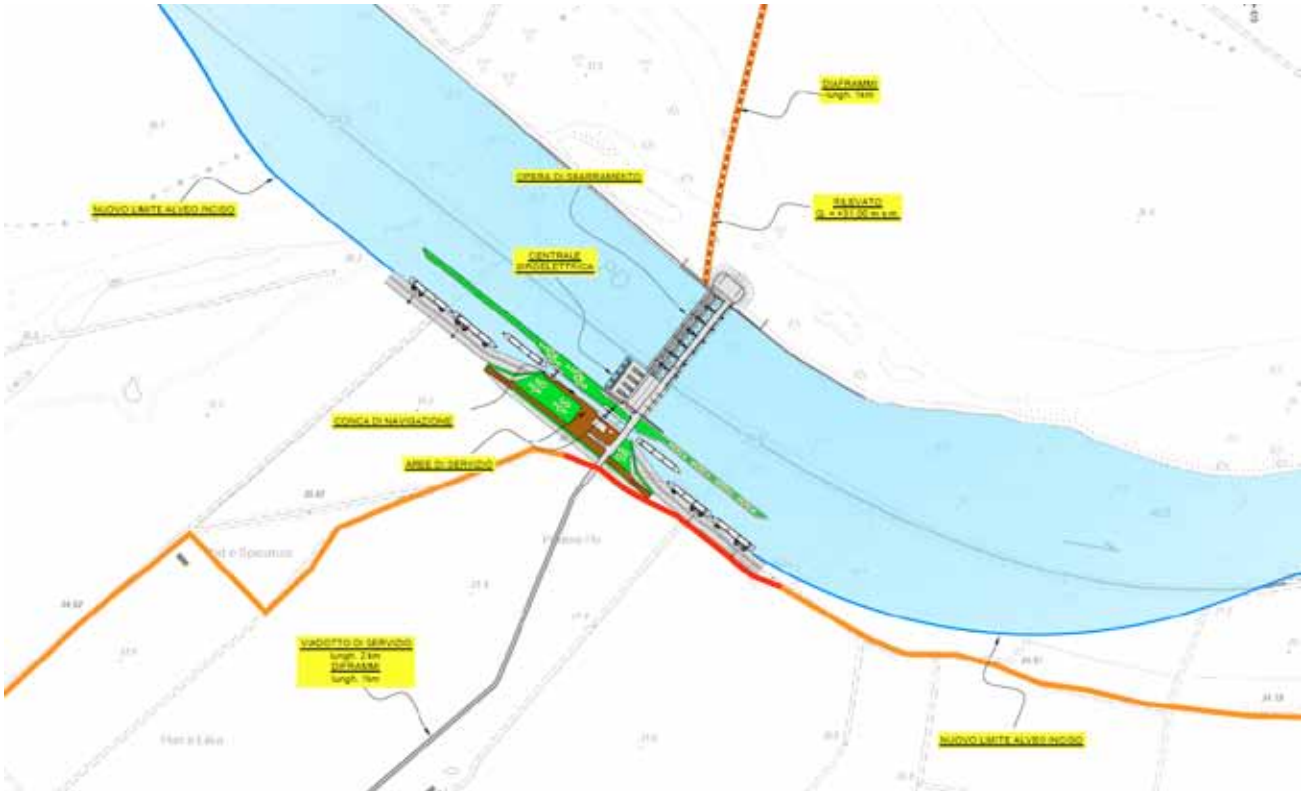
Da queste due importanti considerazioni derivanti dall'analisi attenta dei risultati modellistici è emersa l'opportunità di porre in studio alcune differenti configurazioni delle opere delle traverse.

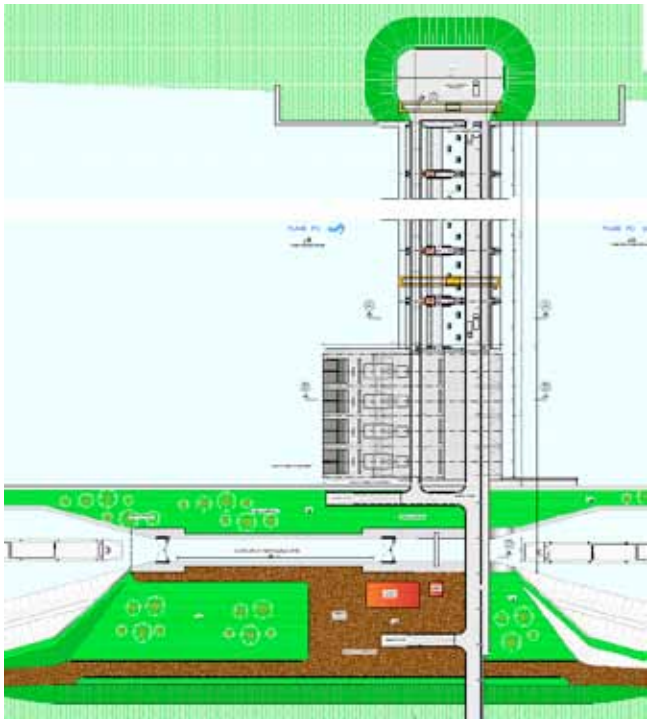
7.3.1 Tipologie alternative di configurazione degli sbarramenti

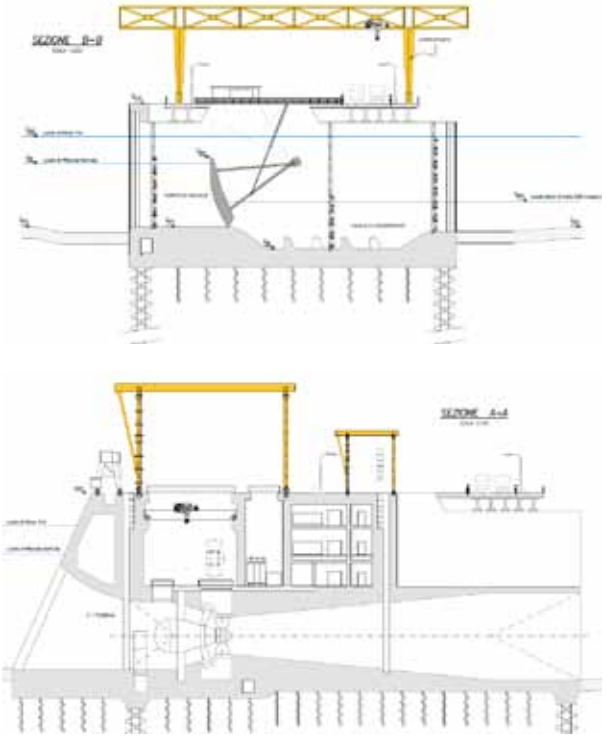
Le configurazioni alternative esaminate, alla luce delle considerazioni prima dette, sono tre e precisamente:

1. Configurazione "allargata" (Figura 164) corrispondente alla soluzione dello Studio AIPO 2009 (affiancamento planimetrico sbarramento di regolazione - centrale idroelettrica - scala di risalita delle specie ittiche - conca di navigazione). In questa configurazione la centrale idroelettrica è dotata di 4 turbine Kaplan a bulbo dimensionate in funzione dei salti disponibili al variare della portata e per portate fino a circa 300 mc/s cadauna e pertanto rispettanti il prima citato limite complessivo di 1'200 m^3/s e non più il limite di 2'000 – 2'500 m^3/s previsto nello Studio AIPo del 2009;
2. Configurazione "ristretta" priva di centrale idroelettrica (figura 165), quindi composta solo da sbarramento di regolazione - scala di risalita delle specie ittiche - conca di navigazione; dato infatti il minore interesse della produzione idroelettrica, ed attesi gli alti costi di costruzione delle centrali idroelettriche, questa soluzione prevede di eliminare completamente la centrale idroelettrica;
3. Configurazione "ristretta" ma con centrale idroelettrica inserita all'interno delle stesse luci dello sbarramento (Figura 166); quindi questa soluzione prevede ancora la produzione idroelettrica, ma utilizzando differenti tipologie e configurazioni innovative messe a punto dall'industria del settore anche con macchinari brevettati, ed è caratterizzata da una centrale composta da molteplici gruppi turbina-alternatore di piccola potenza dimensionati in funzione del salto disponibile al variare della portata. Le proposte di questo tipo indicate dalle industrie del settore sono varie e diversificate; in questa fase di impostazioni a livello di massima si è considerata una soluzione consistente in gruppi turbina-alternatore caratterizzati da portate specifiche dell'ordine di circa 10 - 12 m^3/s cadauno; date le dimensioni di tali gruppi questo tipo di centrale appare proponibile con una batteria composta da un numero complessivo di macchine pari a 60, suddivise in gruppi di 10 macchine per ogni luce di 25 m dello sbarramento, e quindi per una portata turbinabile complessiva di circa 700-750 m^3/s.

Per ognuna delle cinque traverse, l'Allegato 8 riporta le tavole grafiche descriventi le tre configurazioni sopra citate a livello di ingegneria di massima (planimetrie generali e di dettaglio, sezioni trasversali e longitudinali, ecc.).







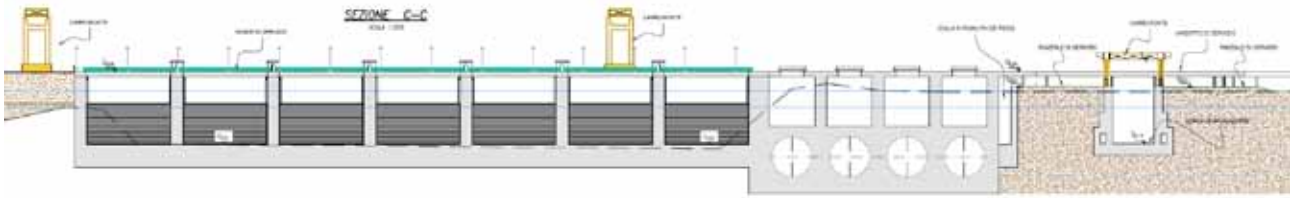
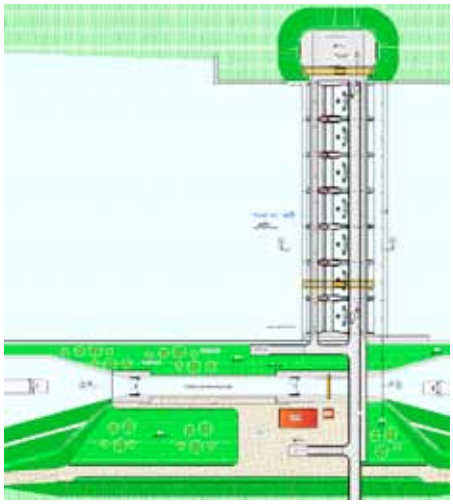


Figura 164 - Planimetrica generale della configurazione "allargata" delle traverse con affiancamento sbarramento di regolazione - centrale idroelettrica - scala di risalita delle specie ittiche - conca di navigazione





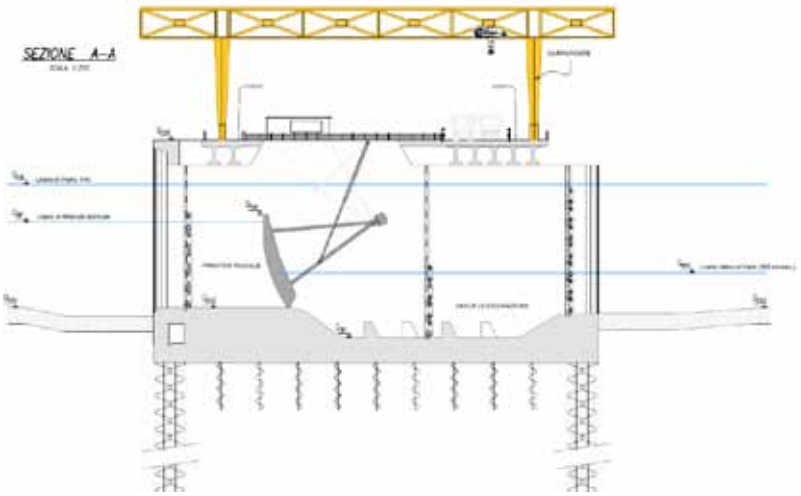
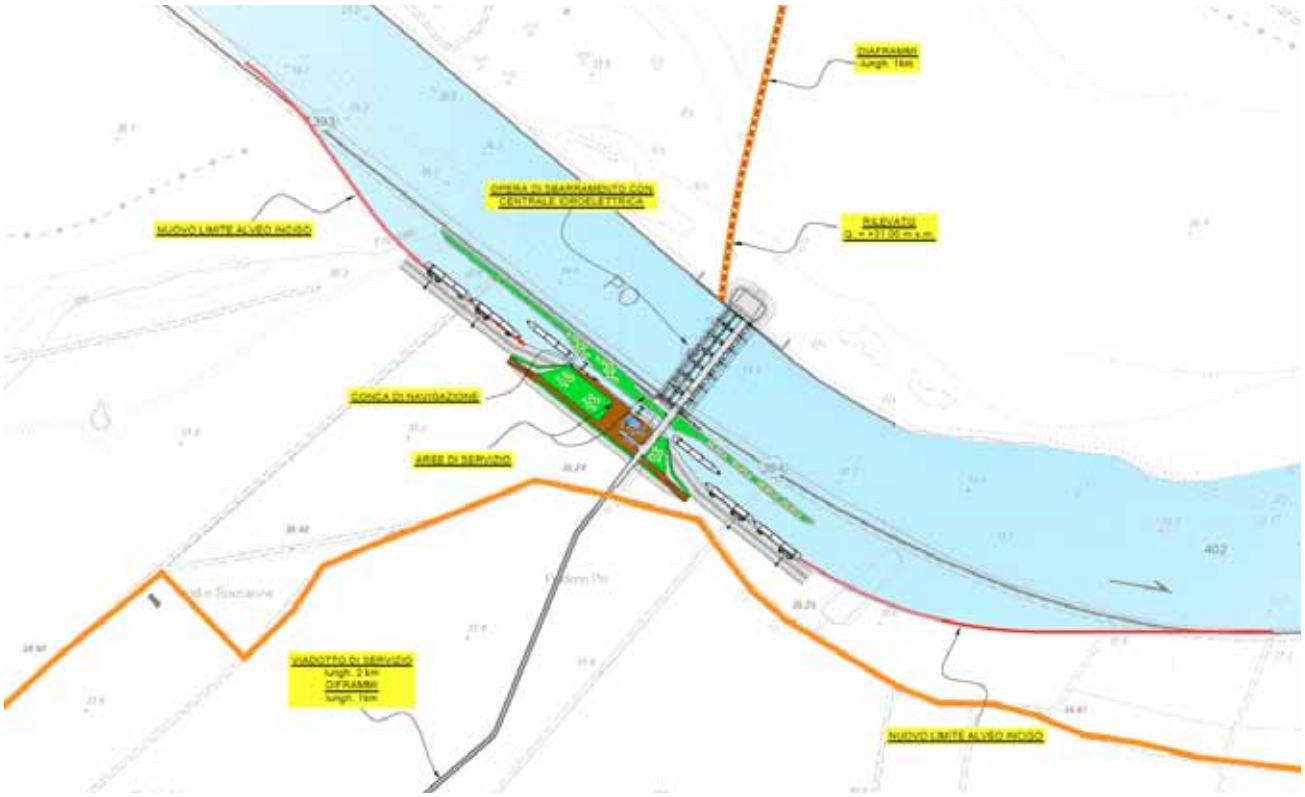
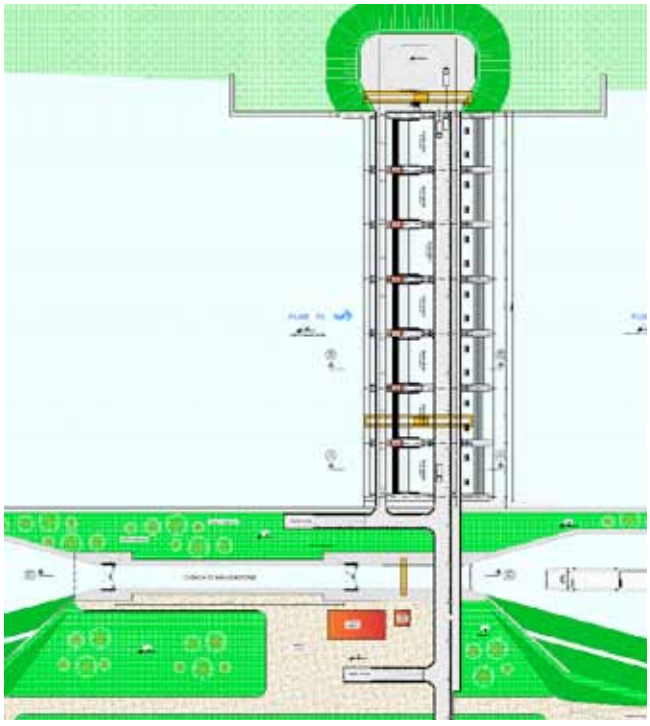
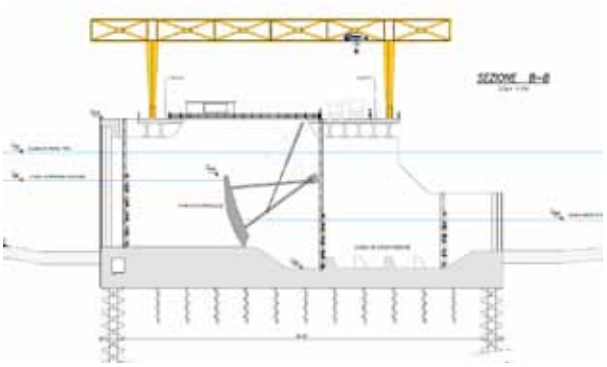


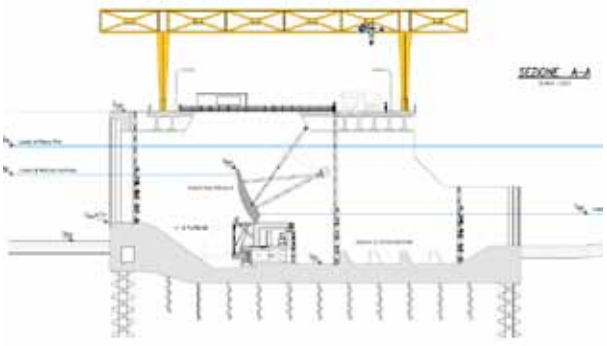


Figura 165 - Planimetrica generale della configurazione "ristretta" delle traverse senza centrale idroelettrica composta solo da sbarramento di regolazione - scala di risalita delle specie ittiche - conca di navigazione









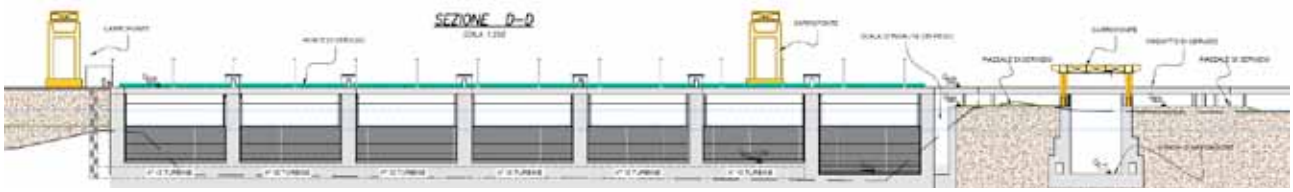


Figura 166 - Planimetrica generale della configurazione "ristretta" delle traverse con sbarramento comprendente la centrale idroelettrica inserita nelle luci - scala di risalita delle specie ittiche - conca di navigazione

Le opere relative alla scala di risalita delle specie ittiche e alla conca di navigazione, con i relativi mandracchi di monte e di valle, sono identiche in tutte e tre le configurazioni progettuali.

In particolare la conca (Figura 167) è dimensionata per il transito di navigli commerciali di Classe Va CEMT analoga a quella di nuova costruzione annessa allo sbarramento di Isola Serafini, con dimensioni di 120 m di lunghezza e 12,50 m di larghezza tra le porte vinciane di monte e di valle.

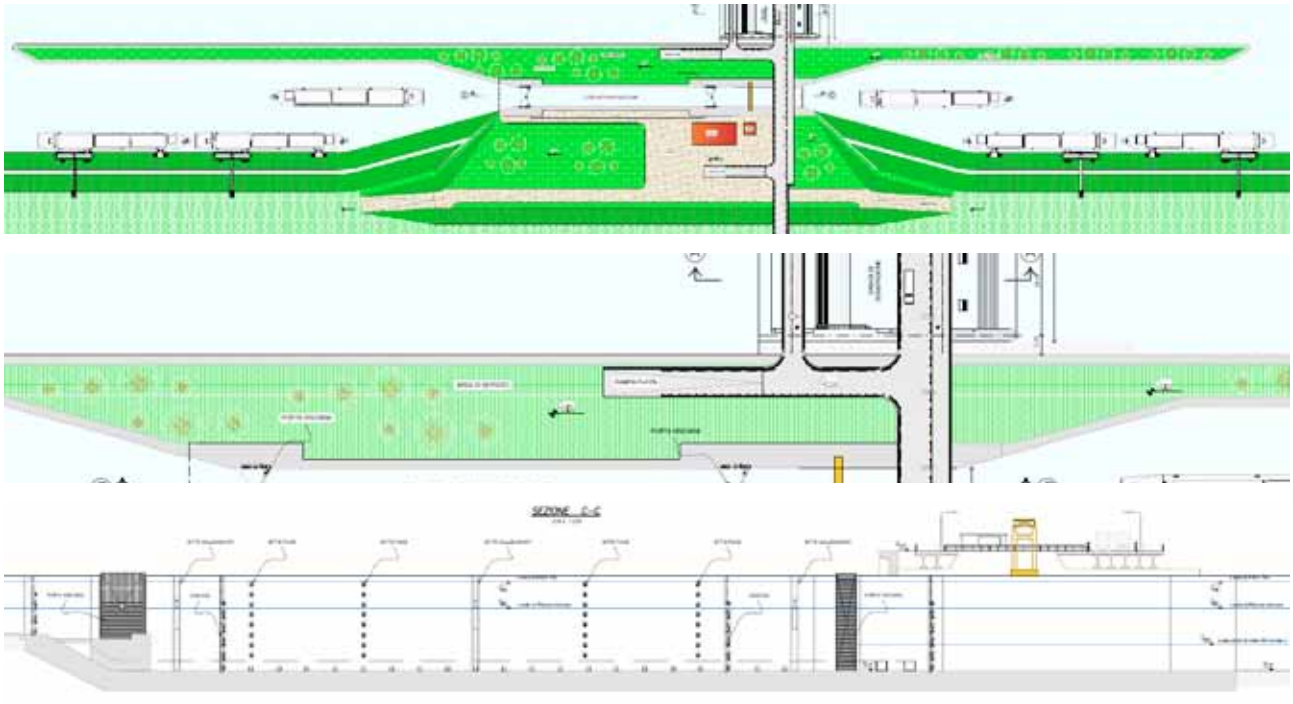


Figura 167 - Planimetria e sezioni tipo della conca di navigazione

Le larghezze dell'alveo inciso occupato dai 5 sbarramenti mobili, al netto delle ulteriori larghezze richieste da conca di navigazione, scala di risalita dell'ittiofauna e centrale idroelettrica di configurazione 1, sono riportate nella Tabella 15 insieme al numero delle luci e alle quote corrispondenti al livello di massima piena PAI, al livello idrico di regolazione, al livello idrico minimo di valle per portata di 380 m3/s (massima magra), alla soglia di fondo dello sbarramento.

Descrizione	Traversa 1	Traversa 2	Traversa 3	Traversa 4	Traversa 5
Quota di ritenuta (m s.m.)	30,0	24,2	19,0	14,2	7,5
Quota della piena PAI (m s.m.)	34,9	31,5	27,3	22,4	15,7
Quota di magra (Q=500 m3/s) (m s.m.)	24,8	19,7	14,7	9,2	2,6
Quota della soglia della traversa (m s.m.)	19,0	15,0	9,0	3,0	0
Quota della vasca di dissipazione (m s.m.)	15,2	11,2	5,2	-0,8	-3,8
Quota della sommità delle paratoie (m s.m.)	31,0	25,2	20,0	15,2	8,5
Quota del piazzale di servizio (m s.m.)	35,9	32,5	28,3	23,4	16,7
Quota di coronamento della traversa (m s.m.)	40,5	37,0	33,0	28,0	21,5
Lunghezza traversa (m)	203	260	203	260	345
N. luci	7	9	7	9	12
Quota della soglia della conca a monte (m s.m.)	26,0	20,0	15,0	10,0	3,5
Quota della soglia della conca a valle (m s.m.)	20,0	15,0	10,0	5,0	-1,5

Tabella 57 - Dati caratteristici degli sbarramenti mobili

Nella seguente Tabella 58 sono riportati per i 5 sbarramenti i valori degli incrementi di livello indotti

verso monte dalla regolazione, i valori cioè del salto idraulico, al variare della portata fino a 1'200 m^3/s.

	Traversa 1	Traversa 2	Traversa 3	Traversa 4	Traversa 5
Portata (m3/s)	Salto (m)	Salto (m)	Salto (m)	Salto (m)	Salto (m)
380	5,4	4,7	4,3	5,1	5,1
500	5,2	4,5	4,2	5,0	5,0
750	4,7	3,9	3,8	4,3	4,3
1000	4,2	3,3	3,4	3,6	3,4
1200	3,7	2,9	3,1	3,1	2,8

Tabella 58 - Legame portata - salto degli sbarramenti

7.3.2 Stima della produzione energetica

Poiché all'aumentare della portata Q diminuisce il salto disponibile H, la potenza idroelettrica ritraibile dai gruppi turbina-alternatore, funzione del prodotto Q x H secondo la:

$P = 9{,}81\ \varphi\ Q\ H\ \gamma$ (kW)

varia con la portata presentando un massimo per valori intermedi di Q e H e valori progressivamente minori per portate sia crescenti oltre tale massimo, per effetto del decremento di H, sia per portate decrescenti al disotto di tale massimo, per effetto della riduzione di Q.

Ad esempio, considerando la traversa 1 e tenendo conto del legame portata-salto nella sezione della traversa e della curva di durata media annua della portata a Cremona, si ottiene la curva di durata media annua della potenza mostrata dalla Figura 168 seguente. Il calcolo è stato effettuato considerando un rendimento globale dei gruppi turbina-alternatore pari a 0,85. Come si vede la potenza presenta un massimo per una portata di circa 2'000 m3/s corrispondente alla durata di circa 40 giorni/anno.

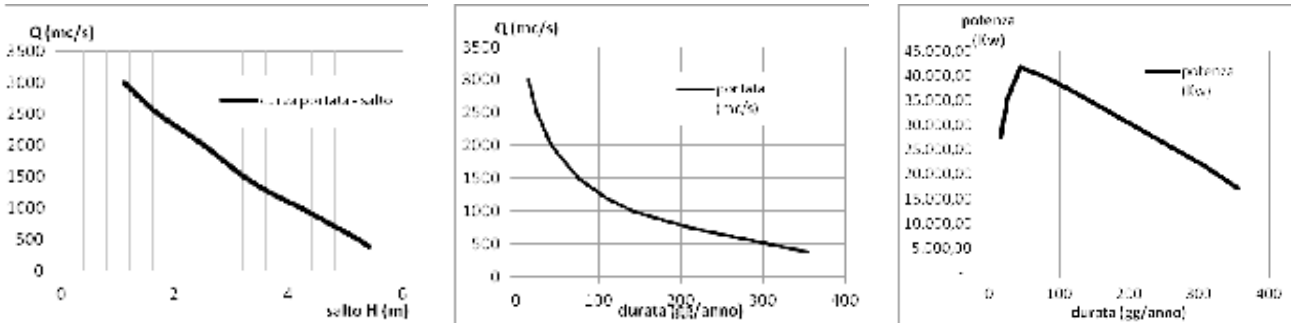


Figura 168 - Traversa 1. Curva portata-salto e curve di durata della portata e della potenza teoricamente ritraibile

L'area sottesa dalla curva di durata della potenza rappresenta ovviamente l'energia media annua teoricamente ritraibile dalla traversa qualora il campo di funzionamento dei gruppi turbina-alternatore riuscisse a coprire tutto l'intervallo di valori di portata e di salto. Ma poiché, come prima esposto, la portata compatibile con le esigenze sedimentologiche del fiume è limitata a 1'200 m^3/s, l'energia producibile è corrispondentemente limitata. Inoltre tale limite vale per la configurazione 1 "allargata", in cui le turbine sono in effetti compatibili con la portata di 1'200 m^3/s; mentre nella configurazione 3 "ristretta" il limite scende ulteriormente a 700 – 750 m^3/s a causa dei limiti della batteria di piccole turbine che contraddistingue questa configurazione.

Conseguentemente sono necessariamente differenti le produzioni energetiche corrispondenti alle configurazioni 1 e 3, mentre nella configurazione 2 essa è del tutto assente.

7.3.2.1 Produzione energetica nella configurazione 1 "allargata"

Come si rileva dalle tavole grafiche dell'Allegato 8 in questa configurazione la centrale idroelettrica è interposta tra lo sbarramento e la conca di navigazione ed è composta da 4 gruppi turbina a bulbo – alternatore atti al turbinaggio della portata fluviale fino a 1'200 m^3/s.

Produzione energetica Traversa 1 a Roccabianca

In base alla curva di durata della portata media annua dell'idrometro di Cremona ed al legame portata – salto disponibile in corrispondenza della traversa 1, si hanno i dati energetici riportati nella seguente Tabella 59 e nella Figura 169.

Durata (gg/a)	Q PO (mc/s)	H (m)	η	Q turb (mc/s)	P (Kw)	E (Kwh)	ΣE (Gwh)
355	380	5,4	0,85	380	17.110,6		
308	500	5,2	0,85	500	21.680,1	21.877.956	21,9
212	750	4,7	0,85	750	29.393,2	58.836.456	80,7
142	1000	4,2	0,85	1000	35.021,7	54.108.527	134,8
110	1200	3,75	0,85	1200	37.523,2	27.857.261	162,7

Tabella 59 - Traversa 1. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 1

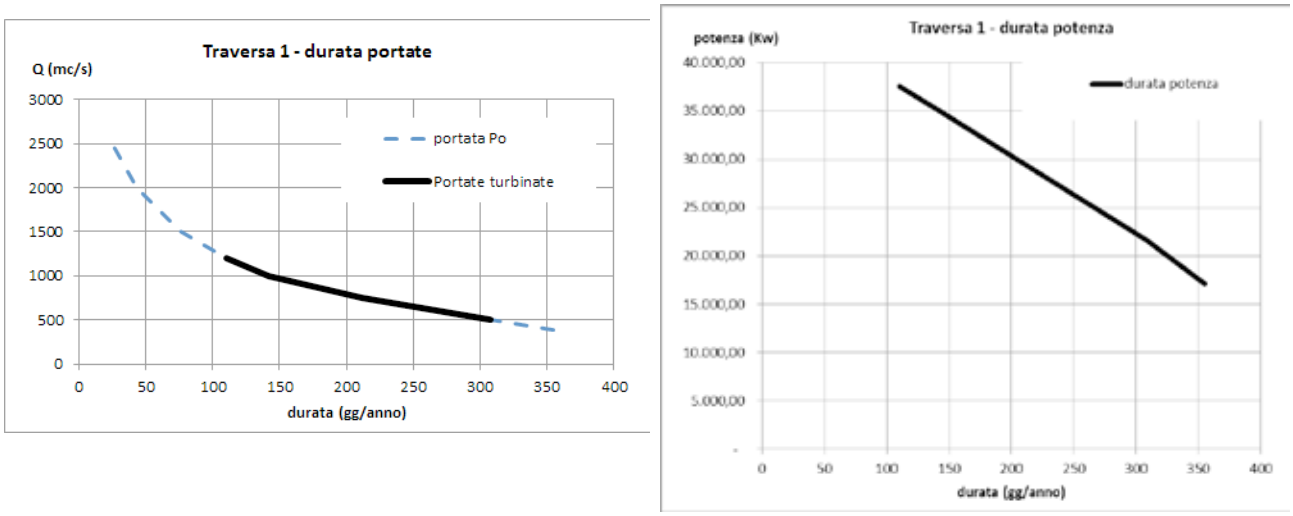


Figura 169 - Traversa 1. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 1

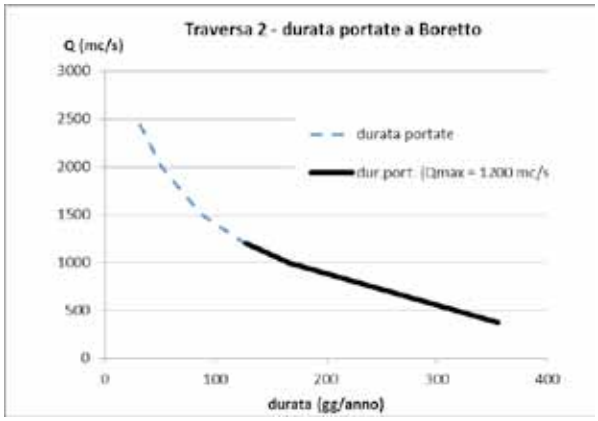
Pertanto con questa configurazione l'energia media annua complessivamente ritraibile dalla centrale annessa alla Traversa 1 è pari a 162,7 GWh/anno.

Produzione energetica Traversa 2 a Mezzano Rondani

In base alla curva di durata della portata media annua dell'idrometro di Boretto ed al legame portata – salto disponibile in corrispondenza della traversa 2, si hanno i dati energetici riportati nella seguente Tabella 60 e nella Figura 170.

Durata (gg/a)	Q PO (mc/s)	H (m)	η	Q turb (mc/s)	P (Kw)	E (Kwh)	ΣE (Gwh)
355	375	4,7	0,85	375	14.696,61		
318	500	4,5	0,85	500	18.761,63	14.855.455	14,9
241	750	3,9	0,85	750	24.390,11	39.872.205	54,7
166	1000	3,3	0,85	1000	27.517,05	46.716.446	101,4
127	1200	2,9	0,85	1200	29.017,98	26.458.394	127,9

Tabella 60 - Traversa 2. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 1



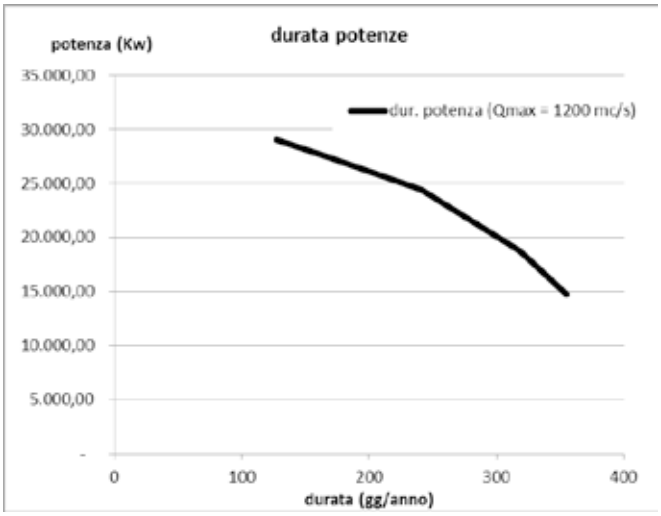


Figura 170 - Traversa 2. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 1

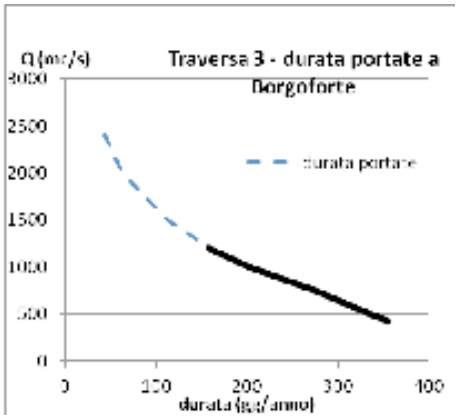
Pertanto con questa configurazione l'energia media annua complessivamente ritraibile dalla centrale annessa alla Traversa 2 è pari a 127,9 GWh/anno.

Produzione energetica Traversa 3 a Cizzolo

In base alla curva di durata della portata media annua dell'idrometro di Borgoforte ed al legame portata – salto disponibile in corrispondenza della traversa 3, si hanno i dati energetici riportati nella seguente Tabella 61 e nella Figura 171.

Durata (gg/a)	Q PO (mc/s)	H (m)	η	Q turb (mc/s)	P (Kw)	E (Kwh)	ΣE (Gwh)
355	421	4,3	0,85	421	15.095,19		
336	500	4,2	0,85	500	17.510,85	7.434.176	7,4
274	750	3,85	0,85	750	24.077,42	30.941.672	38,4
202	1000	3,4	0,85	1000	28.350,90	45.298.067	83,7
158	1200	3,1	0,85	1200	31.019,22	31.347.423	115,0

Tabella 61 - Traversa 3. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 1



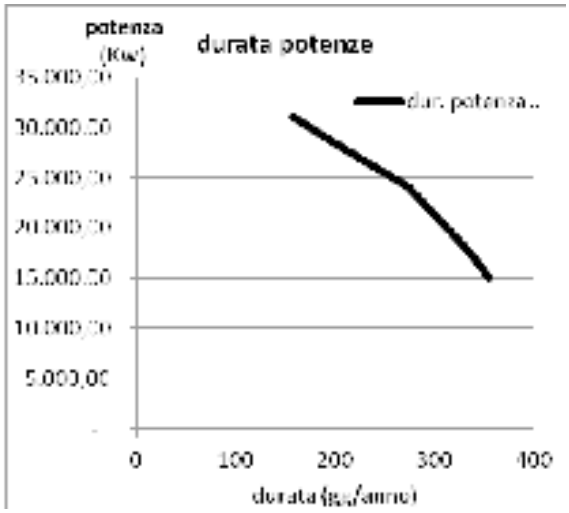


Figura 171 - Traversa 3. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 1

Pertanto con questa configurazione l'energia media annua complessivamente ritraibile dalla centrale annessa alla Traversa 3 è pari a 115,0 GWh/anno.

Produzione energetica Traversa 4 a Quingentole

In base alla curva di durata della portata media annua dell'idrometro di Ficarolo ed al legame portata – salto disponibile in corrispondenza della traversa 4, si hanno i dati energetici riportati nella seguente Tabella 62 e nella Figura 172.

Durata (gg/a)	Q PO (mc/s)	H (m)	η	Q turb (mc/s)	P (Kw)	E (Kwh)	ΣE (Gwh)
355	486	5,1	0,85	486	20.667,81		
352	500	5,0	0,85	500	20.846,25	1.494.506	1,5
291	750	4,3	0,85	750	26.578,97	34.715.260	36,2
226	1000	3,6	0,85	1000	30.018,60	44.146.104	80,4
176	1200	3,1	0,85	1200	31.019,22	36.622.692	117,0

Tabella 62 - Traversa 4. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 1

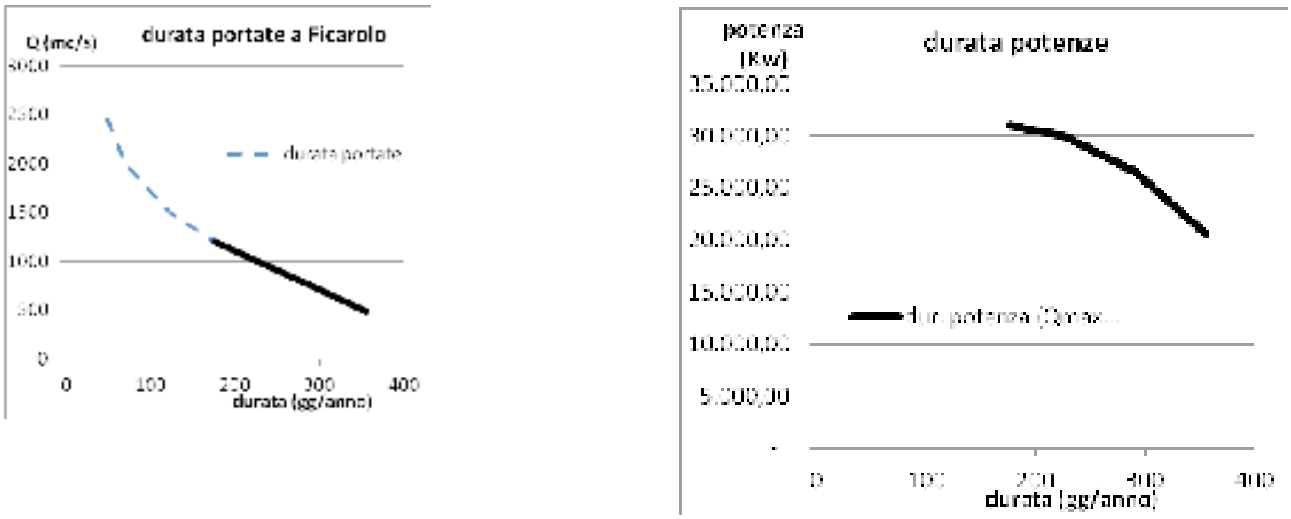


Figura 172 - Traversa 4. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 1

Pertanto con questa configurazione l'energia media annua complessivamente ritraibile dalla centrale annessa alla Traversa 4 è pari a 117,0 GWh/anno.

Produzione energetica Traversa 5 a Stienta

In base alla curva di durata della portata media annua dell'idrometro di Pontelagoscuro ed al legame portata – salto disponibile in corrispondenza della traversa 5, si hanno i dati energetici riportati nella seguente Tabella 63 e nella Figura 173.

Durata (gg/a)	Q PO (mc/s)	H (m)	η	Q turb (mc/s)	P (Kw)	E (Kwh)	ΣE (Gwh)
355	500	5,00	0,85	500	20.846,25		0,0
303	750	4,30	0,85	750	26.891,66	29.788.457	29,8
234	1000	3,40	0,85	1000	28.350,90	45.740.842	75,5
180	1200	2,85	0,85	1200	28.517,67	36.850.833	112,4

Tabella 63 - Traversa 5. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 1

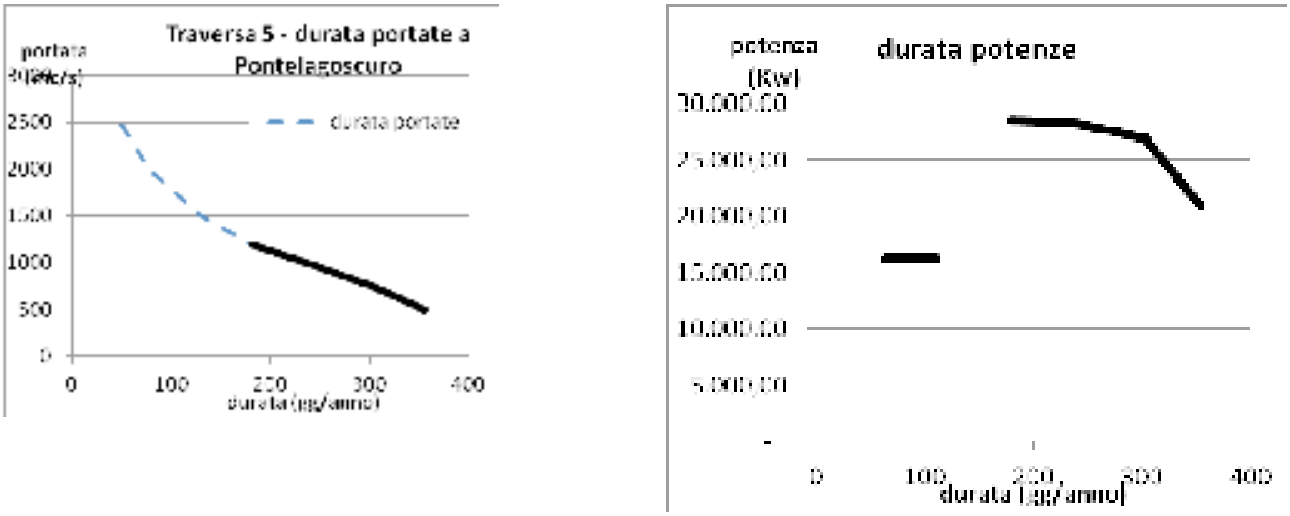


Figura 173 - Traversa 5. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 1

Pertanto con questa configurazione l'energia media annua complessivamente ritraibile dalla centrale annessa alla Traversa 5 è pari a 112,4 GWh/anno.

Produzione energetica complessiva delle cinque traverse

Sintetizzando i dati energetici prima esposti la produzione energetica media annua complessivamente ritraibile dai cinque sbarramenti è pari a 635 GWh/anno come risulta dalla seguente Tabella 64 riepilogativa.

Traversa	Energia media annua (GWh/anno)
Traversa 1 a Roccabianca	162,7
Traversa 2 a Mezzano Rondani	127,9
Traversa 3 a Cizzano	115,0
Traversa 4 a Quingentole	117,0
Traversa 5 a Stienta	112,4
Totale	635,0

Tabella 64 - Produzione energetica delle cinque traverse – configurazione 1

7.3.2.2 Produzione energetica nella configurazione 2 "ristretta" priva di centrale idroelettrica

Questa configurazione è priva di centrale idroelettrica e pertanto la produzione energetica è nulla.

7.3.2.3 Produzione energetica nella configurazione 3 "ristretta" con centrale idroelettrica inserita nelle luci dello sbarramento

Come si rileva dalle tavole grafiche dell'Allegato 8 in questa configurazione la centrale idroelettrica è inserita nelle luci dello sbarramento ed è composta, seguendo una delle proposte innovative dell'industria del settore, da 60 gruppi turbina a bulbo – alternatore atti al turbinaggio della portata fluviale fino a 750 m^3/s.

Produzione energetica Traversa 1 a Roccabianca

In base alla curva di durata della portata media annua dell'idrometro di Cremona ed al legame portata – salto disponibile in corrispondenza della traversa 1, si hanno i dati energetici riportati nella seguente Tabella 65 e nella Figura 174.

Durata (gg/a)	Q PO (mc/s)	H (m)	η	Q turb (mc/s)	P (Kw)	E (Kwh)	ΣE (Gwh)	Qteor (mc/s)	Pteor (Kw)	Eteor (Kwh)	ΣEteor (Gwh)
355	380	5,4	0,85	380	17.110,60			380	17.110,60		
308	500	5,2	0,85	500	21.680,10	21.877.956	21,9	500	21.680,10	21.877.956	21,9
212	750	4,7	0,85	750	29.393,21	58.836.456	80,7	750	29.393,21	58.836.456	80,7
142	1000	4,2	0,85	750	26.266,28	46.753.970	127,5	1000	35.021,70	54.108.527	134,8
110	1200	3,75	0,85	750	23.452,03	19.091.830	146,6	1200	37.523,25	27.857.261	162,7

Tabella 65 - Traversa 1. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 3

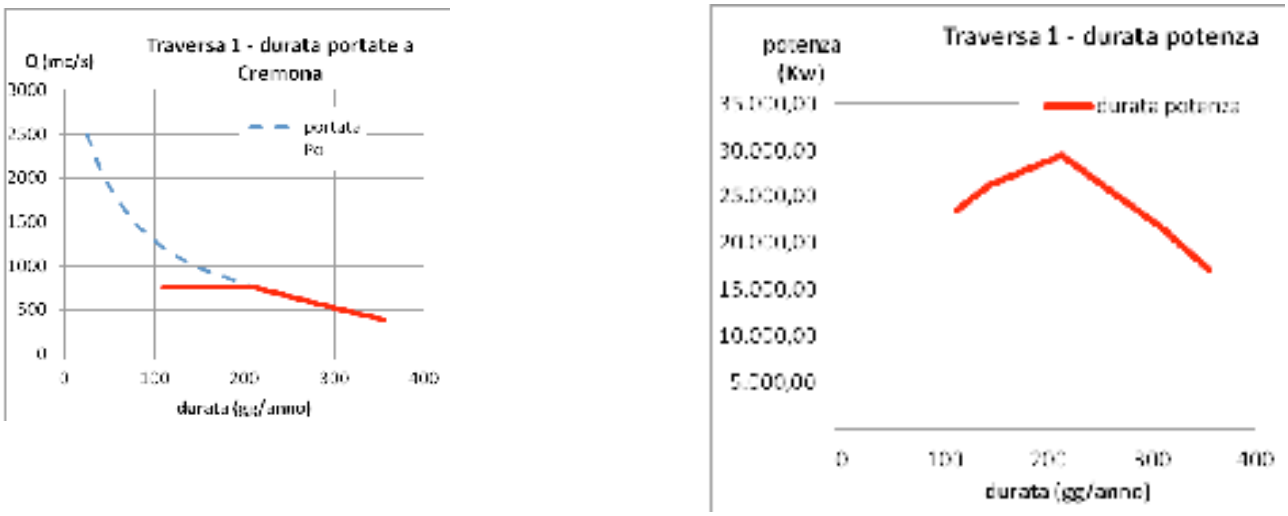


Figura 174 - Traversa 1. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 3

Pertanto con questa configurazione l'energia media annua complessivamente ritraibile dalla centrale annessa alla Traversa 1 è pari a 146,6 GWh/anno.

Produzione energetica Traversa 2 a Mezzano Rondani

In base alla curva di durata della portata media annua dell'idrometro di Cremona ed al legame portata – salto disponibile in corrispondenza della traversa 2, si hanno i dati energetici riportati nella seguente Tabella 66 e nella Figura 175.

Durata (gg/a)	Q PO (mc/s)	H (m)	η	Q turb (mc/s)	P (Kw)	E (Kwh)	ΣE (Gwh)	Qteor (mc/s)	Pteor (Kw)	Eteor (Kwh)	ΣEteor (Gwh)
355	375	4,7	0,85	375	14.696,61			375	14.696,61		
318	500	4,5	0,85	500	18.761,63	14.855.455	14,9	500	18.761,63	14.855.455	14,9
241	750	3,9	0,85	750	24.390,11	39.872.205	54,7	750	24.390,11	39.872.205	54,7
166	1000	3,3	0,85	750	20.637,79	40.525.110	95,3	1000	27.517,05	46.716.446	101,4
127	1200	2,9	0,85	750	18.136,24	18.146.244	146,6	1200	29.017,98	26.458.394	127,9

Tabella 66 - Traversa 2. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 3

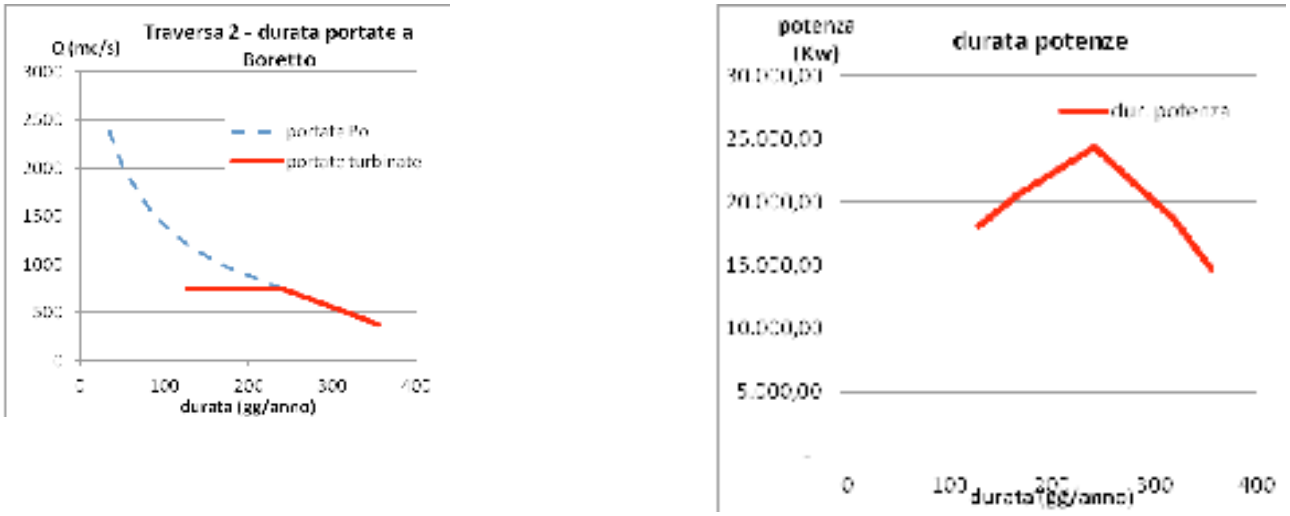


Figura 175 - Traversa 2. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 3

Pertanto con questa configurazione l'energia media annua complessivamente ritraibile dalla centrale annessa alla Traversa 2 è pari a 113,4 GWh/anno.

Produzione energetica Traversa 3 a Cizzolo

In base alla curva di durata della portata media annua dell'idrometro di Cremona ed al legame portata – salto disponibile in corrispondenza della traversa 3, si hanno i dati energetici riportati nella seguente Tabella 67 e nella Figura 175.

Durata (gg/a)	Q PO (mc/s)	H (m)	η	Q turb (mc/s)	P (Kw)	E (Kwh)	ΣE (Gwh)	Qteor (mc/s)	Pteor (Kw)	Eteor (Kwh)	ΣEteor (Gwh)
355	421	4,3	0,85	421	15.095,19			421	15.095,19		
336	500	4,2	0,85	500	17.510,85	7.434.176	7,4	500	17.510,85	7.434.176	7,4
274	750	3,85	0,85	750	24.077,42	30.941.672	38,4	750	24.077,42	30.941.672	38,4
202	1000	3,4	0,85	750	21.263,18	39.174.273	77,6	1000	28.350,90	45.298.067	83,7
158	1200	3,1	0,85	750	19.387,01	21.463.299	99,0	1200	31.019,22	31.347.423	115,0

Tabella 67 - Traversa 3. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 3

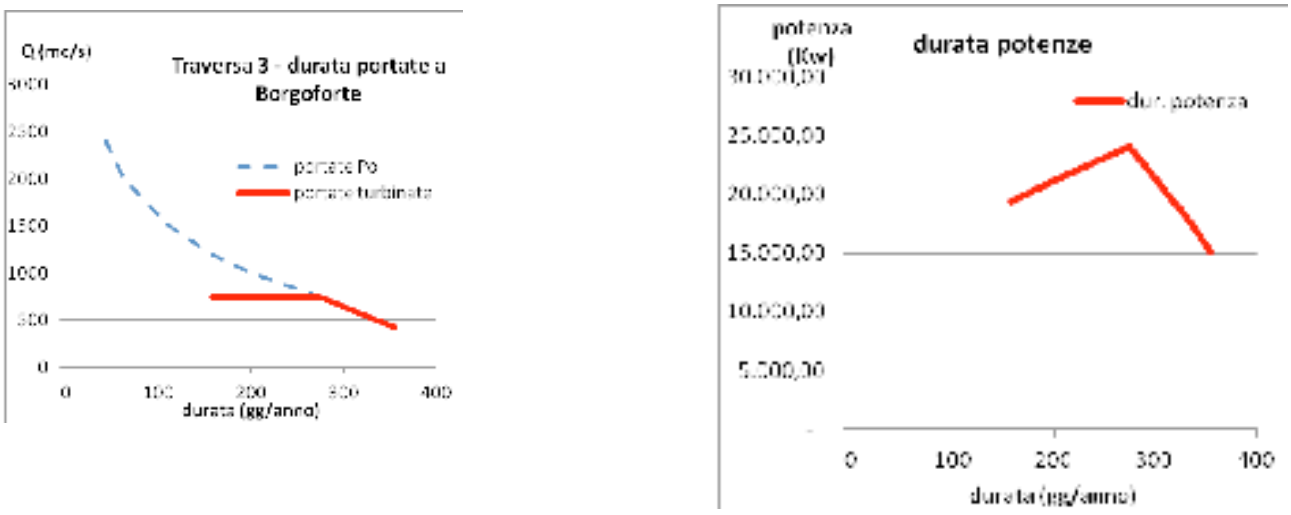


Figura 176 - Traversa 3. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 3

Pertanto con questa configurazione l'energia media annua complessivamente ritraibile dalla centrale annessa alla Traversa 3 è pari a 99,0 GWh/anno.

Produzione energetica Traversa 4 a Quingentole

In base alla curva di durata della portata media annua dell'idrometro di Cremona ed al legame portata – salto disponibile in corrispondenza della traversa 4, si hanno i dati energetici riportati nella seguente Tabella 68 e nella Figura 177.

Durata (gg/a)	Q PO (mc/s)	H (m)	η	Q turb (mc/s)	P (Kw)	E (Kwh)	ΣE (Gwh)	Qteor (mc/s)	Pteor (Kw)	Eteor (Kwh)	ΣEteor (Gwh)
355	486	5,1	0,85	486	20.667,81			486	20.667,81		
352	500	5,0	0,85	500	20.846,25	1.494.506	1,5	500	20.846,25	1.494.506	1,5
291	750	4,3	0,85	750	26.578,97	34.715.260	36,2	750	26.578,97	34.715.260	36,2
226	1000	3,6	0,85	750	22.513,95	38.292.477	74,5	1000	30.018,60	44.146.104	80,4
176	1200	3,1	0,85	750	19.387,01	25.140.578	99,6	1200	31.019,22	36.622.692	117,0

Tabella 68 - Traversa 4. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 3

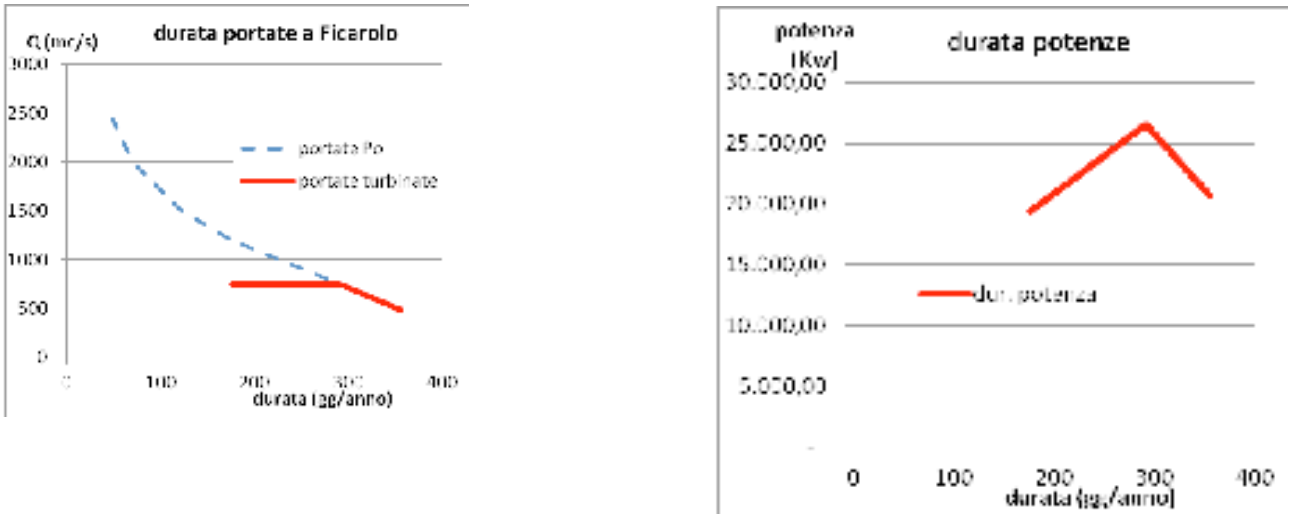


Figura 177 - Traversa 4. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 3

Pertanto con questa configurazione l'energia media annua complessivamente ritraibile dalla centrale annessa alla Traversa 4 è pari a 99,6 GWh/anno.

Produzione energetica Traversa 5 a Stienta

In base alla curva di durata della portata media annua dell'idrometro di Cremona ed al legame portata – salto disponibile in corrispondenza della traversa 5, si hanno i dati energetici riportati nella seguente Tabella 69 e nella Figura 178.

Durata (gg/a)	Q PO (mc/s)	H (m)	η	Q turb (mc/s)	P (Kw)	E (Kwh)	ΣE (Gwh)	Qteor (mc/s)	Pteor (Kw)	Eteor (Kwh)	ΣEteor (Gwh)
355	500	5,00	0,85	500	20.846,25		0,0	500	20.846,25		0,0
303	750	4,30	0,85	750	26.891,66	29.788.457	29,8	750	26.891,66	29.788.457	29,8
234	1000	3,40	0,85	750	21.263,18	39.872.205	69,7	1000	28.350,90	45.740.842	75,5
180	1200	2,85	0,85	750	17.823,54	25.328.194	95,0	1200	28.517,67	36.850.833	112,4
176	1200	3,1	0,85	750	19.387,01	25.140.578	99,6	1200	31.019,22	36.622.692	117,0

Tabella 69 - Traversa 5. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 3

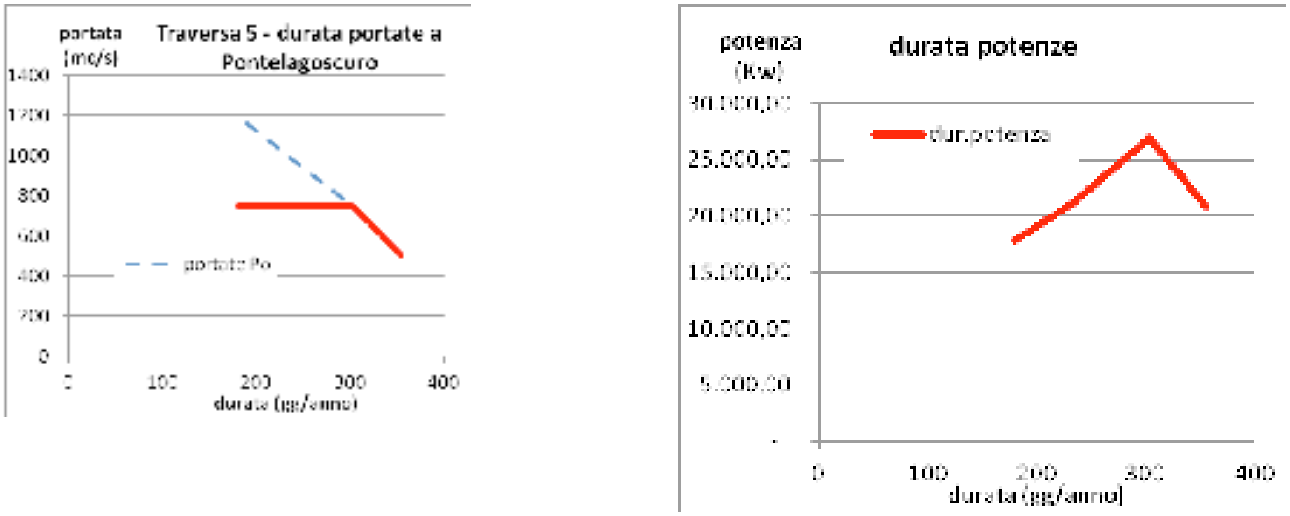


Figura 178 - Traversa 5. Dati energetici di esercizio relativi alla configurazione progettuale 3

Pertanto con questa configurazione l'energia media annua complessivamente ritraibile dalla centrale annessa alla Traversa 5 è pari a 95,0 GWh/anno.

Produzione energetica complessiva delle cinque traverse

Sintetizzando i dati energetici prima esposti la produzione energetica media annua complessivamente ritraibile dai cinque sbarramenti, limitata per effetto della portata limite turbinabile di 750 m3/s, è pari a circa 550 GWh/anno come risulta dalla seguente Tabella 70 riepilogativa.

Traversa	Energia media annua (GWh/anno)
Traversa 1 a Roccabianca	146,6
Traversa 2 a Mezzano Rondani	113,4
Traversa 3 a Cizzano	99,0
Traversa 4 a Quingentole	99,6
Traversa 5 a Stienta	95,0
Totale	553,6

Tabella 70 - Produzione energetica delle cinque traverse – configurazione 3

7.3.3 Opere provvisionali e fasi di cantiere

La rilevante complessità delle opere di regimazione ha implicato uno studio dell'ingegneria di massima delle opere provvisionali e delle fasi di cantiere, allo scopo di individuare soluzioni fattibili all'interno sia dell'alveo permanentemente attivo del Po sia in golena per una durata complessiva di alcuni anni e quindi con la probabilità di dover anche fronteggiare eventi di piena anche rilevante.

7.3.3.1 Ipotesi e criteri generali

Si prende in esame la configurazione 1 "allargata". Tale configurazione, infatti, risulta la più gravosa ai fini del dimensionamento delle opere a servizio della costruzione dei manufatti in alveo di magra o in prossimità di esso.

Ai fini delle valutazioni di massima esposte nel seguito, si considera la Traversa n. 1 avente i seguenti dati salienti:

- quota media del piano campagna golenale circa 32 m s.m.
- quota media fondo alveo circa 19 m s.m.

- quota piena di progetto per calcolo opere provvisionali 33 m s.m.
- stratigrafia di calcolo: formazioni alluvionali a prevalente frazione granulare da poco a mediamente addensate.

L'idea principale per la realizzazione di aree di cantiere asciutte in alveo consiste nel ricorrere a palancole metalliche quali opere provvisionali, che possono essere rimosse al termine della costruzione.

In questo modo è possibile minimizzare, al completamento delle opere (traversa e centrale), l'occupazione del sub-alveo. Si prevede inoltre di poter suddividere la costruzione in fasi successive in modo tale da consentire il deflusso, in ogni fase e lavorazione, attraverso una sufficiente larghezza dell'alveo inciso del fiume, così da non dover ricorrere ad importanti opere di deviazione provvisoria.

Alla luce delle notevoli condizioni di carico dovute ai cospicui battenti idraulici, specie nelle fasi di lavoro più prolungate, è necessario l'utilizzo delle opere di seguito descritte.

Al perimetro di ogni area di cantiere, si prevedono speciali palancole dette COMBI-WALL, costituite da tubi in acciaio intervallati da palancole a Z aventi la sola funzione di impermeabilizzazione dello scavo. A seconda dell'altezza massima di scavo, si prevedranno diverse configurazioni di parete.

Alla base è necessario prevedere un tampone di fondo in calcestruzzo armato realizzato con getto sommerso prima di prosciugare l'area di cantiere, stabilizzato per mezzo di pali agenti come tiranti, Tali pali sono gli stessi elementi che verranno poi utilizzati per stabilizzare e/o fungere da fondazione alle opere civili definitive.

Gli stessi pali, in una prima fase, assolvono anche al compito di sostegno di un impalcato di lavoro alla sommità del palancolato, impalcato che ha l'ulteriore compito di puntone per le palancole. Queste ultime, nelle condizioni di lavoro più impegnative, corrispondenti a quelle più prolungate quando all'interno del palancolato si procederà alla costruzione dei manufatti definitivi, saranno vincolate in sommità ai puntoni metallici e alla base allo stesso tampone di fondo.

Le lavorazioni descritte nel seguito riguardano la realizzazione di un manufatto continuo comprendente, (da sponda orografica destra):

- scala risalita ittio-fauna;
- corpo centrale tradizionale (larghezza circa 75 m);
- traversa (circa 200 m);

per una larghezza complessiva di circa 280 m.

La conca di navigazione è pensata come un manufatto indipendente realizzato a parte (con tecnologia simile).

Le tavole grafiche inclusa nell'Allegato 8 riportano le caratteristiche principali della soluzione studiata e della successione delle fasi realizzative.

7.3.3.2 Realizzazione centrale e traversa

FASE 0

Parziale allargamento del fondo alveo a quota +19.00 circa nell'area corrispondente alla centrale: tale fase si rende necessaria per poter creare condizioni di lavoro tollerabili per il palancolato di questa prima area di cantiere, rimuovendo la quota-parte delle spinte (efficaci) del terreno al di sopra della quota di fondo alveo. Tutto ciò alla luce delle massime resistenze oggi disponibili per tipologia di parete del genere.

FASE 1 (costruzione centrale)

Si prevedono le seguenti fasi:

- macrofase A

1. operando da pontone, infissione avampozzi (tubi in acciaio) dei pali all'interno del futuro palancolato con la funzione iniziale di sostegno del successivo impalcato metallico sommitale;
2. sempre operando da pontone, infissione del palancolato perimetrale: alla luce di calcoli di massima è necessario prevedere una doppia cortina di pali ø2540/sp25 a passo 4 m, per un'altezza complessiva di 50 m. La tenuta idraulica è assicurata dall'interposizione di classiche palancole a Z, collegate ai pali portanti per mezzo di idonee giunzioni scorrevoli;
3. montaggio carpenteria metallica superiore (appoggiata alla sommità degli avampozzi) e connessa alla doppia cortina di pali perimetrali, tramite opportune travi di ripartizione. Si realizzerà, quindi, un impalcato di lavoro con orditura metallica secondaria e piastre in calcestruzzo armato rimovibili e movimentabili a seconda delle esigenze di cantiere, per la movimentazione dei macchinari per la realizzazione dei pali;
4. realizzazione di pali (trivellati) operando da impalcato di lavoro sommitale con mezzi usuali. Le gabbie di armatura dovranno sporgere, rispetto alla quota di estradosso del tampone, ossia dell'intradosso della platea del manufatto definitivo, di un tratto pari alla lunghezza di ancoraggio richiesta dal progettista di tali opere. Il getto del calcestruzzo, all'interno dell'avampozzo, dovrà eccedere la quota testa palo finale di una lunghezza idonea (almeno 1 m).

Dopo tale fase e prima delle successive, dovranno essere effettuati i controlli di integrità previsti dal capitolato e le prove di carico secondo le richieste di legge. Quindi:

- macrofase B

1. dragaggio nell'area racchiusa dalle palancole, a q.ta intradosso tampone;
2. getto sommerso tampone (calcestruzzo R25 o sup.,eventualmente armato se necessario dai calcoli);
3. dewatering;
4. impermeabilizzazione punti di ingresso residui ed eventuale rinforzo connessione palo/tampone per condizioni a lungo termine; installazione sistemi di dewatering permanente per evacuazione infiltrazioni residue.

Si osserva che, al termine di questa fase, la stabilità del tampone di fondo, in presenza di severe condizioni idrauliche comportanti notevoli sottospinte non bilanciabili dal solo peso del tampone, è assicurata dalla resistenza per aderenza tra i pali e il tampone stesso nonché dalla resistenza a trazione dei pali stessi, agenti come tiranti. Al fine di garantire il maggior grado di sicurezza possibile, la permanenza dell'opera in questa fase dovrà essere della durata più limitata possibile: la pianificazione delle fasi dovrà essere concepita in modo tale che tale configurazione corrisponda ad un periodo di magra del fiume.

Proseguendo:

- macrofase C

1. preparazione teste pali, ossia taglio della quota parte di avampozzo emergente da estradosso tampone, scapitozzatura e regolarizzazione barre d'armatura emergenti dai pali, eventuale integrazione con monconi aggiuntivi, ove richiesto. Prima del taglio dei pali (che sostengono il sistema di puntonatura in testa, l'impalcato di lavoro dovrà essere smontato; inoltre, in punti opportuni, dovranno essere installati idonei puntelli per sostenere, in maniera alternativa, il sistema di puntoni incrociati (sostenuto ogni 12 m in ogni direzione). Tali puntelli dovranno impostarsi sull'estradosso del tampone di fondo e rimanere in opera fino a quando il sistema di puntoni sommitale non sarà più necessario;
2. getto solettone di fondo centrale, comprendente una prima parte di fondazione della traversa, da cui emergeranno le riprese di armatura. Tali riprese saranno eventualmente rivestite e protette in un getto di calcestruzzo plastico al fine di essere salvaguardate in vista delle successive lavorazioni in adiacenza;
3. installazione turbine e costruzione (parziale, come previsto in funzione delle convenienze di

cantiere) delle opere in elevazione manufatto;

4. messa in opera eventuale controfodera per palancolato successivo;
5. rimozione palancole ed eventuale rinfianco, sul lato verso la sponda, del terreno precedentemente dragato (previa verifica di stabilità del manufatto nei riguardi dello scorrimento);
6. passaggio a fase successiva.

FASE 2 (costruzione primo tratto di traversa)

La traversa è concepita in adiacenza e in continuità strutturale con il manufatto di centrale. Si prevedono quindi le seguenti fasi:

- macrofase A

1. dopo avere parzialmente rimosso le palancole relative all'area di lavoro precedente, sempre operando da pontone, si procederà all'infissione degli avampozzi (tubi in acciaio) dei pali all'interno del futuro nuovo palancolato;
2. sempre operando da pontone, infissione palancolato: secondo calcoli di massima, in ragione del fatto che la traversa comporta altezze di scavo decisamente più contenute, è necessario prevedere una semplice cortina di pali ø2540/sp25 a passo 4 m, per un'altezza complessiva di 40 m. La tenuta idraulica è realizzata come nel caso precedente. Si osserva che, in questo caso, il palancolato riguarda tre soli lati, mentre il quarto lato è determinato dalla presenza del manufatto precedentemente realizzato (eventualmente reso impermeabile da murate provvisionali, se necessario);
3. montaggio carpenteria metallica superiore (appoggiata su avampozzi) e connessa a pali perimetrali;
4. realizzazione pali (trivellati) operando da impalcato di lavoro sommitale con mezzi usuali, come per la fase precedente;

Quindi:

- macrofase B

1. dragaggio a quota sotto-tampone, esponendo quindi la faccia laterale del precedente tampone;
2. getto sommerso nuova porzione di tampone;
3. dewatering;
4. impermeabilizzazione punti di ingresso residui ed eventuale rinforzo connessione palo/tampone per condizioni a lungo termine. In particolare si dovrà prevedere il ricorso ad eventuali suture con iniezioni di malte speciali in pressione per suturare la connessione tra vecchio e nuovo tampone.

Anche in questo caso, si dovrà operare in regime di magra.

- macrofase C

1. preparazione teste pali, come in precedenza, pulizia ed eventuale integrazione degli spezzoni di ripresa emergenti dalla porzione di fondazione già realizzata, previa installazione di puntelli provvisori come descritto in relazione alla fase 1;
2. getto solettone di fondo quota-parte traversa;
3. costruzione pile;
4. messa in opera controfodera di tenuta per palancolato successivo, con eventuale installazione di carpenteria metallica con funzione di sbadacchio/tirante per stabilizzare tale murata provvisoria;
5. rimozione palancole e controfodera sul lato opposto a quello dove dovrà essere aggiunto il successivo tratto di traversa;
6. passaggio a fase successiva.

FASE 3 e successive (progressivo completamento delle traversa)

Sono ovviamente da prevedersi le medesime lavorazioni sopra descritte. La suddivisione delle fase tra due successive parti di traversa è da realizzarsi in modo tale che l'interruzione ricada in prossimità di una pila, realizzando tuttavia una parte di platea munita di spezzoni di sovrapposizione per le armature, da raccordare con le armature del tratto successivo. Si dovrà operare con gli accorgimenti sopra descritti, o con tecniche equivalenti, al fine di garantire la continuità strutturale delle armature della fondazione.

Il cantiere per la costruzione della centrale richiede la realizzazione di una superficie rettangolare avente dimensioni interne pari a circa 90x105 m

Per le traverse, si prevedono porzioni comprendenti la costruzione di due pile (saranno in questo caso necessarie quattro fasi, con palancolati aventi dimensioni interne pari a circa 50x66 m.

Pur adottando la medesima tecnica, si potranno, in sede esecutiva, studiare differenti fasi, ove si decidesse di operare, simultaneamente con due cantieri separati: soluzione da valutare con attenzione alla luce del risparmio di tempo ma, allo stesso tempo, con significativi aggravi in termini di materiali per i palancolati.

Un'alternativa alla soluzione qui studiata potrà essere rappresentata dall'utilizzo di una diversa tecnologia per i pali di fondazione.

7.3.4 Costi di costruzione e costi di gestione

Tenendo conto del livello di larga massima delle stime inerenti le opere di regimazione di cui trattasi, la valutazione dei costi di costruzione e di gestione è stata condotta sulla base di elementi di costo di tipo parametrico dedotti da opere similari.

Inoltre si è ritenuto opportuno basare la valutazione di riferimento sui costi relativi alla configurazione 1 "allargata", indubbiamente più gravosa per il maggior rilievo sia delle opere civili che di quelle connesse alla centrale idroelettrica. Quest'ultima infatti oltre ad essere dotata di gruppi turbina-alternatore compatibili con la portata massima di 1'200 m3/s, impone anche una soluzione costruttiva più onerosa per l'ingombro e la rilevante profondità complessiva delle opere di centrale.

I costi della configurazione 2 sono poi stati valutati sottraendo dai costi della configurazione 1 quelli relativi alla centrale idroelettrica, essendo questa assente in tale configurazione.

Ed anche i costi della configurazione 3 sono stati valutati sulla base dei costi della configurazione 1, considerando come costi di centrale la metà di quelli corrispondenti della configurazione 1 avendo presente sia il minore rilievo delle opere civili sia la minore potenza istallata essendo la centrale commisurata ad una portata limite di 750 m^3/s.

7.3.4.1 Costi di costruzione

Le seguenti Tabelle riassumono tutti i costi di costruzione delle tre configurazioni.

Il costo della configurazione 1 "allargata" risulta pari a 3'240 M€, di cui 2'282 M€ per le opere e 958 M€ per spese generali dell'Amministrazione. Sommando a tale costo anche quello di 150 M€ delle opere a sistemazione libera del tratto a valle della traversa 5 fino al Po di Goro, come risultante dalle analisi descritte nel Cap. 5, il costo complessivo di costruzione di questa soluzione è pari a 3'390 M€.

Il costo della configurazione 2 "ristretta" senza centrale, valutata eliminando dai costi della configurazione 1 quelli relativi alla centrale, risulta pari a 2'033 M€, di cui 1'432 M€ per le opere e 601 M€ per spese generali dell'Amministrazione. Sommando a tale costo anche quello di 150 M€ delle opere a sistemazione libera del tratto a valle della traversa 5 fino al Po di Goro, come risultante dalle analisi descritte nel Cap. 5, il costo complessivo di costruzione di questa soluzione è pari a 2'183 M€.

Il costo della configurazione 3 "ristretta" con centrale inserita nelle luci dello sbarramento risulta pari a 2'731 M€, di cui 1'923 M€ per le opere e 808 M€ per spese generali dell'Amministrazione. Sommando a tale costo anche quello di 150 M€ delle opere a sistemazione libera del tratto a valle della traversa 5 fino al Po di Goro, come risultante dalle analisi descritte nel Cap. 5, il costo complessivo di costruzione di questa soluzione è pari a 2'881 M€.

STIMA ECONOMICA IPOTESI REGIMAZIONE + CENTRALI CONFIGURAZIONE 1										
		Sbarramento n.1		Sbarramento n.2		Sbarramento n.3		Sbarramento n.4		Sbarramento n.5	
		Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali
		€ x 1.000.000		€ x 1.000.000		€ x 1.000.000		€ x 1.000.000		€ x 1.000.000	
1	**Cantiere**		145		169		153		161		209
1.1	Cantiere traversa	80		104		88		96		144	
1.2	Cantiere conca	15		15		15		15		15	
1.3	Cantiere centrale	50		50		50		50		50	
2	**Traversa**		82		101		82		92		117
2.1	Opere civili	49		63		49		56		84	
2.2	Opere elettromeccaniche	18		23		18		21		31	
2.3	Diaframmi	15		15		15		15		2	
3	**Conca navigazione e scala pesci**		58		58		58		58		58
3.1	Opere civili	17		17		17		17		17	
3.2	Opere elettromeccaniche	6		6		6		6		6	
3.3	Mandracchi	34		34		34		34		34	
3.4	Scala risalita pesci	1		1		1		1		1	
4	**Viadotto**		30		12		30		5		5
5	**Centrale**		120		120		120		120		120
5.1	Opere civili	40		40		40		40		40	
5.2	Opere elettromeccaniche	80		80		80		80		80	
6	***Totale opere***		**435**		**460**		**443**		**435**		**508**
7	**Costi addizionali**		**183**		**193**		**186**		**183**		**214**
7.1	Imprevisti (5% di 6)	22		23		22		22		25	
7.2	Espropri. indennizzi (5% di 6)	22		23		22		22		25	
7.3	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 6)	44		46		44		44		51	
7.4	IVA (22% di 6)	96		101		97		96		112	
	Costo totale (6+7)		618		653		629		618		722

TOTALE REGIMAZIONE (sbarramento 1 + sbarramento 2 + sbarramento 3 + sbarramento 4 + sbarramento 5 + 5 centrali idroelettriche)	3'240
OPERE DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA (tratto a valle dello sbarramento 5 e sistemazione curve in erosione tra sbarramento 4 e 5)	150
TOTALE FINANZIAMENTO PER REGIMAZIONE	**3'390**

Tabella 71 - Configurazione 1 "allargata". Costi di costruzione degli sbarramenti

STIMA ECONOMICA IPOTESI REGIMAZIONE								
		Sbarramento n.1		Sbarramento n.2		Sbarramento n.3		Sbarrame
		Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali
		€ x 1.000.000		€ x 1.000.000		€ x 1.000.000		€ x 1.00
1	**Cantiere**		95		119		103	
1.1	Cantiere traversa	80		104		88		96
1.2	Cantiere conca	15		15		15		15
2	**Traversa**		82		101		82	
2.1	Opere civili	49		63		49		56
2.2	Opere elettromeccaniche	18		23		18		21
2.3	Diaframmi	15		15		15		15
3	**Conca navigazione e scala pesci**		58		58		58	
3.1	Opere civili	17		17		17		17
3.2	Opere elettromeccaniche	6		6		6		6
3.3	Mandracchi	34		34		34		34
3.4	Scala risalita pesci	1		1		1		1
4	**Viadotto**		30		12		30	
5	***Totale opere***		**265**		**290**		**273**	
6	**Costi addizionali**		**111**		**122**		**115**	
6.1	Imprevisti (5% di 5)	13		15		14		13
6.2	Espropri. indennizzi (5% di 5)	13		15		14		13
6.3	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 5)	27		29		27		27
6.4	IVA (22% di 5)	58		64		60		58
	Costo totale (5+6)		376		412		388	

TOTALE REGIMAZIONE (sbarramento 1 + sbarramento 2 + sbarramento 3 + sbarramento 4 + sbarramer
OPERE DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA (tratto a valle dello sbarramento 5 e sistemazione curv erosione tra sbarramento 4 e 5)
TOTALE FINANZIAMENTO PER REGIMAZIONE

Tabella 72 - Configurazione 2 "ristretta". Costi di costruzione degli sbarramenti

STIMA ECONOMICA IPOTESI REGIMAZIONE + CENTRALI CONFIGURAZIONE 3										
		Sbarramento n.1		Sbarramento n.2		Sbarramento n.3		Sbarramento n.4		Sbarramento n.5	
		Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali
		€ x 1.000.000		€ x 1.000.000		€ x 1.000.000		€ x 1.000.000		€ x 1.000.000	
1	**Cantiere**		112		136		122		129		177
1.1	Cantiere traversa	80		104		88		96		144	
1.2	Cantiere conca	15		15		15		15		15	
1.3	Cantiere centrale	17		17		19		18		18	
2	**Traversa**		82		101		82		92		117
2.1	Opere civili	49		63		49		56		84	
2.2	Opere elettromeccaniche	18		23		18		21		31	
2.3	Diaframmi	15		15		15		15		2	
3	**Conca navigazione e scala pesci**		58		58		58		58		58
3.1	Opere civili	17		17		17		17		17	
3.2	Opere elettromeccaniche	6		6		6		6		6	
3.3	Mandracchi	34		34		34		34		34	
3.4	Scala risalita pesci	1		1		1		1		1	
4	**Viadotto**		30		12		30		5		5
5	**Centrale**		81		81		81		81		81
5.1	Opere civili	11		11		11		11		11	
5.2	Opere elettromeccaniche	70		70		70		70		70	
6	**Totale opere**		**363**		**388**		**372**		**364**		**437**
7	**Costi addizionali**		**152**		**163**		**156**		**153**		**183**
7.1	Imprevisti (5% di 6)	18		19		19		18		22	
7.2	Espropri, indennizzi (5% di 6)	18		19		19		18		22	
7.3	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 6)	36		39		37		36		44	
7.4	IVA (22% di 6)	80		85		82		80		96	
	Costo totale (6+7)		**515**		**551**		**529**		**516**		**620**

TOTALE REGIMAZIONE (sbarramento 1 + sbarramento 2 + sbarramento 3 + sbarramento 4 + sbarramento 5 + 5 centrali idroelettriche)	2731
OPERE DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA (tratto a valle dello sbarramento 5 e sistemazione curve in erosione tra sbarramento 4 e 5)	150
TOTALE FINANZIAMENTO PER REGIMAZIONE	**2881**

Tabella 73 - Configurazione 3 "ristretta" con centrale in traversa. Costi di costruzione degli sbarramenti

7.3.4.2 Costi di gestione

I costi annui di gestione (intesi come somma dei costi di manutenzione ordinaria e straordinaria) sono stati valutati con le seguenti percentuali dei costi di costruzione delle opere soggette a manutenzione (escludendo quindi i costi delle opere provvisionali di cantiere e dei diaframmi di fondazione):

manutenzione ordinaria opere civili	0,2 % costi di costruzione
manutenzione ordinaria opere elettromeccaniche	0,6 % costi di costruzione
manutenzione straordinaria	0,6 % costi di costruzione

Le seguenti Tabelle riassumono tutti i costi di gestione delle tre configurazioni, risultanti pari rispettivamente a 18,1 M€/anno, 11,7 M€/anno, 16,4 M€/anno.

ONERI PRESUNTI DI GESTIONE E MANUTENZIONE IPOTESI REGIMAZIONE + CENTRALI CONFIGURAZIONE 1								
		Sbarramento n. 1	Sbarramento n. 2	Sbarramento n. 3	Sbarramento n. 4	Sbarramento n. 5	Corrente libera nel tronco di valle	TOTALE
		€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	
	Totale opere civili	171'000	167'000	171'000	153'000	181'000	100'000	943'000
	Totale opere elettromeccaniche	104'000	109'000	104'000	107'000	117'000	-	541'000
	TOTALE OPERE	**275'000**	**276'000**	**275'000**	**260'000**	**298'000**	**100'000**	**1'484'000**
GESTIONE								
1.a	**Gestione dell'idrovia (sorveglianza, segnaletica, sicurezza, dragaggi ed erosioni localizzate)**	-	-	-	-	-	-	1'500
1.b	**Gestione conche e sbarramenti**	500	500	500	500	500	-	2'500
		500	**500**	**500**	**500**	**500**		**4'000**
MANUTENZIONE ORDINARIA								
2	**Oneri annui presunti di manutenzione ordinaria**	**966**	**988**	**966**	**948**	**1'064**	**400**	**5'332**
MANUTENZIONE STRAORDINARIA								
3	**Oneri annui presunti di manutenzione straordinaria**	**1'650**	**1'656**	**1'650**	**1'560**	**1'788**	**500**	**8'804**
Onere annuo presunto gestione e manutenzione (1+2+3)		**3'116**	**3'144**	**3'116**	**3'008**	**3'352**	**900**	**18'136**
Totale onere annuo presunto gestione e manutenzione (€ x 1000)							**18'136**	

Tabella 74 - Configurazione 1 "allargata". Costi annui di manutenzione degli sbarramenti

ONERI PRESUNTI DI GESTIONE E MANUTENZIONE IPOTESI REGIMAZIONE								
		Sbarramento n. 1	Sbarramento n. 2	Sbarramento n. 3	Sbarramento n. 4	Sbarramento n. 5	Corrente libera nel tronco di valle	TOTALE
		€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	
	Totale opere civili	131'000	127'000	131'000	113'000	141'000	100'000	743'000
	Totale opere elettromeccaniche	24'000	29'000	24'000	27'000	37'000	-	141'000
	TOTALE OPERE	**155'000**	**156'000**	**155'000**	**140'000**	**178'000**	**100'000**	**884'000**
GESTIONE								
1.a	**Gestione dell'idrovia (sorveglianza, segnaletica, sicurezza, dragaggi ed erosioni localizzate)**	-	-	-	-	-	-	1'500
1.b	**Gestione conche e sbarramenti**	500	500	500	500	500	-	2'500
		500	**500**	**500**	**500**	**500**		**4'000**
MANUTENZIONE ORDINARIA								
2	**Oneri annui presunti di manutenzione ordinaria**	**406**	**428**	**406**	**388**	**504**	**400**	**2'532**
MANUTENZIONE STRAORDINARIA								
3	**Oneri annui presunti di manutenzione straordinaria**	**930**	**936**	**930**	**840**	**1'068**	**500**	**5'204**
Onere annuo presunto gestione e manutenzione (1+2+3)		**1'836**	**1'864**	**1'836**	**1'728**	**2'072**	**900**	**11'736**
Totale onere annuo presunto gestione e manutenzione (€ x 1000)							**11'736**	

Tabella 75 - Configurazione 2 "ristretta". Costi annui di manutenzione degli sbarramenti

ONERI PRESUNTI DI GESTIONE E MANUTENZIONE IPOTESI REGIMAZIONE + CENTRALI CONFIGURAZIONE 3								
		Sbarramento n. 1	Sbarramento n. 2	Sbarramento n. 3	Sbarramento n. 4	Sbarramento n. 5	Corrente libera nel tronco di valle	TOTALE
		€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	€ x 1000	
	Totale opere civili	142'000	138'000	142'000	124'000	152'000	100'000	798'000
	Totale opere elettromeccaniche	94'000	99'000	94'000	97'000	107'000	-	491'000
	TOTALE OPERE	**236'000**	**237'000**	**236'000**	**221'000**	**259'000**	**100'000**	**1'289'000**
GESTIONE								
1.a	**Gestione dell'idrovia (sorveglianza, segnaletica, sicurezza, dragaggi ed erosioni localizzate)**	-	-	-	-	-	-	1'500
1.b	**Gestione conche e sbarramenti**	500	500	500	500	500	-	2'500
		500	**500**	**500**	**500**	**500**		**4'000**
MANUTENZIONE ORDINARIA								
2	**Oneri annui presunti di manutenzione ordinaria**	**848**	**870**	**848**	**830**	**946**	**400**	**4'742**
MANUTENZIONE STRAORDINARIA								
3	**Oneri annui presunti di manutenzione straordinaria**	**1'416**	**1'422**	**1'416**	**1'326**	**1'554**	**500**	**7'634**
Onere annuo presunto gestione e manutenzione (1+2+3)		**2'764**	**2'792**	**2'764**	**2'656**	**3'000**	**900**	**16'376**
	Totale onere annuo presunto gestione e manutenzione (€ x 1000)						**16'376**	

Tabella 76 - Configurazione 3 "ristretta" con centrale in traversa. Costi annui di manutenzione degli sbarramenti

7.4 RENDER E FOTOINSERIMENTI DELLE TRAVERSE DI SOSTEGNO

La realizzazione degli sbarramenti fluviali per il sostegno dei livelli idrici del fiume comporta l'inserimento nell'ambito dell'alveo principale del fiume di opere sicuramente molto rilevanti dal punto di vista ambientale, paesaggistico, morfologico ed idraulico.

La valutazione degli aspetti più strettamente paesaggistico-ambientali e di inserimento delle opere nel contesto fluviale in cui si dovrebbero collocare, può essere agevolato dalla realizzazione di immagini di tipo fotorealistico con la simulazione, su foto reali, delle parti architettoniche dei manufatti modellati tridimensionalmente e renderizzati mediante software appositi.

La realizzazione di render fotorealistici e il montaggio di viste virtuali con cui vengono simulate le visuali e gli impatti che un'opera può determinare sul contesto circostante, risultano oggi uno strumento fondamentale per la progettazione e per la verifica dell'inserimento del progetto nell'ambiente circostante permettendo di valutarne gli effetti da vari punti di vista e secondo differenti angolazioni.

Il contesto fluviale, particolarmente delicato, e la dimensione delle opere oggetto del presente studio, rendono tale metodologia assolutamente fondamentale per valutare gli aspetti più strettamente paesaggistici, i rapporti dimensionali, gli ingombri e le caratteristiche architettoniche delle opere.

A tal fine si è proceduto a realizzare una serie di riprese fotografiche aeree in alta definizione mediante drone telecomandato, sui siti individuati per il collocamento dei primi due sbarramenti di monte in corrispondenza approssimativamente di Roccabianca, il primo, e Casalmaggiore, il secondo, su cui successivamente sono stati realizzati i fotomontaggi con l'inserimento delle traverse.

La simulazione delle traverse è passata attraverso una modellazione tridimensionale delle strutture che compongo l'insieme delle opere realizzata mediante software appositi. Nel caso specifico gli sbarramenti sono stati modellati attraverso il software Archicad della Graphisoft, BIM per la modellazione architettonica tridimensionale, con il quale sono stati realizzati i modelli in 3D delle

traverse nella configurazione senza centrali e di tutte le parti che ne compongono l'insieme come la conca di navigazione, i ponti di servizio, la cabina di comando, i piazzali, il viadotto di accesso e i raccordi ai terreni esistenti.

L'elaborazione mediante software per la modellazione tridimensionale permette di valutare al meglio l'inserimento di eventuali accorgimenti architettonici che possano apportare, per quanto possibile, elementi di pregio e di valorizzazione delle strutture, pur in un ambito strettamente tecnologico e strutturale quale una traversa fluviale, in grado di valorizzare e caratterizzare gli elementi in vista rendendoli meno impattanti e più gradevoli a chi osserva da lontano i manufatti che compongono la traversa.

Da questo punto di vista la renderizzazione degli sbarramenti è stata utilizzata anche per sperimentare nuove forme architettoniche per elementi tradizionalmente estremamente rigidi e massicci quali gli sbarramenti fluviali di queste dimensioni e le opere idrauliche in genere.

Si è cercato quindi di immaginare nuovi disegni e nuovi assetti che potessero aiutare a migliorare l'impatto estremamente materico delle opere caratterizzandole secondo forme più curve, uniformi e filanti nella ricerca di un disegno organico che integri i vari elementi che compongo gli sbarramenti.

Il ricorso a materiali e rivestimenti non tradizionali per questo tipo di opere quali l'acciaio, il corten, ed anche il vetro per gli edifici tecnici, permette di migliorare gli aspetti architettonici anche senza stravolgere le parti strutturali, ma anzi valorizzandole e arricchendole di elementi di pregio che meglio ne possano mitigare gli impatti, migliorandone l'inserimento nell'ambiente circostante.

Un'attenzione particolare dovrà essere posta anche alla cura e alla sistemazione delle aree circostanti lo sbarramento vero e proprio con l'inserimento delle strutture in un ambiente, quello delle golene del fiume, caratterizzato da aspetti naturalistici ed ambientali di grande pregio e notevole valenza.

La riproposizione dei filari e delle macchie boscate tipiche di queste aree realizzate ad integrazione delle opere più strettamente legate agli sbarramenti, può diventare l'occasione per riqualificare e aumentare l'offerta di percorsi naturalistici che vadano a completare la sistemazione delle aree limitrofe alle opere.

Nell'allegato 12 dello studio sono raccolti i render e i fotoinserimenti relativi alle prime due traverse, realizzati secondo diversi punti di vista, ottenuti a partire dai modelli tridimensionali degli sbarramenti opportunamente renderizzati e successivamente inseriti sulle riprese fotografiche dal vero.

Il primo tipo di immagini permette di cogliere i dettagli della modellazione, dei materiali e delle scelte architettoniche effettuate, il secondo invece aiuta a visualizzare e a rappresentare l'opera nel contesto sulla base delle immagini reali appositamente realizzate allo scopo.

La renderizzazione dei modelli è stata effettuata con il software Artlantis della Abvent mentre il successivo inserimento sulle foto reali è stato effettuato con gli usuali programmi di fotoritocco.

Per la prima traversa, in corrispondenza di Roccabianca, sono stati realizzati quattro fotoinserimenti e due immagini renderizzate.

I fotoinserimenti rappresentano tre viste da valle ed una da monte, mentre i render rappresentano due riprese da monte con punti di vista rispettivamente dal centro fiume e dal lato campagna.

Per la seconda traversa, quella localizzata poco a valle di Casalmaggiore, sono stati realizzati tre fotoinserimenti e due immagini renderizzate.

In questo caso i fotoinserimenti rappresentano una vista da valle e due viste da monte di cui una presa lateralmente al fiume, mentre i render rappresentano due simulazioni viste da valle.

Di seguito si riportano alcune immagini estratte dai render e dai fotomontaggi relative ai due sbarramento esplicative dei risultati ottenuti attraverso tale metodologia di lavoro.



Figura 179 - Render e fotoinserimenti dello sbarramento n. 1 di Roccabianca



Figura 180 - Render e fotoinserimenti dello sbarramento n. 1 di Roccabianca



Figura 181 - Render e fotoinserimenti dello sbarramento n. 1 di Roccabianca



Figura 182 - Render e fotoinserimenti dello sbarramento n. 1 di Roccabianca



Figura 183 - Render e fotoinserimenti dello sbarramento n. 2 di di Casalmaggiore



Figura 184 - Render e fotoinserimenti dello sbarramento n. 2 di di Casalmaggiore



Figura 185 - Render e fotoinserimenti dello sbarramento n. 2 di di Casalmaggiore



Figura 186 - Render e fotoinserimenti dello sbarramento n. 2 di di Casalmaggiore



Figura 187 - Render e fotoinserimenti dello sbarramento n. 2 di di Casalmaggiore

7.5 IL PROGETTO DI REGIMAZIONE DEL FIUME PO IN RAPPORTO AI REQUISITI DI SICUREZZA IDRAULICA

La normativa di riferimento (PAI e relative Norme di Attuazione e Direttive) richiede che qualsiasi opera non riduca le aree e i volumi d'esondazione e non produca influenze dannose nel comportamento idraulico della corrente a monte e a valle, in termini di livelli idrici e di caratteristiche del campo di moto.

Sulla base di tale impostazione, per ognuna delle prima esposte alternative progettuali delle 5 opere di regimazione sono state effettuate dettagliate ricostruzioni bidimensionali delle corrispondenti configurazioni dei campi di moto al fine di individuare la migliore soluzione in termini di minor impatto nei confronti del deflusso di piena.

In particolare, considerando le tre soluzioni progettuali precedentemente descritte (traversa senza centrale idroelettrica, con centrale idroelettrica posta lateralmente allo sbarramento, con centrale idroelettrica posta nello stesso sbarramento) la verifica modellistica qui descritta è stata condotta, con criterio cautelativo, inserendo nel modello la configurazione più interferente con il deflusso della piena, cioè con la centrale idroelettrica posta lateralmente allo sbarramento. Ciò allo scopo di verificare l'entità degli eventuali incrementi dei livelli di piena indotti dalle opere più "ingombranti" tra tutte quelle analizzate.

Si è deciso di procedere mediante modellazioni a livelli crescenti di potenza di simulazione, sia utilizzando un modello bidimensionale a fondo fisso illustrato nel Cap. 5, qui di seguito presentato con la descrizione di tutti i risultati ottenuti, sia un modello bidimensionale a fondo mobile per il quale si rimanda al successivo par. 9.8. Solo con modellistiche di dettaglio di questo tipo, infatti, è possibile determinare, in ogni maglia del dominio di calcolo, le grandezze idrauliche caratteristiche (tirante idrico e vettore velocità) e quindi effettuare il richiesto confronto con i campi delle medesime grandezze allo stato attuale.

Rispetto agli undici tratti in cui è stata suddivisa l'intera modellazione bidimensionale del Po descritta nel Cap. 5 si sono inserite le opere di regimazione all'interno dei cinque tratti da esse interessati (da

monte a valle e con riferimento alla numerazione riportata nella Tabella 15, sono i tratti n. 2, 4, 6, 8, 10), ricostruendone le influenze locali come prima detto. E poiché nelle simulazioni della piena di riferimento PAI T200 tali influenze sono risultate comunque di entità molto ridotta, come esposto più oltre in dettaglio, è emerso che per tutte e cinque le traverse tali influenze non si ripercuotono mai verso monte fino a condizionare il dominio rispettivamente di monte. Pertanto per la verifica dei cinque tratti interessati dalle traverse si sono potute inserire le medesime condizioni al contorno come sopra definite tratto per tratto.

Per giungere alla corretta valutazione della compatibilità idraulica degli interventi di regimazione in progetto e definire la migliore configurazione delle opere, nonché le sistemazioni idrauliche delle stesse, lo studio modellistico è stato articolato analizzando le seguenti diverse configurazioni dell'alveo e delle opere:

- *Configurazione di "Progetto 2009"* (la sigla Pr2009 contraddistingue i risultati di tale configurazione): condizioni fisiche del corso d'acqua in presenza delle opere di regimazione come previste nel progetto 2009;
- *Configurazione di "Progetto 2015"* (la sigla Pr2015 contraddistingue i risultati di tale configurazione): condizioni fisiche del corso d'acqua in presenza delle opere di regimazione come previste nelle soluzioni alternative messe a punto nell'ambito del presente studio e precedentemente descritte.

Le differenti configurazioni delle opere di regimazione sono descritte nel rispettivo dominio di calcolo tenendo conto di:

- posizione relativa delle singole parti delle opere di regolazione: traversa, conca di navigazione, centrale idroelettrica, ecc;
- tipologia e configurazione delle opere fisse delle traverse: quote di imposta della soglia fissa, pilastri/pareti di sostegno degli organi mobili, ecc..

Per ciascuna delle suddette configurazioni delle opere è stato simulato lo scenario della piena di riferimento PAI di tempo di ritorno 200 anni (la sigla T200 contraddistingue i risultati di tale scenario).

In sintesi la seguente tabella riporta tutti i casi esaminati con i modelli dei cinque tratti interessati dalle traverse:

	Traversa n. 1	Traversa n. 2	Traversa n. 3	Traversa n. 4	Traversa n. 5
Casi esaminati	Pr2009-T200	Pr2009-T200	Pr2009-T200	Pr2009-T200	Pr2009-T200
	Pr2015-T200	Pr2015-T200	Pr2015-T200	Pr2015-Variante 1-T200	Pr2015-Variante 1-T200
				Pr2015-Variante 2-T200	Pr2015-Variante 2-T200

Tabella 77- Elenco degli scenari considerati

I risultati ottenuti consentono le seguenti determinazioni:

- confronto fra i livelli idrici dello scenario attuale con quelli di ogni soluzione progettuale, al fine di definire l'eventuale alterazione ed estensione indotta dalle opere in progetto sul profilo idrico della piena di riferimento PAI T200;
- definizione, con riferimento agli scenari di progetto, dei franchi di sicurezza rispetto alle quote di coronamento del sistema di protezione arginale;
- identificazione e quantificazione degli effetti dell'intervento in progetto sul corso d'acqua rispetto alle condizioni fisiche ed idrologiche precedenti alla realizzazione dello stesso.

Emerge quindi la piena idoneità del modello così tarato a simulare gli effetti indotti dalle opere di regimazione in tutti gli scenari progettuali prima descritti sul campo di moto del tratto di fiume Po analizzato. In particolare, risultano molto importanti i valori dei battenti idrici, per l'identificazione di eventuali rigurgiti indotti dalle nuove opere in progetto, e l'intensità dei vettori velocità per la definizione delle forze erosive sui manufatti in progetto presenti in alveo e sugli argini maestri.

Inoltre, il confronto tra i risultati ottenuti nelle varie configurazioni analizzate con i risultati riferiti alla

situazione indisturbata del fiume Po permette di definire il miglior scenario di progetto dal punto di vista idrodinamico.

Le cartografie riportate nell'Allegato 7 mostrano, sempre con riferimento alla piena di riferimento PAI T200, tutte le rappresentazioni del campo di moto ottenute dalle modellazioni, in termini di tiranti idrici, livelli idrici e velocità della corrente, oltre che delle variazioni dei livelli idrici indotte dalle opere in progetto in riferimento alle condizioni di regime indisturbato.

7.5.1 Risultati del modello 2D a fondo fisso per la Traversa n. 1

Rimandando all'Allegato 7 per i risultati dettagliati, qui di seguito, per una più agevole e sintetica comprensione, vengono presentati i confronti fra i risultati relativi all'assetto attuale e quelli relativi alle configurazioni di progetto (PR2009; PR2015) nel tratto di fiume Po in cui è prevista la realizzazione della traversa n.1 a Motta Baluffi (CR) – Roccabianca (PR), sia in termini di livello idrico che in termini di velocità della corrente. Dall'analisi di questi confronti e di tutti i risultati dettagliati riportati nell'Allegato 7 emerge quanto segue:

- l'opera prevista nel progetto 2009 induce un innalzamento del livello idrico a monte di circa 5 – 20 cm, con punte di 25 – 30 cm localizzate nell'intorno delle opere in alveo, che si esaurisce a circa 4 km dalla traversa, mentre l'opera prevista nel progetto 2015 induce un innalzamento del livello idrico di circa 5 cm in golena destra, con punte di 10 – 20 cm in prossimità della sponda destra dell'alveo, che si esaurisce praticamente in prossimità dell'opera stessa (500 m); il confronto tra le differenze di livello rispetto lo stato attuale indica che la traversa PR2009 induce un maggior innalzamento dei livelli idrici sia in termini assoluti che di estensione della perturbazione. Il franco di sicurezza minimo di 1 m rispetto alla quota degli argini maestri, già nella configurazione attuale, non risulta rispettato; in particolare, in sponda sinistra lungo il tratto compreso tra la sezione S33 e S28A il franco idrico di sicurezza rispetto la piena T200 anni è inferiore ad 1 m ed in alcuni casi (S30 e S30A) risulta essere negativo. L'innalzamento dei livelli idrici di piena indotto dalla configurazione PR2009 comporta un ulteriore riduzione del franco di sicurezza attuale soprattutto in sponda sinistra che, nel tratto compreso tra la sezione S30 e S32, risulta prossimo allo zero. Per quanto riguarda la configurazione 2015, il modesto innalzamento dei livelli idrici di piena verso monte e in golena destra non comporta un'apprezzabile diminuzione del franco idrico di sicurezza attuale.
- il campo delle velocità subisce variazioni localizzate in entrambi gli scenari di progetto esaminati. In particolare, nel caso dell'opera prevista nel progetto 2009 (PR2009), tale variazione consiste in un innalzamento della velocità idrica in prossimità della traversa di circa 0,5 - 1 m/s che si estende verso valle per circa 500 m nell'alveo principale e un aumento delle velocità lungo la curva in sponda destra dell'alveo principale con un incremento degli sforzi tangenziali di trascinamento; in prossimità della lanca posta in sponda destra a valle dell'opera si evidenzia una diminuzione delle velocità idriche e del flusso idrico nella lanca stessa, che indica una possibile riduzione dei fenomeni di attivazione della lanca anche per regimi ordinari, inoltre è evidente la formazione di un nuovo filone di corrente che rientra nell'alveo principale in sponda sinistra a valle della conca di navigazione che comporta un aumento delle sollecitazioni sulle opere della conca di navigazione. Invece, la configurazione PR2015 induce minori variazioni delle velocità idriche localizzate nell'intorno dell'opera rappresentate da un innalzamento delle velocità idriche di circa 0,3 - 0,6 m/s che si estendono nell'alveo principale verso valle per circa 400 m; in questo caso, il riposizionamento dell'opera verso monte (S30A) non altera l'equilibrio idrodinamico della lanca posta a valle in sponda destra e permette una riduzione delle velocità in prossimità dell'argine golenale posto in destra idraulica.

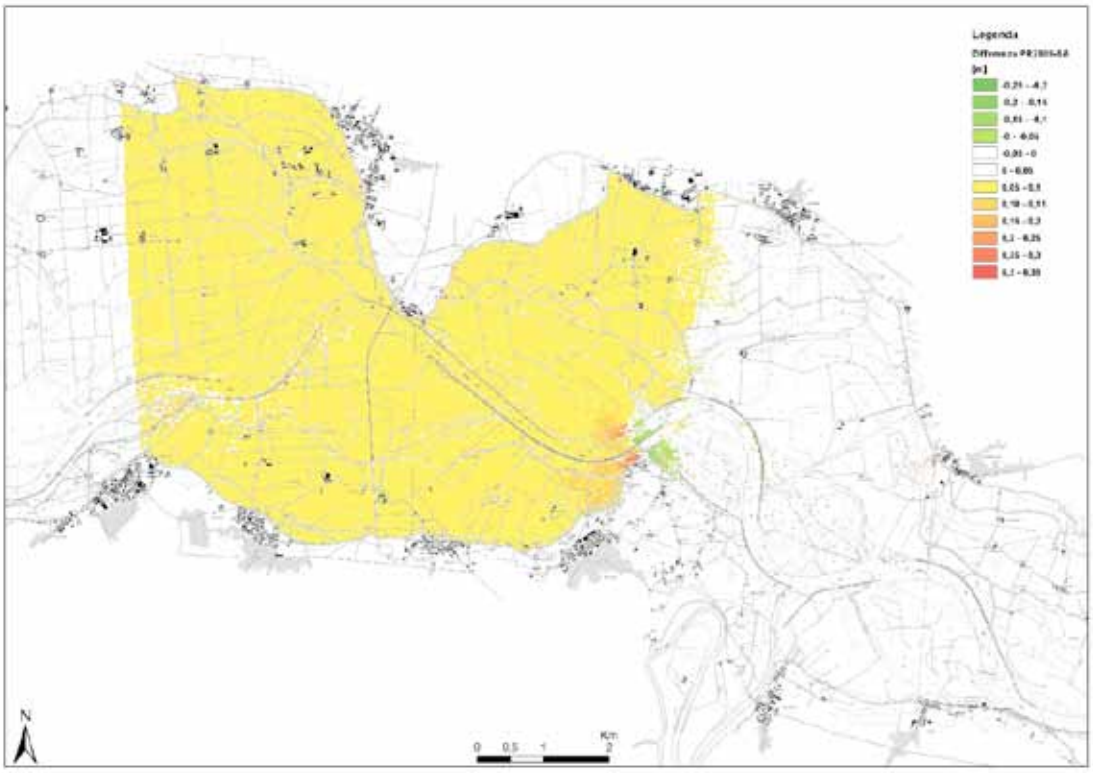


Figura 188 - Traversa n. 1 PR2009 a Motta Baluffi - Roccabianca. Confronto livelli tra assetto di progetto 2009 e assetto attuale.

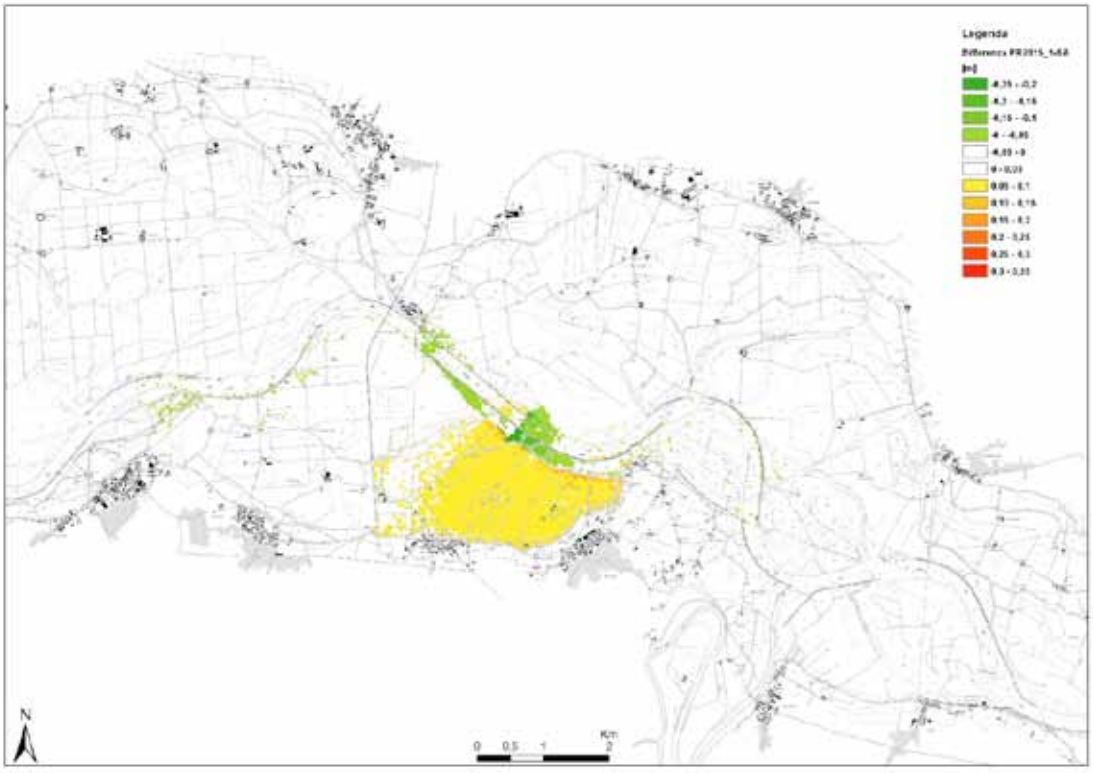


Figura 189 - Traversa n. 1 PR2015 a Motta Baluffi - Roccabianca. Confronto livelli tra assetto di progetto 2015 e assetto attuale.

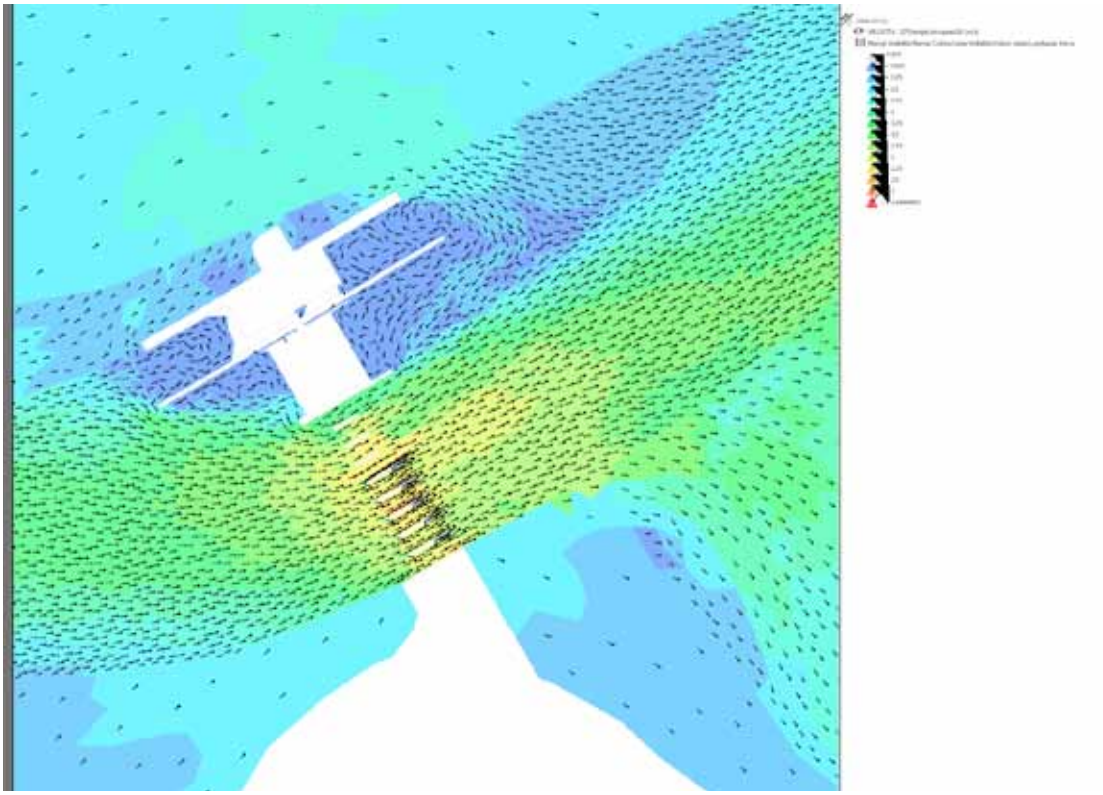


Figura 190 - Traversa n. 1 PR2009 a Motta Baluffi - Roccabianca. Vettori velocità in prossimità dell'opera.

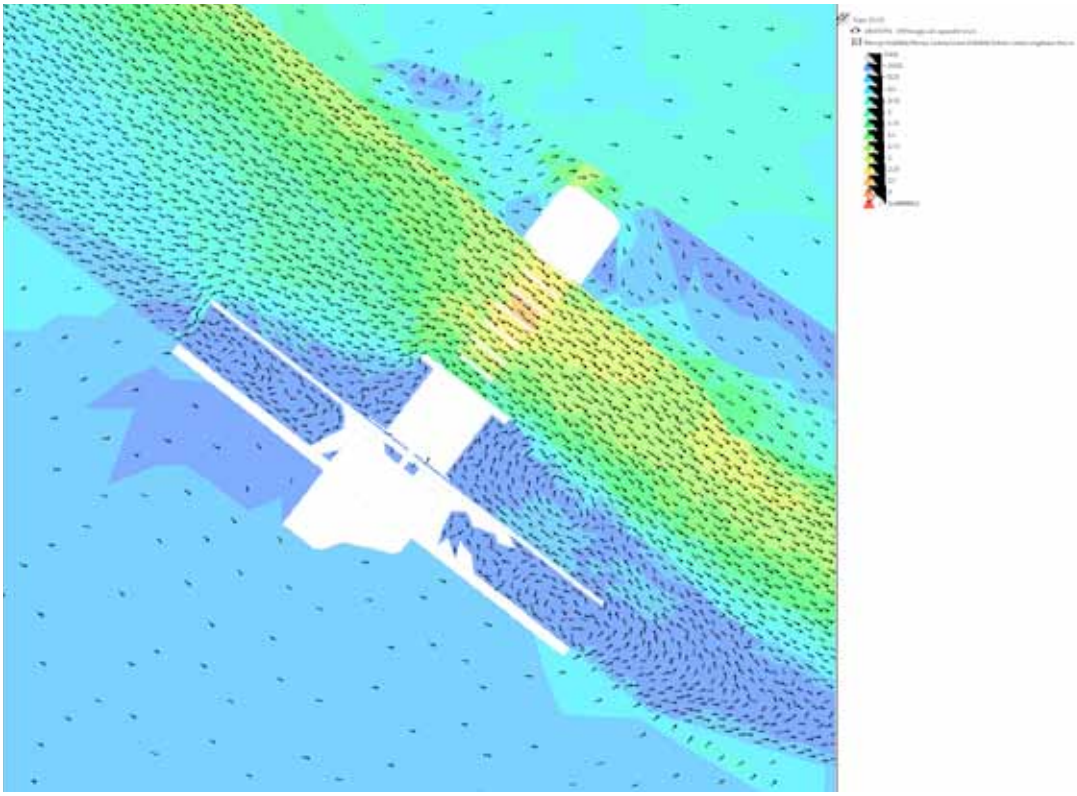


Figura 191 - Traversa n. 1 PR2015 a Motta Baluffi - Roccabianca. Vettori velocità in prossimità dell'opera.

In sintesi emerge come lo scenario progettuale 2015 proposto nel presente studio sia significativamente più idoneo per la sicurezza idraulica del fiume e dei suoi argini maestri con riferimento alla piena PAI T200.

7.5.2 Risultati del modello 2D a fondo fisso per la Traversa n. 2

Rimandando all'Allegato 7 per i risultati dettagliati, qui di seguito, per una più agevole e sintetica comprensione, vengono presentati i confronti fra i risultati relativi all'assetto attuale e quelli relativi alle configurazioni di progetto (PR2009; PR2015) nel tratto di fiume Po in cui è prevista la realizzazione della traversa n.2 a Viadana (MN) - Brescello (RE), sia in termini di livello idrico che in termini di velocità della corrente. Dall'analisi di questi confronti e di tutti i risultati dettagliati riportati nell'Allegato 7 emerge quanto segue:

- l'opera prevista nel progetto 2009 induce un innalzamento del livello idrico a monte di circa 5-20 cm, con punte di 30-35 cm in prossimità delle opere in alveo, che si esaurisce a circa 12 km dalla traversa; l'opera prevista nel progetto 2015 induce modesti e localizzati innalzamenti del livello idrico in golena destra (circa 5-10 cm) ed un abbassamento diffuso dei livelli idrici a monte e a valle della traversa (circa 5-10 cm), che si esaurisce a circa 3 km dall'opera stessa. Il confronto tra le differenze di livello rispetto allo stato attuale indica che la traversa PR2009 induce un maggior innalzamento dei livelli idrici sia in termini assoluti che di estensione della perturbazione. Il franco di sicurezza minimo di 1 m rispetto alla quota degli argini maestri, già nella configurazione attuale, non risulta rispettato; in particolare lungo il tratto compreso tra la sezione S37B e S35A il franco idrico di sicurezza rispetto la piena T200 anni è inferiore ad 1 m ed in alcuni casi risulta essere negativo. L'innalzamento pur modesto dei livelli idrici di piena indotto dalla configurazione PR2009 comporta un ulteriore abbassamento del franco di sicurezza attuale che in tutto il tratto risulta prossimo allo zero. Per quanto riguarda la configurazione 2015, il modesto innalzamento dei livelli idrici di piena in golena destra, non comporta una diminuzione del franco idrico di sicurezza al di sotto del valore minimo di 1 m richiesto dalla normativa.
- l'opera prevista nel PR2009 induce sensibili variazioni del campo delle velocità per un tratto di circa 4 km a valle della traversa, sino alla sezione S37A. Tale variazione, che consiste in un innalzamento della velocità idrica nell'alveo principale e lungo la golena in sponda destra di circa 0,5 m/s con punte di 1-1,5 m/s in prossimità dell'opera, è causata essenzialmente dalla concentrazione del flusso di piena nell'alveo principale ed in parte nella golena in destra idraulica, posta a valle della traversa, ad opera della spalla sinistra dell'opera che impedisce a parte della portata di piena di riversarsi lungo la golena sinistra. Tali effetti sono ben visibili osservando la cartografia allegata in cui viene rappresentato il campo di moto riferito allo scenario Attuale ed allo scenario PR 2009. La ridistribuzione del flusso idrico di piena, indotto dall'opera in sinistra idraulica, comporta una sensibile variazione del campo di moto anche in golena destra a monte dell'opera stessa, per un tratto di circa 2 km, lungo la quale si riversa una maggiore flusso idrico di piena rispetto alla condizione indisturbata. L'aumento delle velocità lungo l'alveo principale e lungo la golena destra, induce un sensibile incremento degli sforzi tangenziali di trascinamento e la conseguente intensificazione dei fenomeni erosivi. La configurazione PR2015 comporta una perturbazione del campo di moto di estensione molto inferiore rispetto alla configurazione PR2009. In particolare, l'opera induce variazioni localizzate del campo di moto che consistono in un innalzamento delle velocità idriche di circa 0,5 m/s in prossimità dell'opera. A valle dell'opera, la regolarizzazione del flusso idrico di piena indotto dalla traversa e dalle opere di regolarizzazione del fondo alveo previste consente una diminuzione delle velocità idriche di piena ed una ridistribuzione più uniforme e regolare del campo di moto. Tali effetti si possono tradurre in una diminuzione degli sforzi di trascinamento che la corrente di piena esercita sul fondo e sulle sponde dell'alveo, nonché sulle opere longitudinali di difesa idraulica.

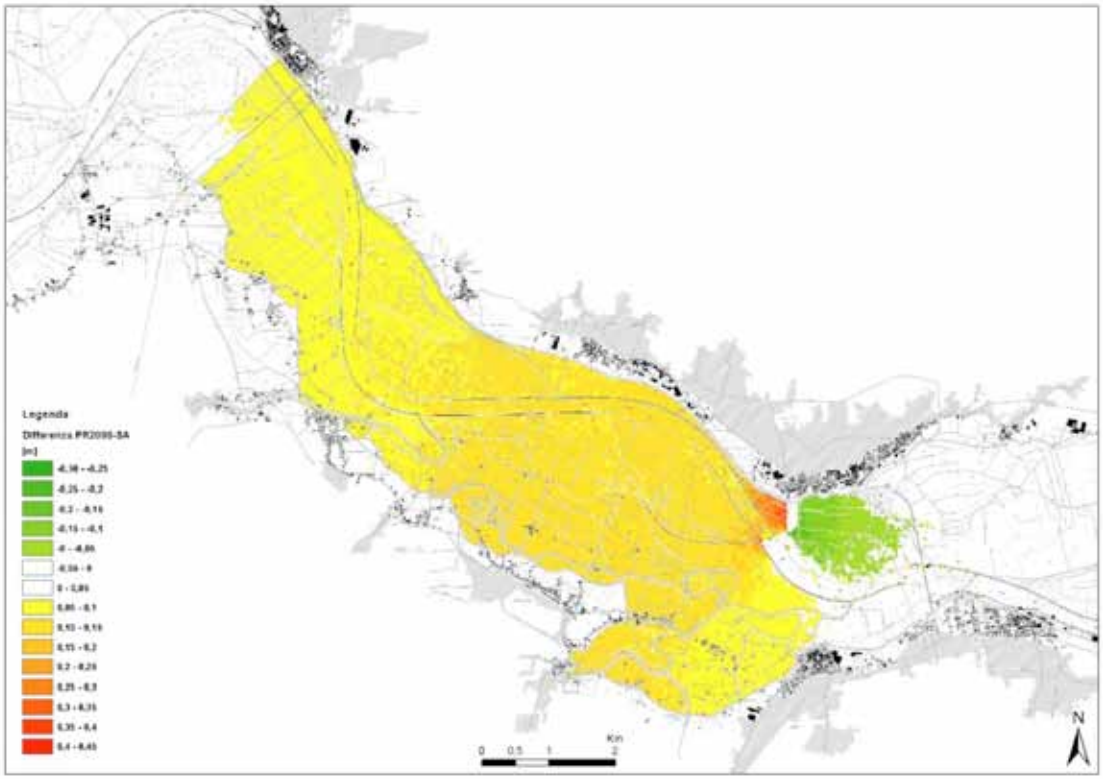


Figura 192 - Traversa n. 2 PR2009 a Viadana (MN) - Brescello (RE). Confronto livelli tra assetto di progetto 2009 e assetto attuale.

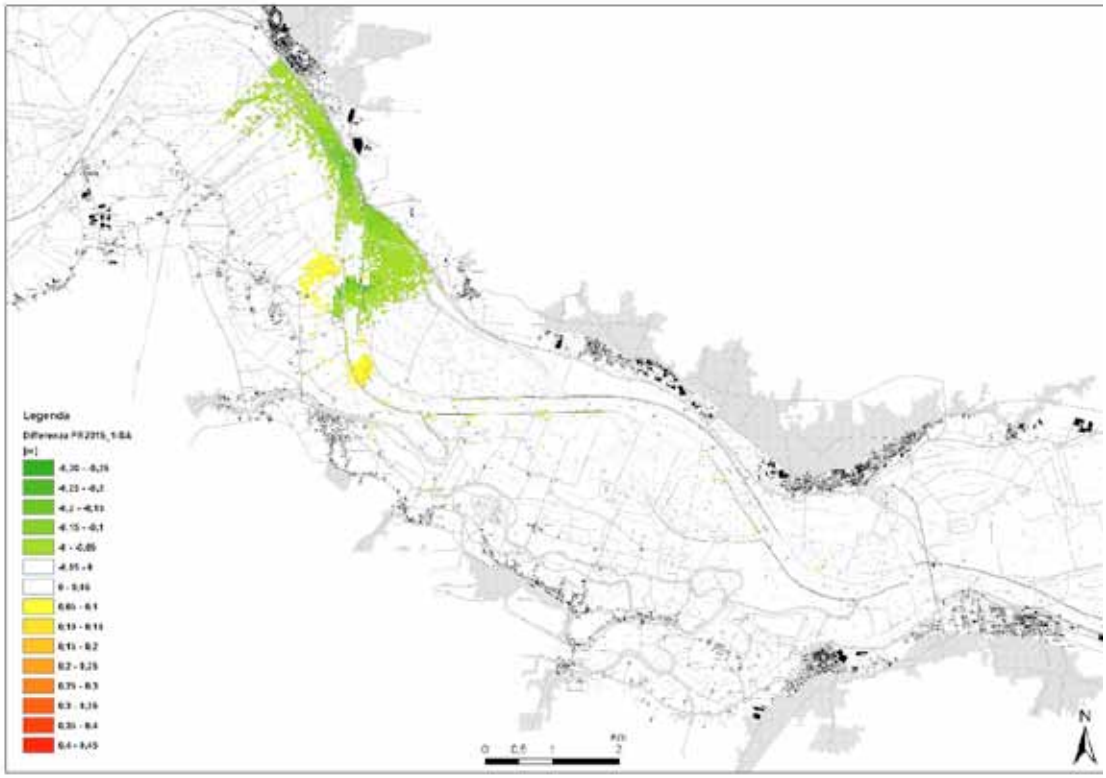


Figura 193 - Traversa n. 2 PR2015 a Viadana (MN) - Brescello (RE). Confronto livelli tra assetto di progetto 2015 e assetto attuale.

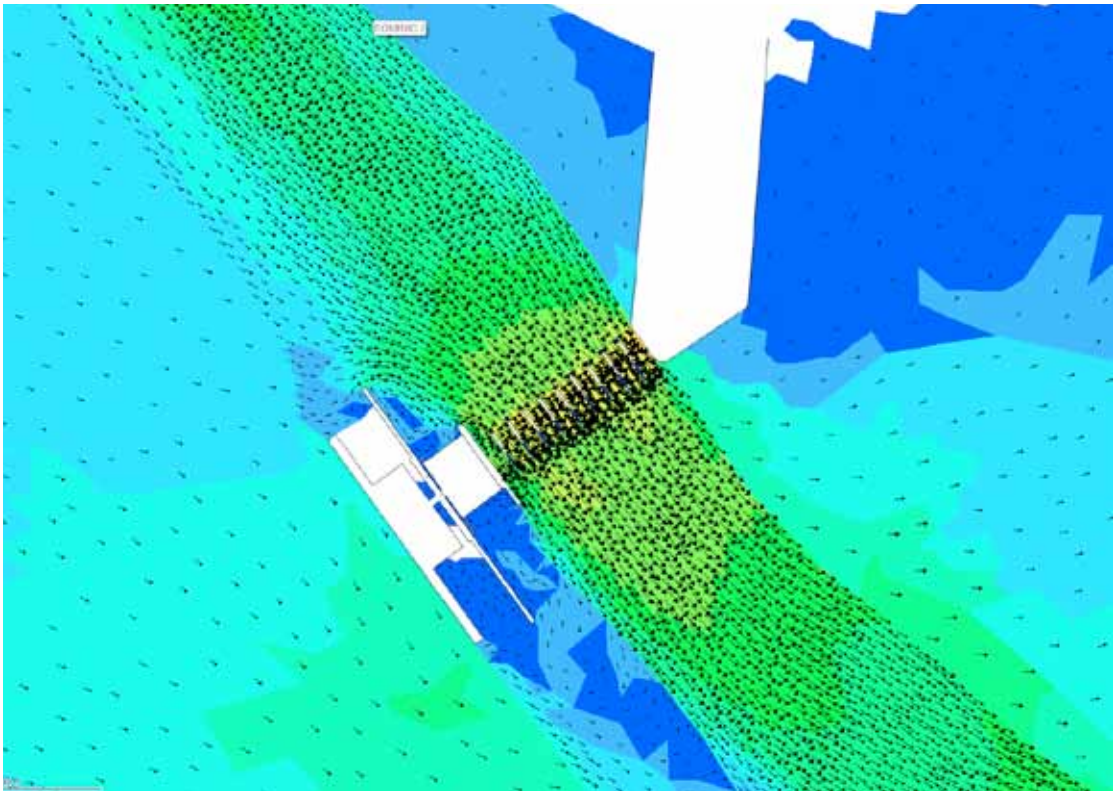


Figura 194 - Traversa n. 2 PR2009 a Viadana (MN) - Brescello (RE). Vettori velocità in prossimità dell'opera.

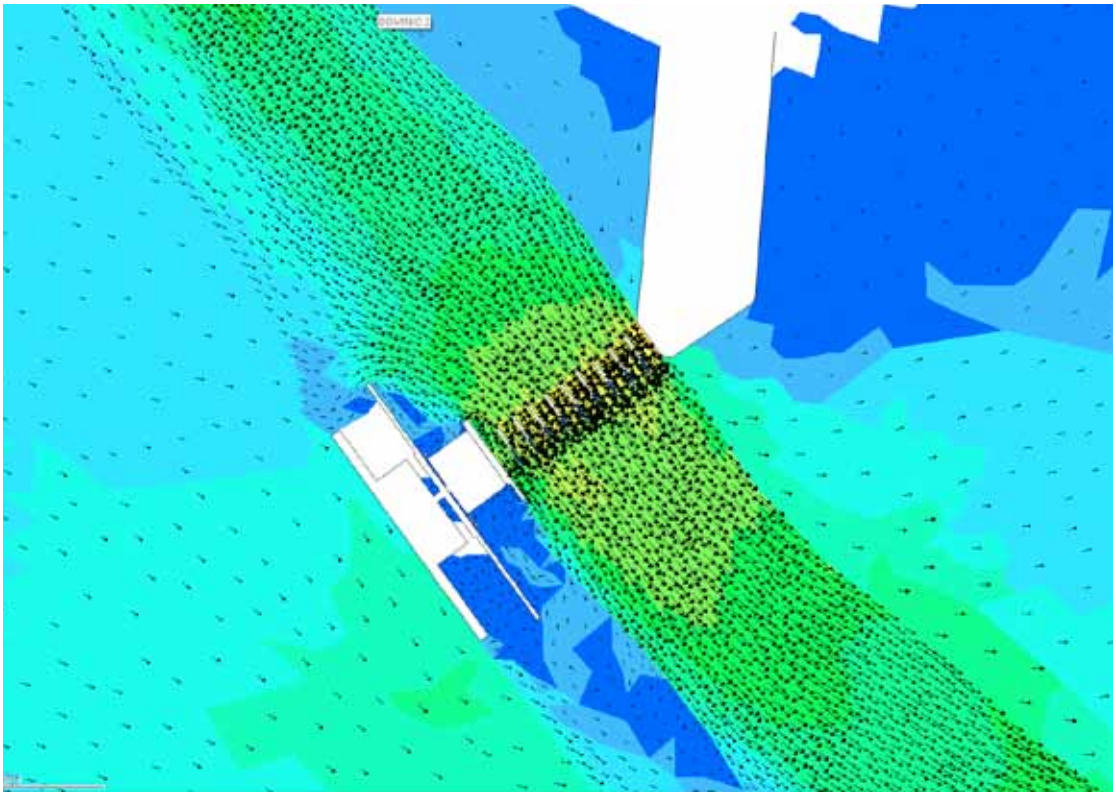


Figura 195 - Traversa n. 2 PR2015 a Viadana (MN) - Brescello (RE). Vettori velocità in prossimità dell'opera.

In sintesi emerge come lo scenario progettuale 2015 proposto nel presente studio sia significativamente più idoneo per la sicurezza idraulica del fiume e dei suoi argini maestri con riferimento alla piena PAI T200.

7.5.3 Risultati del modello 2D a fondo fisso per la Traversa n. 3

Rimandando all'Allegato 7 per i risultati dettagliati, qui di seguito, per una più agevole e sintetica comprensione, vengono presentati i confronti fra i risultati relativi all'assetto attuale e quelli relativi alle configurazioni di progetto (PR2009; PR2015-1; PR2015-2) nel tratto di fiume Po in cui è prevista la realizzazione della traversa n.3 a Borgoforte (MN) - Motteggiana (MN), sia in termini di livello idrico che in termini di velocità della corrente. Dall'analisi di questi confronti e di tutti i risultati dettagliati riportati nell'Allegato 7 emerge quanto segue:

- l'opera prevista nel progetto 2009 induce un innalzamento del livello idrico a monte di circa 5-10 cm localizzato in sponda sinistra, che si esaurisce a circa 700 m dalla traversa; l'opera prevista nel progetto 2015-1 induce un innalzamento del livello idrico a monte inferiore a 10 cm localizzato nell'intorno delle opere civili in sponda destra, che non modifica sostanzialmente il profilo idrico attuale; l'opera prevista nel progetto 2015-2 induce un innalzamento del livello idrico a monte localizzato in golena destra inferiore a 10 cm, che non modifica sostanzialmente il profilo idrico attuale in prossimità degli argini maestri. In termini di livelli idrici, le perturbazioni indotte verso valle dalle configurazioni proposte si possono considerare trascurabili. Il confronto tra le differenze di livello rispetto lo stato attuale indica che la traversa PR2009 induce un maggior innalzamento dei livelli idrici in termini assoluti e, soprattutto, comporta una perturbazione del profilo idrico che si estende per molti chilometri verso monte, anche se l'effetto maggiore è concentrato in un tratto di circa 700 m. Il franco di sicurezza minimo di 1 m rispetto alla quota degli argini maestri, già nella configurazione attuale non è rispettato; in particolare lungo tutto il dominio di calcolo, compreso tra la sezione S42 e S39F il franco idrico minimo assume valori prossimi a zero, con lunghi tratti in cui il franco assume valori negativi. In questo caso, vista l'insufficienza delle condizioni di sicurezza attuali, sarà necessario innanzitutto intervenire sulle quote arginali per garantire il franco minimo di sicurezza di 1 m. Ai fini di un confronto tra le configurazioni progettuali proposte, si può certamente asserire che in generale l'innalzamento pur modesto dei livelli idrici di piena indotto dalle configurazioni esaminate comporta un peggioramento della situazione di sicurezza che, comunque, risulta più marcato per la configurazione PR2009 in quanto produce una perturbazione di entità maggiore sia in termini di aumento dei livelli idrici, sia in termini di estensione della perturbazione verso monte e di vicinanza con l'argine maestro. Infatti, le configurazioni di progetto PR2015-1 e PR2015-2 producono perturbazioni di trascurabile entità che si sviluppano in aree di modesta estensione localizzate nell'intorno delle opere civili previste e che non interessano gli argini maestri.
- l'opera prevista nel PR2009 induce modeste variazioni del campo delle velocità per un tratto di circa 2 km a valle della traversa, sino alla sezione S41A. Tale variazione, che consiste in un innalzamento della velocità idrica nell'alveo principale e, localmente, lungo la golena in sponda destra di circa 0,5 m/s, è causata essenzialmente dalla deviazione di una modesta parte del flusso idrico di piena verso l'alveo principale e la golena destra per la presenza delle opere ausiliarie della traversa (conca; centrale). La configurazione PR2015-1 comporta anch'essa variazioni modeste delle velocità idriche ed una perturbazione del campo di moto di estensione localizzata nell'intorno dell'opera. In particolare, l'opera induce variazioni localizzate del campo di moto che consistono in un innalzamento delle velocità idriche di circa 0,5 m/s in prossimità dell'opera stessa. La regolarizzazione del flusso idrico di piena, indotto dalla traversa e dalle opere di regolarizzazione del fondo alveo previste per consentire la navigazione, consente di mantenere inalterato il campo di moto verso valle, contrariamente a quanto accade per la configurazione PR2009. La configurazione PR2015-2 comporta variazioni modeste delle velocità idriche ed una perturbazione del campo di moto di estensione localizzata nell'intorno dell'opera. In particolare, l'opera induce variazioni localizzate del campo di moto che consistono in un innalzamento delle velocità idriche di circa 0,1 – 0,2 m/s in prossimità della lanca in sponda destra ed in sponda sinistra, ove viene ridistribuita parte della portata di piena che transitava precedentemente nell'alveo principale. La regolarizzazione del flusso idrico di piena, indotto dalla traversa e dalle opere di regolarizzazione del fondo alveo previste per consentire la navigazione, consente di diminuire le velocità lungo l'alveo principale interessato dalla nuova opera, sia a monte che a valle della nuova opera, contrariamente a quanto accade per la configurazione PR2009.

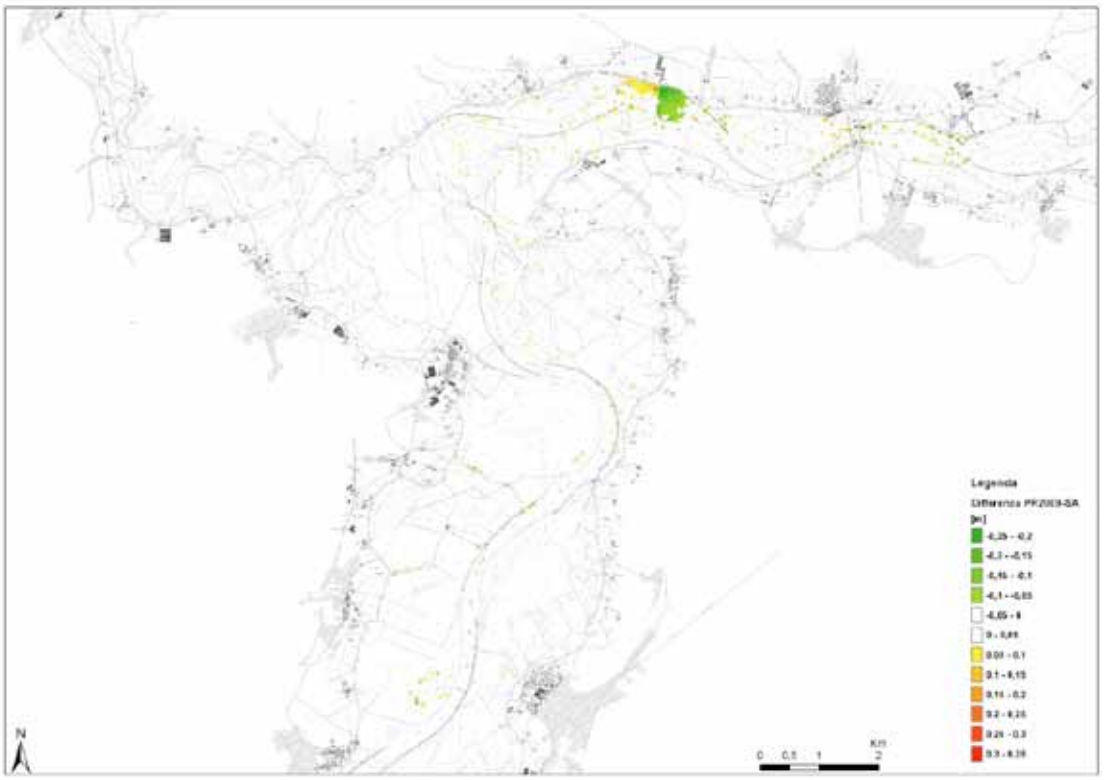


Figura 196 - Traversa n. 3 PR2009 a Borgoforte (MN) - Confronto livelli tra assetto di progetto 2009 e assetto attuale.

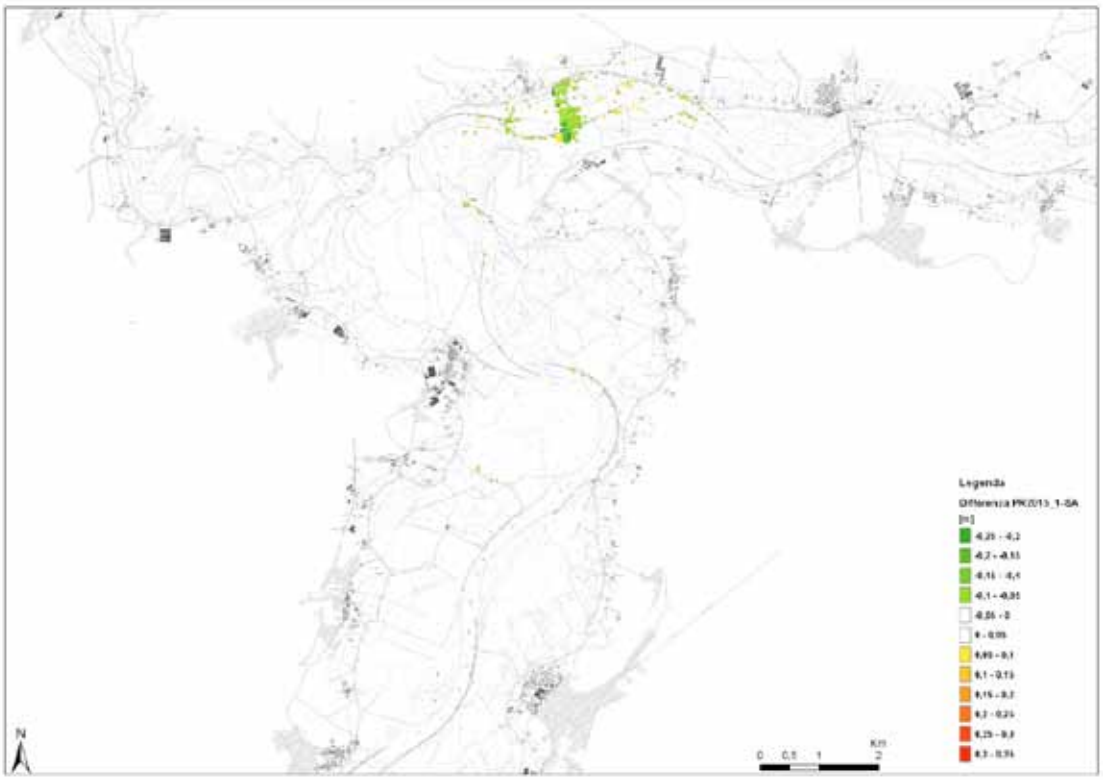


Figura 197 - Traversa n. 3 PR2015-1 a Borgoforte (MN) - Motteggiana (MN). Confronto livelli tra assetto di progetto 2015 (variante 1) e assetto attuale.

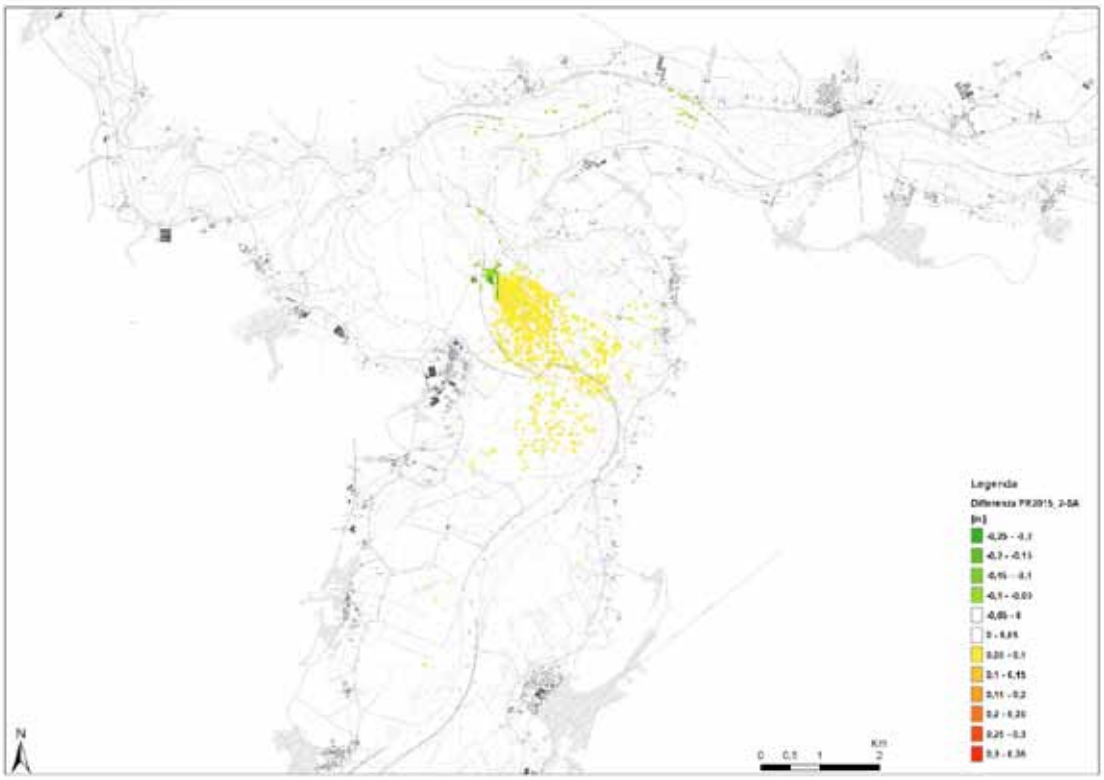


Figura 198 - Traversa n. 3 PR2015-2 a Borgoforte (MN) - Motteggiana (MN). Confronto livelli tra assetto di progetto 2015 (variante 2) e assetto attuale.

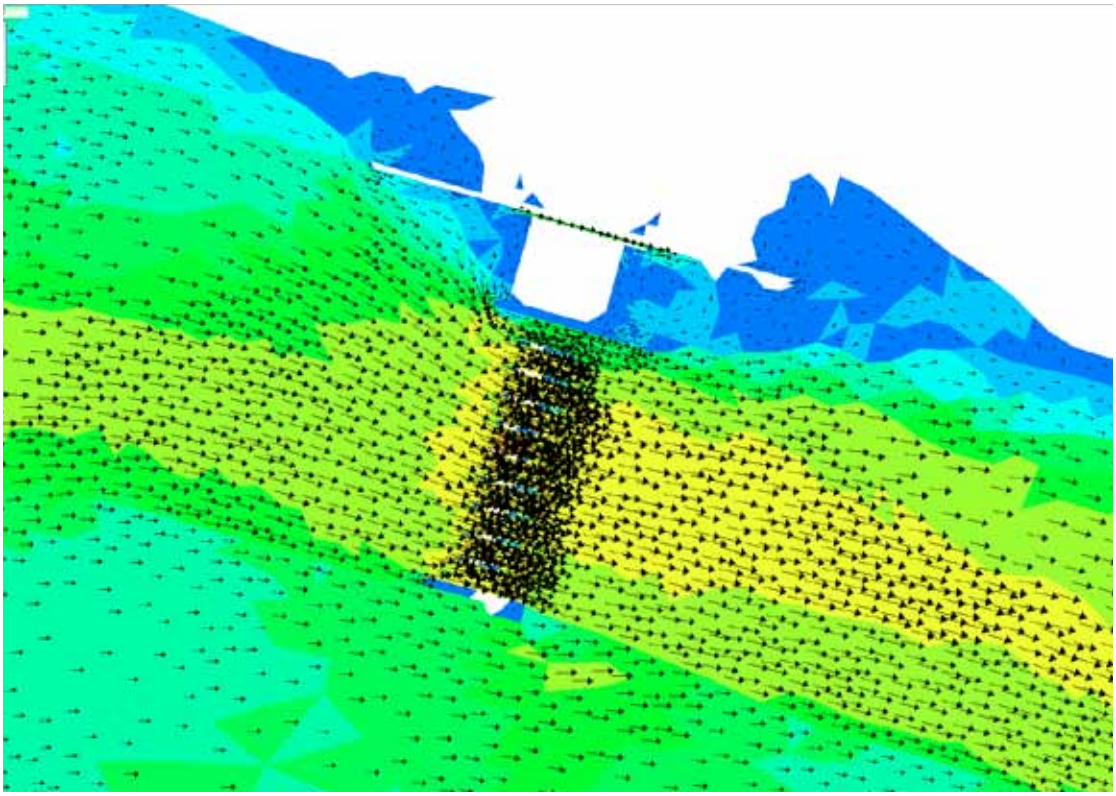


Figura 199 - Traversa n. 3 PR2009 a Borgoforte (MN) - Motteggiana (MN). Vettori velocità in prossimità dell'opera.

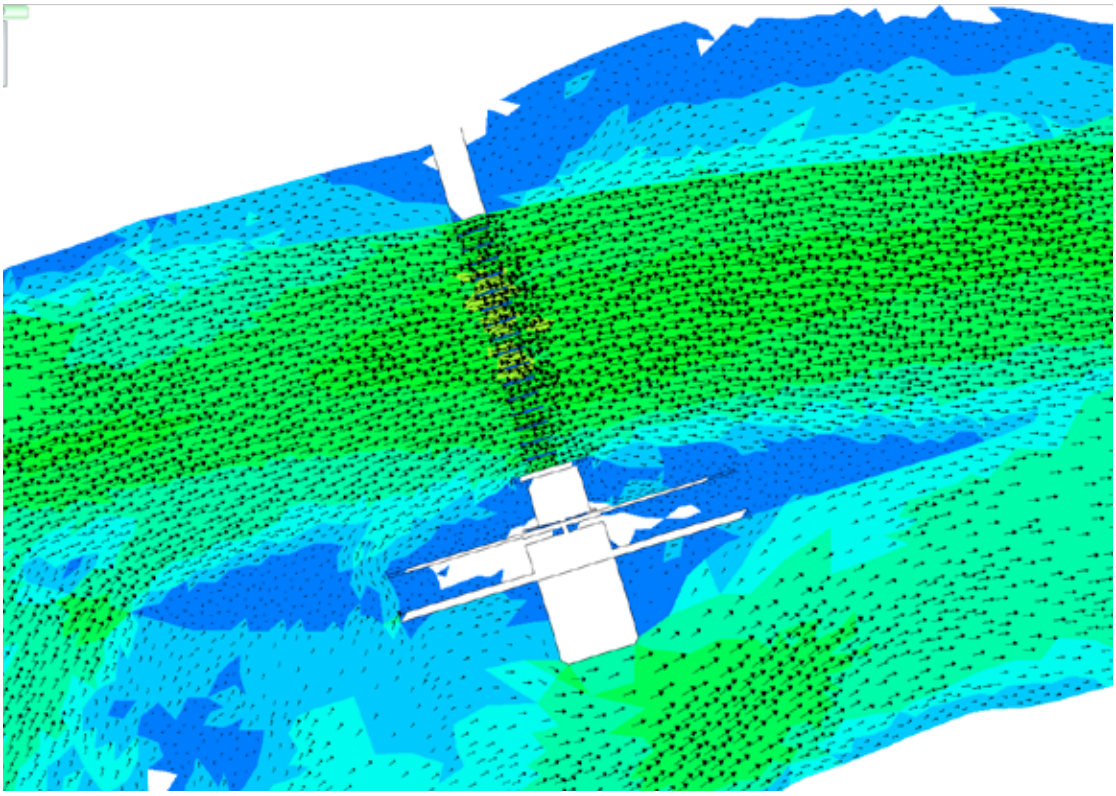


Figura 200 - Traversa n. 3 PR2015 (variante 1) a Borgoforte (MN) - Motteggiana (MN). Vettori velocità in prossimità dell'opera.

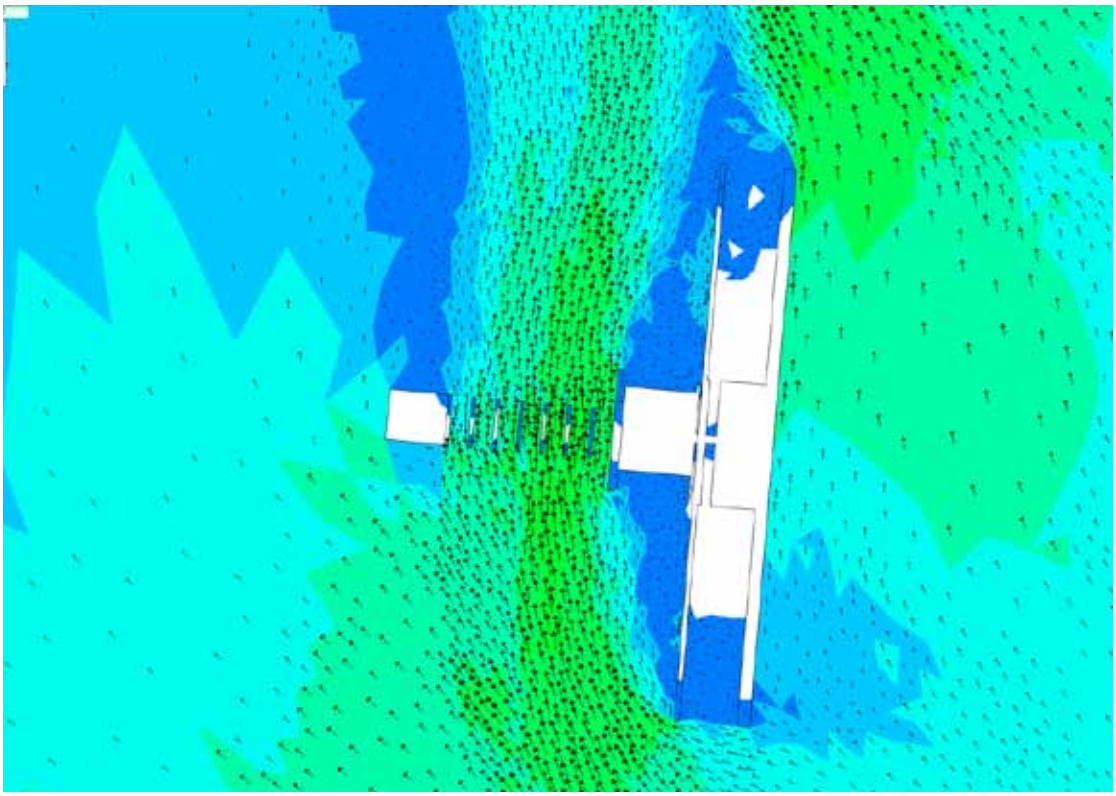


Figura 201 - Traversa n. 3 PR2015 (variante 2) a Borgoforte (MN) - Motteggiana (MN). Vettori velocità in prossimità dell'opera.

In sintesi emerge come gli scenari progettuali 2015-1 e 2015-2, proposti nel presente studio, siano significativamente più idonei per la sicurezza idraulica del fiume e dei suoi argini maestri con riferimento alla piena PAI T200 rispetto alla soluzione del 2009. Inoltre, la soluzione 2015-2 è preferibile

rispetto alla soluzione 2015-1 in quanto, essendo posta a monte della confluenza con il fiume Oglio, rende nulli gli impatti indotti dal livello idrico di regolazione della traversa 3 sul sistema di bonifica che afferisce al fiume Oglio stesso in prossimità della confluenza con il fiume Po (Consorzio di Bonifica Navarolo – Agro Cremonese Mantovano).

7.5.4 Risultati del modello 2D a fondo fisso per la Traversa n. 4

Rimandando all'Allegato 7 per i risultati dettagliati, qui di seguito, per una più agevole e sintetica comprensione, vengono presentati i confronti fra i risultati relativi all'assetto attuale e quelli relativi alle configurazioni di progetto (PR2009; PR2015-variante 1, PR2015-variante 2) nel tratto di fiume Po in cui è prevista la realizzazione della traversa n.4 a Sustinente (MN) - Quingentole (MN), sia in termini di livello idrico che in termini di velocità della corrente. Dall'analisi di questi confronti e di tutti i risultati dettagliati riportati nell'Allegato 7 emerge quanto segue:

- l'opera prevista nel progetto 2009 induce un innalzamento del livello idrico a monte di circa 5-10 cm, con punte localizzate di 15-20 cm in prossimità delle opere in sponda destra, che si esaurisce a circa 7 km dalla traversa; l'opera prevista nel progetto 2015-1 induce un innalzamento del livello idrico a monte inferiore a 5-20 cm, con punte 30-35 cm in prossimità delle opere in sponda sinistra, che si esaurisce a circa 5 km dalla traversa, mentre l'opera prevista nel progetto 2015-2 induce un innalzamento del livello idrico a monte inferiore a 5 cm, che non modifica sostanzialmente il profilo idrico attuale. Le perturbazioni indotte verso valle si possono considerare in entrambi i casi trascurabili. Il confronto tra le differenze di livello rispetto lo stato attuale indica che la traversa PR2015-1 induce il maggior innalzamento dei livelli idrici in termini assoluti, mentre la configurazione PR2009 induce la maggior perturbazione del profilo idrico, che si estende per molti chilometri verso monte, contrariamente, la configurazione PR2015-2 non induce variazioni apprezzabili del profilo idrico di piena. Il franco di sicurezza minimo di 1 m rispetto alla quota degli argini maestri, già nella configurazione attuale non è rispettato; in particolare lungo tutto il dominio di calcolo, compreso tra la sezione S53 e S46A, il franco idrico minimo assume valori inferiori a 1 m (soprattutto in sponda destra), con lunghi tratti in sponda destra in cui il franco assume valori prossimi a zero o negativi. In questo caso, vista l'insufficienza delle condizioni di sicurezza attuali, sarà necessario innanzitutto intervenire sulle quote arginali per garantire il franco minimo di sicurezza di 1 m. Ai fini di un confronto tra le configurazioni progettuali proposte, si può certamente asserire che in generale l'innalzamento dei livelli idrici di piena indotto dalle configurazioni esaminate comporta un peggioramento della situazione di sicurezza che, comunque, risulta più marcato per le configurazione PR2009 in quanto produce una perturbazione di entità maggiore, soprattutto in termini di estensione della perturbazione verso monte. In questo caso il franco minimo di sicurezza rispetto agli argini maestri compresi tra la sezione S46A e S53 assume valori inferiori ad 1 m e in alcuni tratti prossimi a zero. Nella configurazione PR2015-1, considerando che l'opera si trova spostata a monte rispetto la traversa PR2009 e che l'innalzamento dei livelli idrici risulta mediamente inferiore, anche se con innalzamenti localizzati leggermente maggiori, si può sicuramente affermare che tale configurazione, pur peggiorando la situazione attuale, risulta migliore in quanto produce perturbazioni su un tratto di fiume di lunghezza inferiore. La configurazione PR2015-2 risulta la migliore fra quelle analizzate in quanto non produce apprezzabili variazioni del profilo idrico di piena.
- l'opera prevista nel PR2009 induce sensibili variazioni del campo delle velocità sia a monte che a valle dell'opera. In particolare, si riscontra un aumento delle velocità di circa 0,5-1 m/s in corrispondenza della sezione S47A, posta a circa 2 km a monte della traversa, e lungo la golena sinistra posta in prossimità dell'opera, causate dall'attivazione di un nuovo filone di corrente che defluisce verso la golena sinistra in prossimità della sezione S47A. La deviazione dall'alveo principale di parte del flusso idrico di piena è dovuta alla presenza delle opere ausiliarie della traversa (conca; centrale), che rappresentano un ostacolo al libero deflusso della corrente di piena in sponda sinistra. A valle dell'opera, lungo l'alveo principale di piena, si riscontra una diminuzione della velocità idrica di circa 0,5 m/s causata dal minor flusso in arrivo da monte causato dalla nuova ripartizione della portata di piena tra alveo e golena sinistra. La configurazione PR2015-1 comporta anch'essa variazioni modeste delle velocità idriche pari a circa 0,5-1 m/s in corrispondenza della traversa e della sezione S47A dove si attiva, anche in questo caso, un nuovo filone di corrente verso la golena sinistra. Rispetto alla configurazione PR2009, l'opera induce variazioni localizzate del campo di moto

con un aumento della velocità idrica posto soprattutto a monte del tratto iniziale del mandracchio della conca di navigazione e non nella golena sinistra. Infine, la configurazione PR2015-2 induce una migliore distribuzione della portata di piena tra alveo principale e golena sinistra che comporta una diminuzione delle velocità lungo l'alveo principale a monte e a valle dell'opera ed una variazione non apprezzabile delle velocità in golena sinistra.

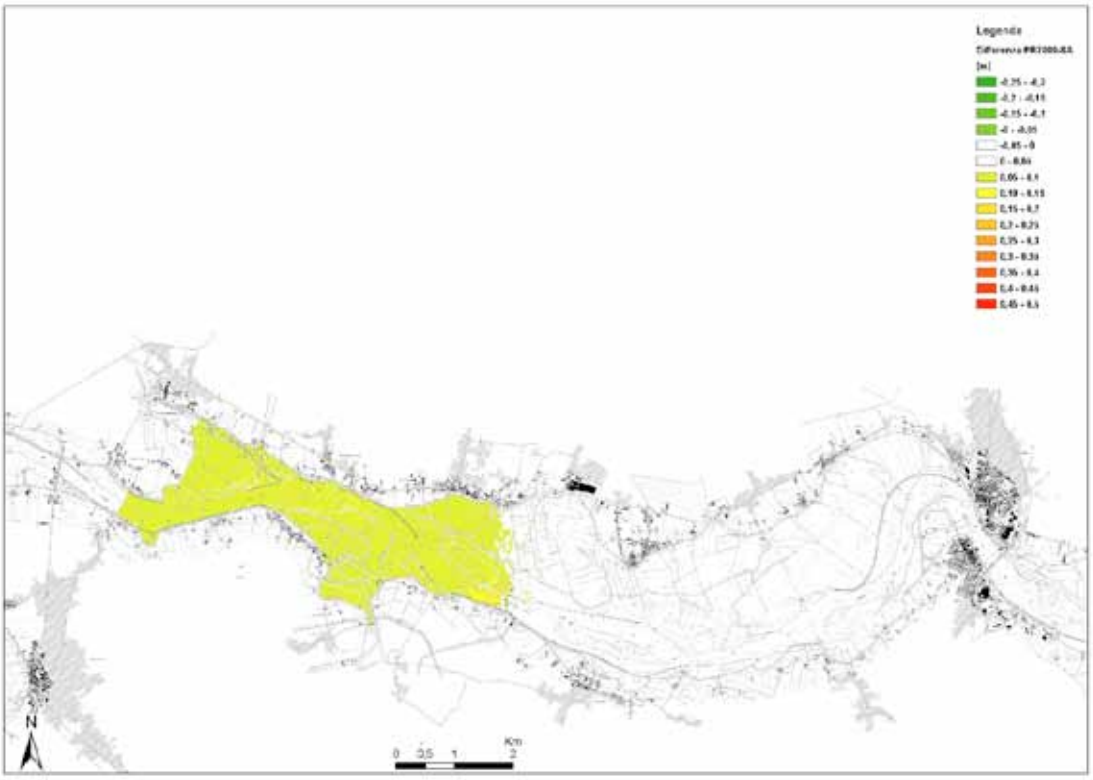


Figura 202 - Traversa n. 4 PR2009 a Sustinente (MN) - Quingentole (MN). Confronto livelli tra assetto di progetto 2009 e assetto attuale.

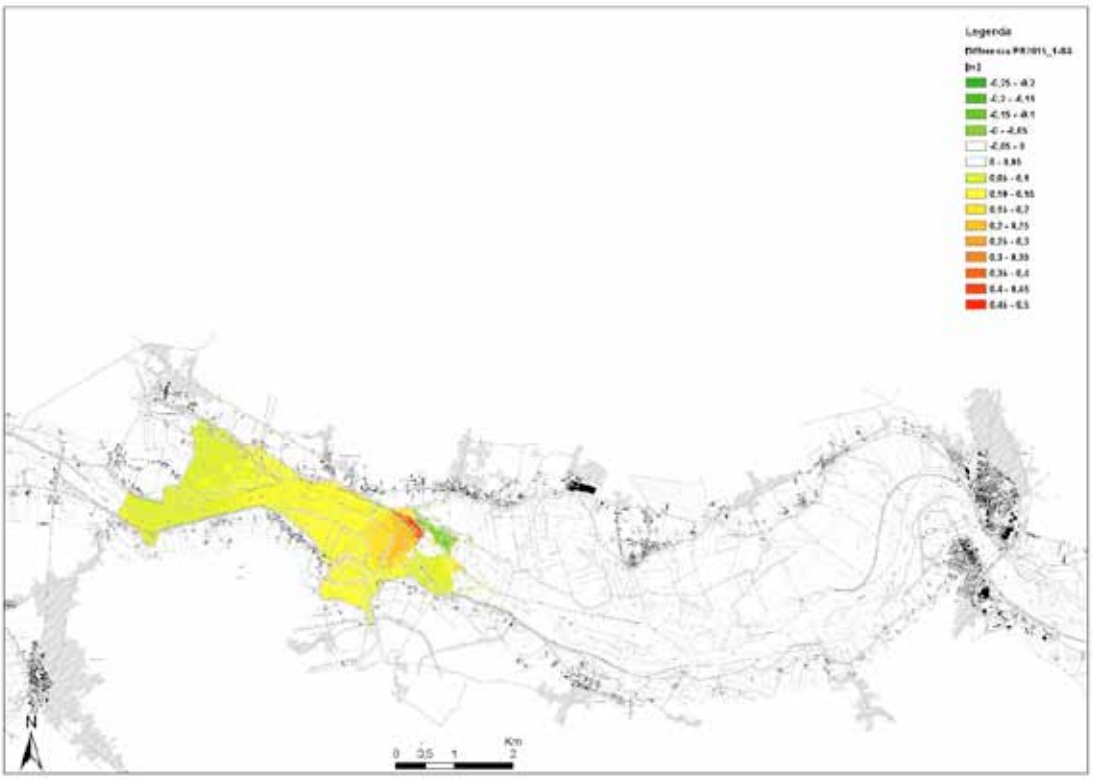


Figura 203 - Traversa n. 4 PR2015-variante1 a Sustinente (MN) - Quingentole (MN). Confronto livelli tra assetto di progetto 2015-variante 1 e assetto attuale.

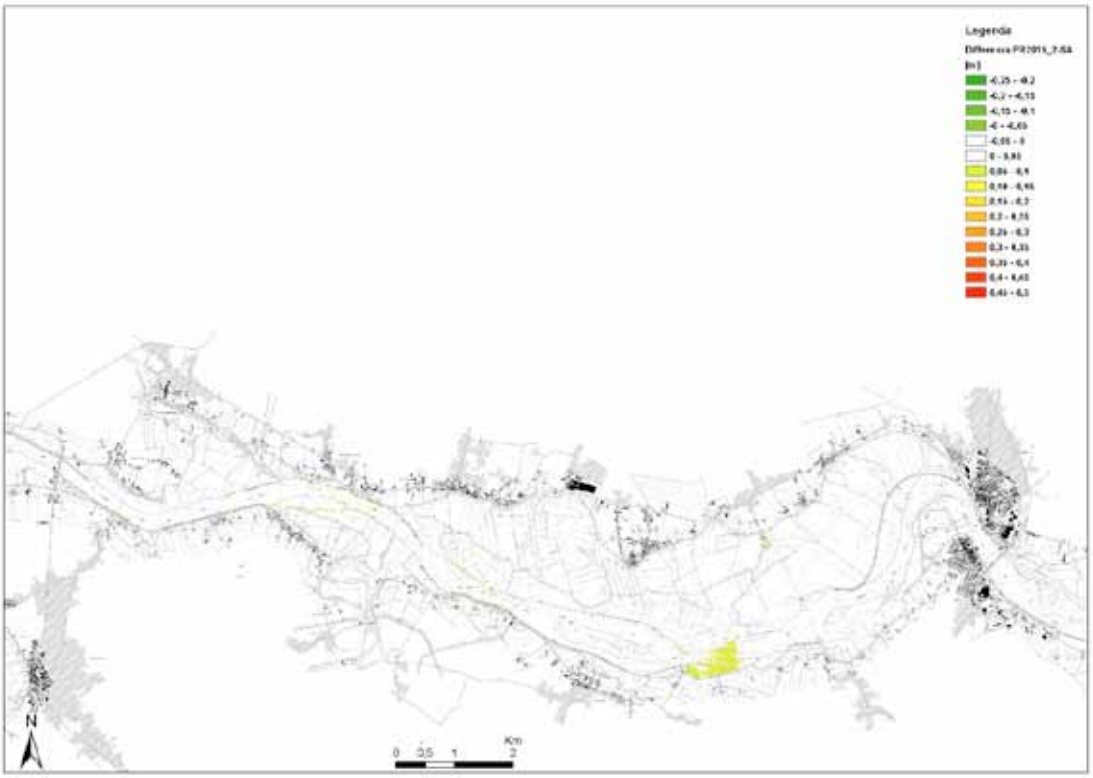


Figura 204 - Traversa n. 4 PR2015-variante2 a Sustinente (MN) - Quingentole (MN). Confronto livelli tra assetto di progetto 2015-variante 2 e assetto attuale.

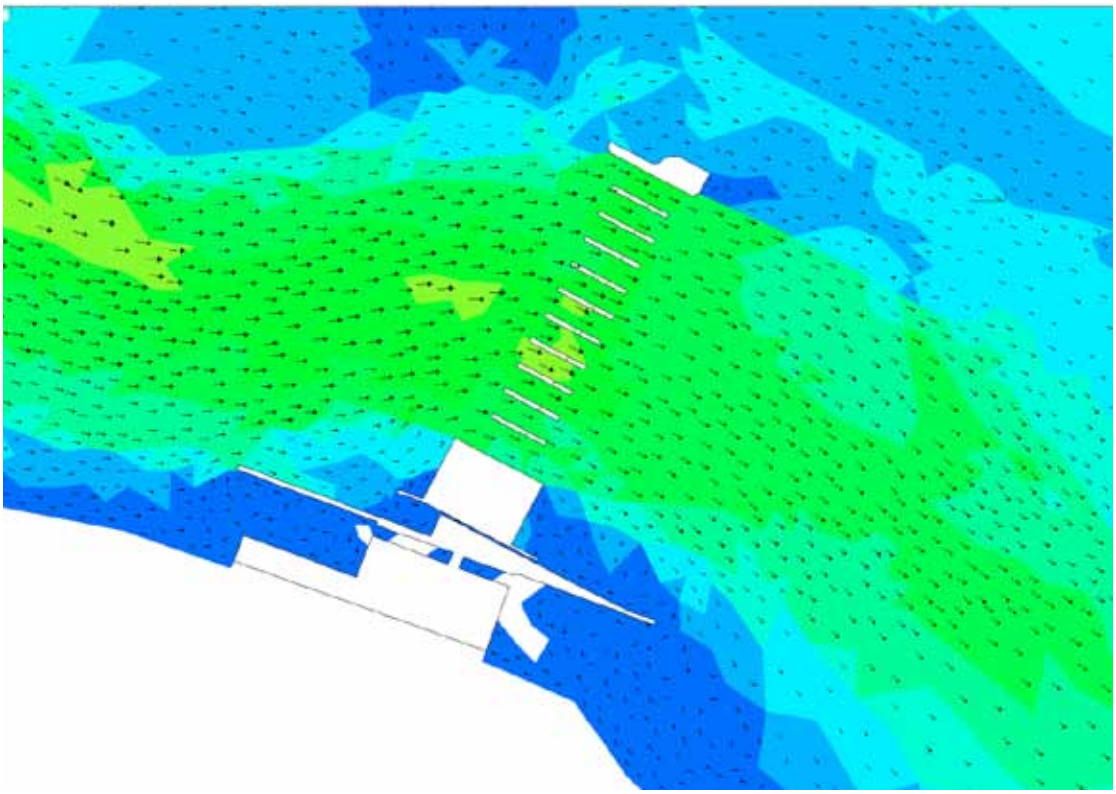


Figura 205 - Traversa n. 4 PR2009 a Sustinente (MN) - Quingentole (MN). Vettori velocità in prossimità dell'opera.

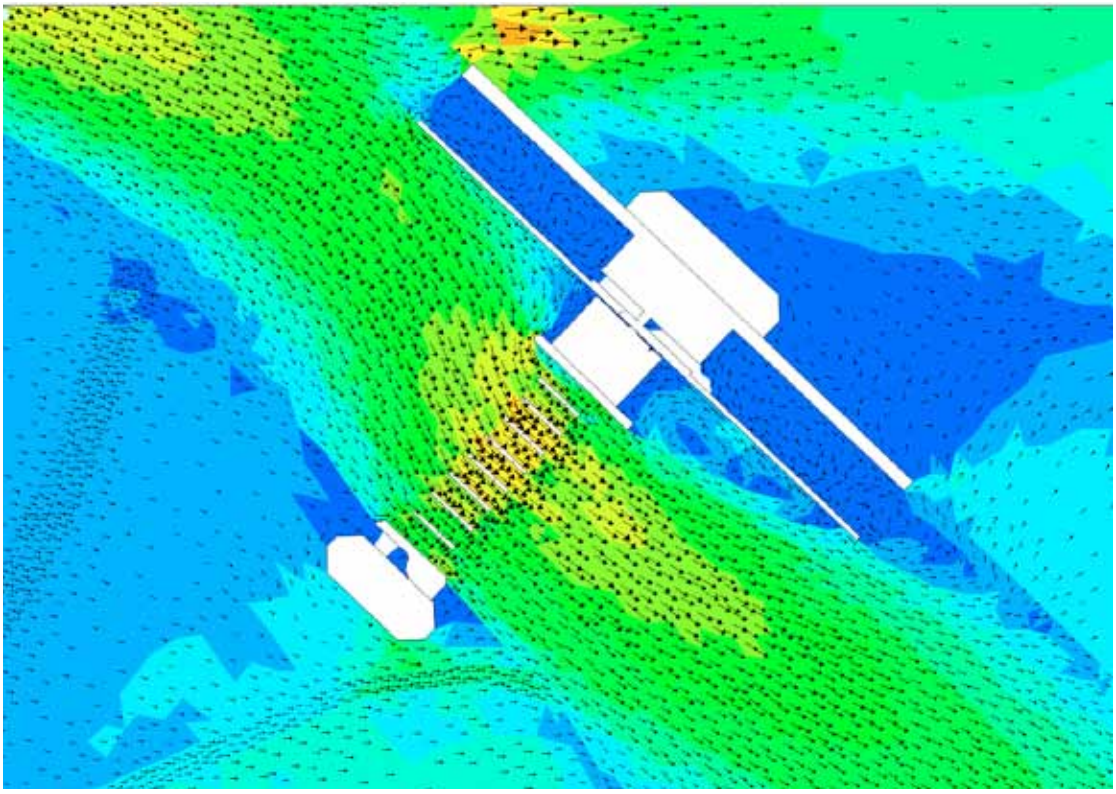


Figura 206 - Traversa n. 4 PR2015-variante 1 a Sustinente (MN) - Quingentole (MN). Vettori velocità in prossimità dell'opera.

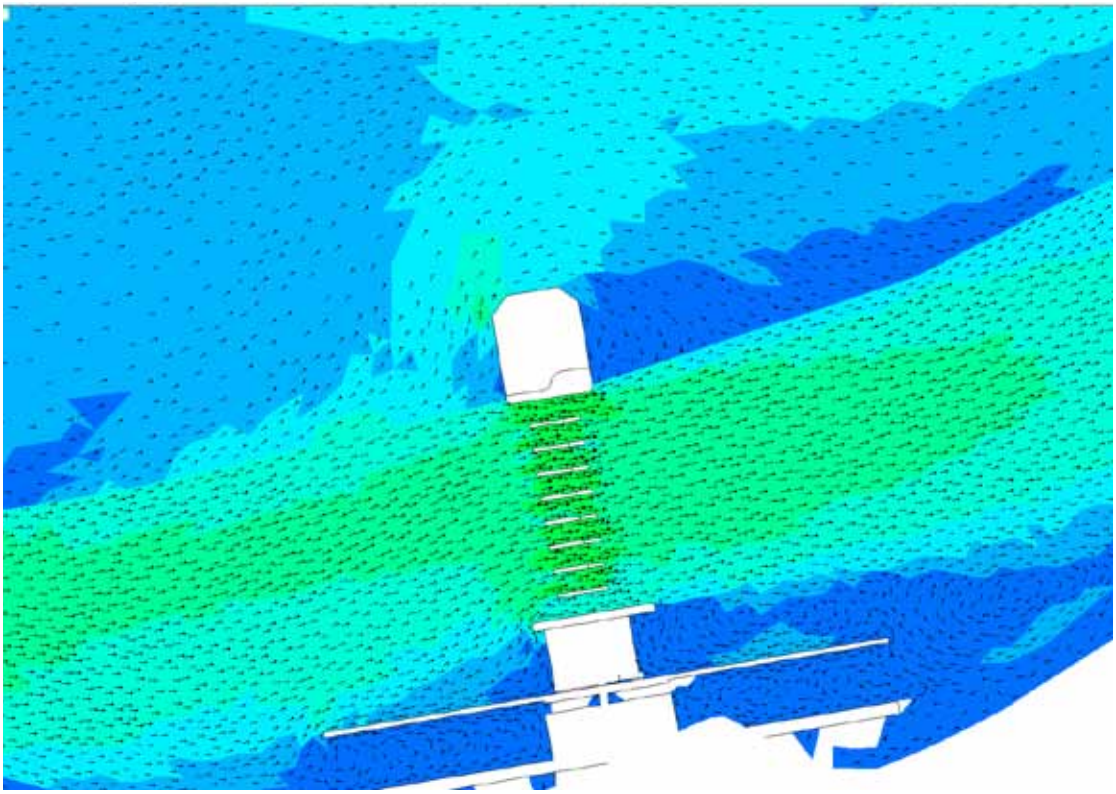


Figura 207 - Traversa n. 4 PR2015-variante 2 a Sustinente (MN) - Quingentole (MN). Vettori velocità in prossimità dell'opera.

In sintesi emerge come lo scenario progettuale 2015-variante 2 proposto nel presente studio sia significativamente più idoneo per la sicurezza idraulica del fiume e dei suoi argini maestri con riferimento alla piena PAI T200.

7.5.5 Risultati del modello 2D a fondo fisso per la Traversa n. 5

Rimandando all'Allegato 7 per i risultati dettagliati, qui di seguito, per una più agevole e sintetica comprensione, vengono presentati i confronti fra i risultati relativi all'assetto attuale e quelli relativi alle configurazioni di progetto (PR2015-variante 1, PR2015-variante 2) nel tratto di fiume Po in cui è prevista la realizzazione della traversa n.5 a Gaiba (FE) - Ferrara, sia in termini di livello idrico che in termini di velocità della corrente. Dall'analisi di questi confronti e di tutti i risultati dettagliati riportati nell'Allegato 7 emerge quanto segue:

- l'opera prevista nel progetto 2015-1 induce un innalzamento del livello idrico a monte di circa 10-15 cm, che si esaurisce a 600 m dalla traversa, mentre l'opera prevista nel progetto 2015-2 induce un innalzamento del livello idrico a monte variabile tra 5 cm e 20 cm che si esaurisce a circa 800 m dalla traversa. Le perturbazioni indotte verso valle dalle opere in progetto si possono considerare in entrambi i casi poco rilevanti, in particolare si verifica un lieve (5 cm) innalzamento dei livelli in sponda destra nella configurazione PR2015-1 ed un leggero abbassamento dei livelli (-5 cm) nella configurazione PR2015-2. Il confronto tra le differenze di livello rispetto lo stato attuale indica che la traversa PR2015-2 induce un maggior innalzamento dei livelli idrici, compreso tra 5-20 cm contro un innalzamento di circa 5-15 cm nel caso del PR2015-1, e, soprattutto, comporta una perturbazione del profilo idrico di 200 m più estesa. Il franco di sicurezza minimo di 1 m nella configurazione attuale risulta ampiamente soddisfatto così come nel caso delle configurazioni progettuali proposte che, pur diminuendone il valore assoluto, lo soddisfano ampiamente.
- l'opera prevista nel PR2015-1 induce modeste variazioni del campo delle velocità per un tratto di circa 1 km a monte della traversa, lungo il quale si nota una diminuzione delle velocità idriche di circa 0,2 m/s. In prossimità delle luci di passaggio della traversa, si evidenzia un aumento localizzato della velocità di circa 0,5 m/s che si esaurisce in poche decine di metri. La configurazione PR2015-2 comporta anch'essa variazioni modeste delle velocità idriche ed una perturbazione del campo di moto di estensione localizzata nell'intorno dell'opera. In particolare, l'opera induce variazioni localizzate del campo di moto che consistono in un innalzamento delle velocità idriche di circa 0,5 m/s in prossimità dell'opera stessa ed un abbassamento delle velocità idriche di 0,5 m/s verso valle che si esaurisce a circa 500 m dall'opera. La regolarizzazione del flusso idrico di piena, indotto dalle configurazioni di progetto proposte, e le opere di regolarizzazione del fondo alveo previste per consentire la navigazione, consentono di mantenere pressoché inalterato il campo di moto sia verso monte che verso valle, rispetto alle condizioni attuali.

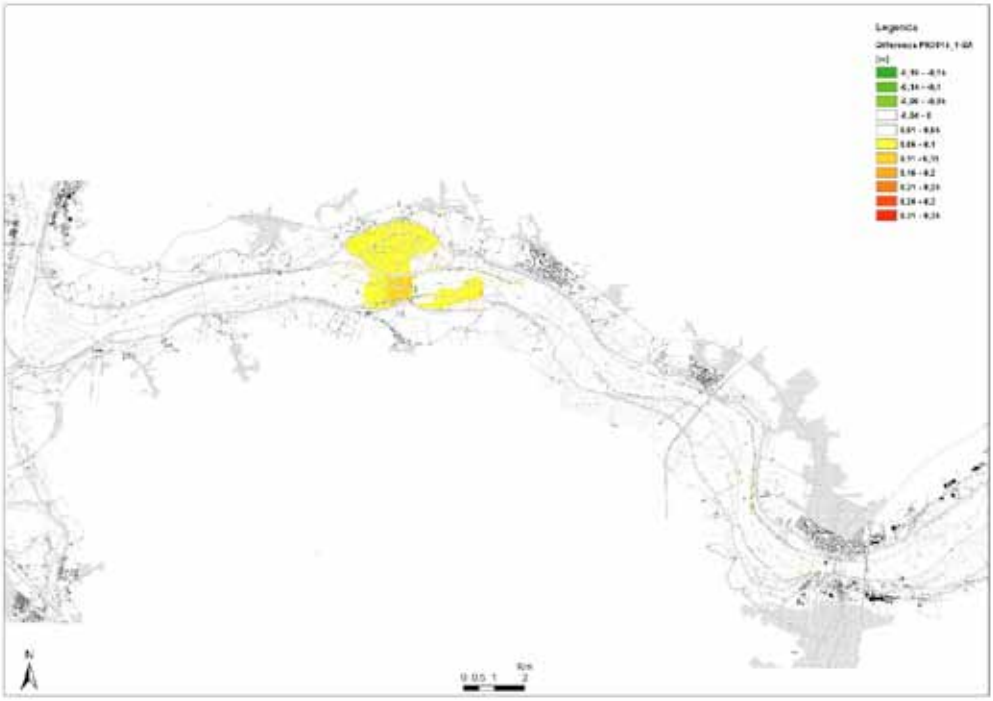


Figura 208 - Traversa n. 5 PR2015-variante 1 a Gaiba (FE) - Ferrara. Confronto livelli tra assetto di progetto 2015-1 e assetto attuale.

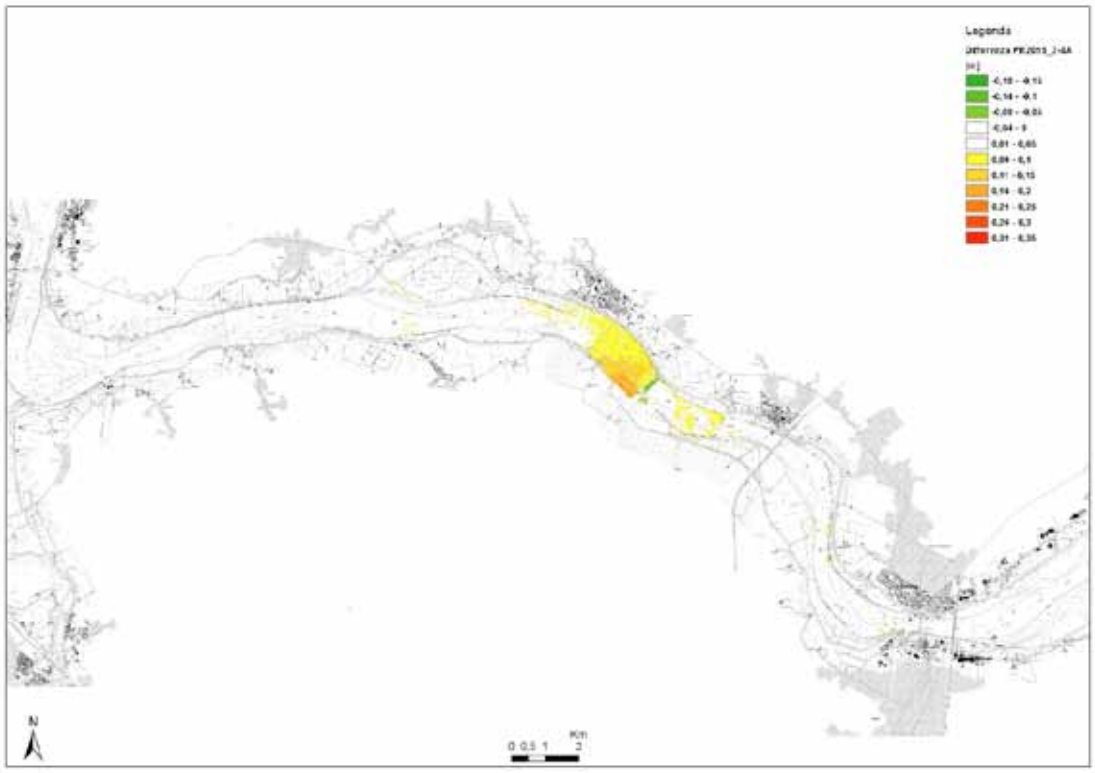


Figura 209 - Traversa n. 5 PR2015-variante 2 a Gaiba (FE) - Ferrara. Confronto livelli tra assetto di progetto 2015-2 e assetto attuale.

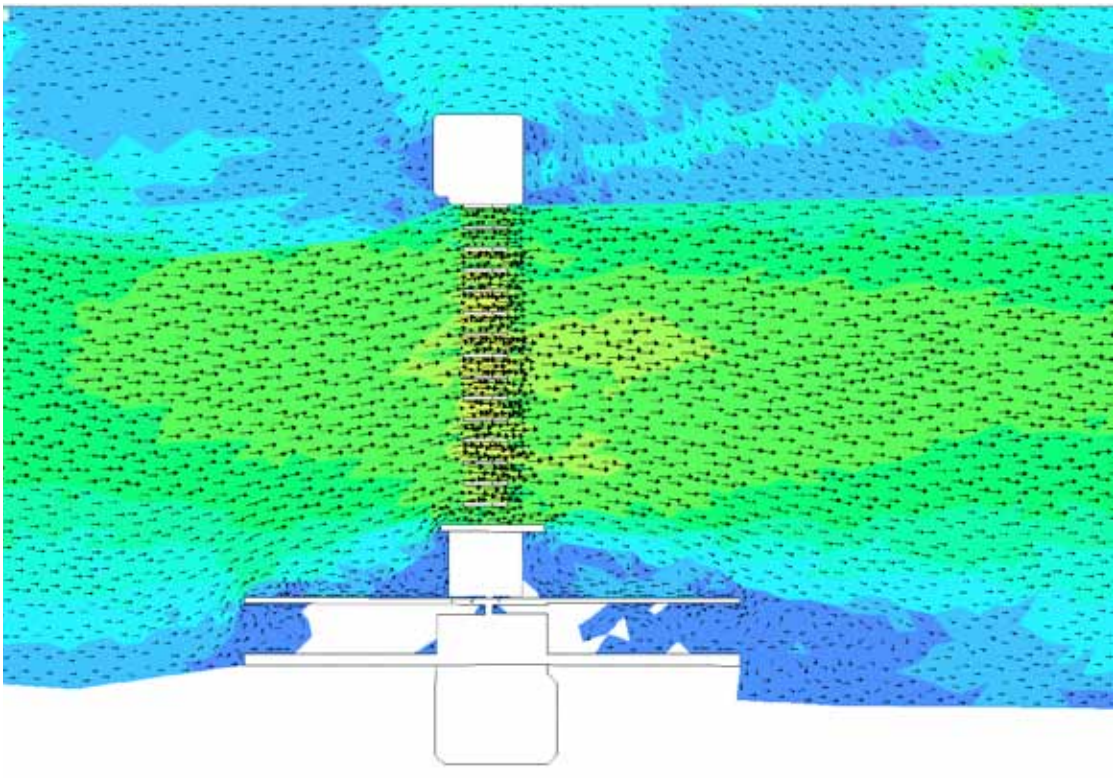


Figura 210 - Traversa n. 5 PR2015-variante 1 a Gaiba (FE) - Ferrara. Vettori velocità in prossimità dell'opera.

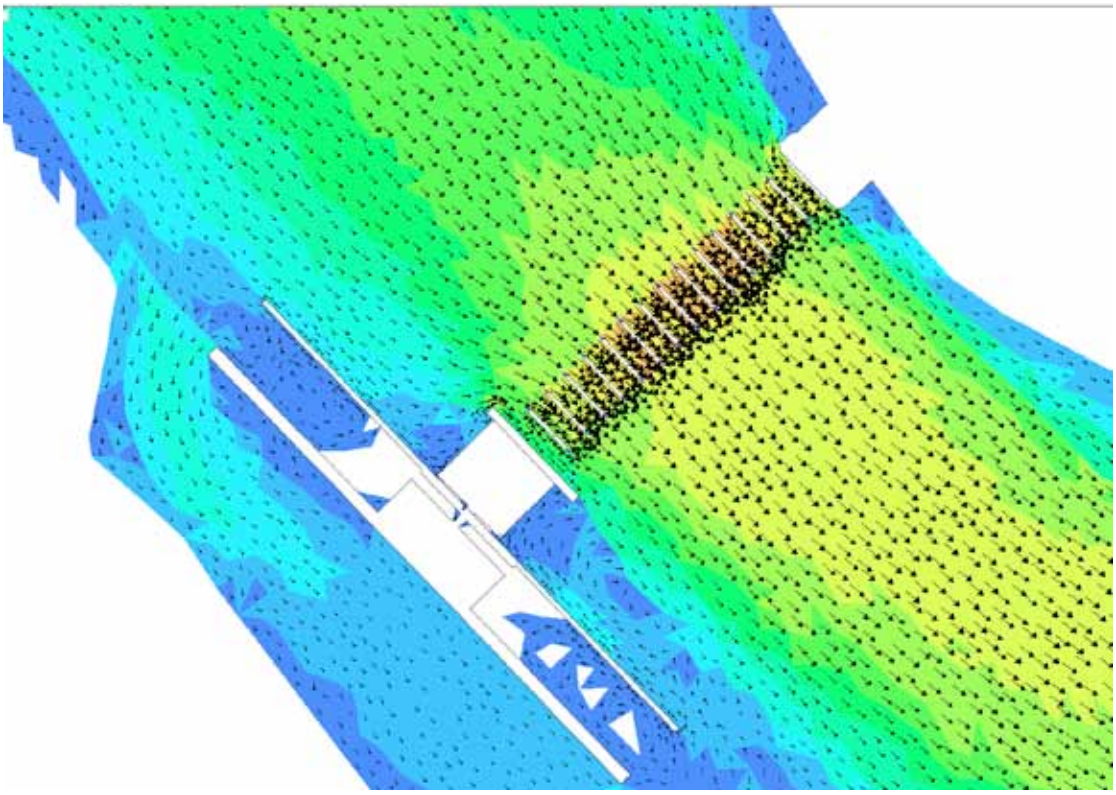


Figura 211 - Traversa n. 5 PR2015-variante 2 a Stienta (FE). Vettori velocità in prossimità dell'opera.

In sintesi emerge come lo scenario progettuale 2015 proposto nel presente studio sia significativamente più idoneo per la sicurezza idraulica del fiume e dei suoi argini maestri con riferimento alla piena PAI T200.

7.5.6 Sintesi dei risultati del modello 2D a fondo fisso delle traverse

Come sopra descritto i sopra descritti modelli matematici dei tratti fluviali interessati dalle opere hanno fornito importanti indicazioni relativamente al comportamento idraulico delle differenti configurazioni delle strutture, ben evidenziando i vantaggi legati alle soluzioni in variante qui proposte a fronte di quelle proposte nel progetto 2009.

In particolare:

- Traversa n.1 – L'opera in variante è risultata essere più efficiente rispetto all'opera PR2009 in quanto quest'ultima produce una perturbazione del campo di moto di entità ed estensione maggiori. Nello specifico, l'opera PR2009 comporta un innalzamento dei livelli a monte di circa 5 – 20 cm con punte di 25 – 30 cm localizzate nell'intorno delle opere in alveo, che si esaurisce a circa 4 km dalla traversa, mentre l'opera prevista nel progetto 2015 induce un innalzamento del livello idrico a monte di circa 5 cm in golena destra con punte di 10 cm in prossimità delle opere in alveo, che si esaurisce praticamente in prossimità dell'opera stessa (500 m). Tali risultati sono ancor più indicativi se si considera che lungo il tratto di fiume esaminato gli argini maestri non dispongono del franco idraulico minimo di sicurezza richiesto dalla normativa. Per quanto riguarda le velocità idriche, la configurazione PR2009 altera l'equilibrio attuale di scambio tra l'alveo principale e la lanca posta in sponda destra oltre a produrre una perturbazione del campo di moto di estensione maggiore rispetto la configurazione PR2015.
- Traversa n.2 – L'opera in variante è risultata essere più efficiente rispetto all'opera PR2009 in quanto quest'ultima produce una perturbazione del campo di moto di entità ed estensione maggiori. Nello specifico, l'opera PR2009 comporta un innalzamento del livello idrico a monte di circa 5-20 cm, con punte di 30-35 cm in prossimità delle opere in alveo, che si esaurisce a circa 12 km dalla traversa, mentre l'opera prevista nel progetto 2015 induce un innalzamento

del livello idrico in golena destra di circa 5-10 cm ed un abbassamento dei livelli idrici a monte e a valle della traversa di circa 5-10 cm, che si esaurisce a circa 3 km a monte dall'opera stessa. Tali risultati sono ancor più indicativi se si considera che lungo il tratto di fiume esaminato tra la sezione S37B e S35A gli argini maestri non dispongono del franco idraulico minimo di sicurezza richiesto dalla normativa ed in alcuni punti il franco idraulico risulta essere negativo. Per quanto riguarda le velocità idriche, la configurazione PR2009 produce una perturbazione del campo di moto maggiore rispetto la configurazione PR2015 con aumento delle velocità idriche e delle azioni di trascinamento sia nell'alveo principale sia in golena destra.

- Traversa n.3 – L'opera in variante è risultata essere più efficiente rispetto all'opera PR2009 in quanto quest'ultima produce una perturbazione del campo di moto di entità ed estensione maggiori. Nello specifico, l'opera PR2009 comporta un innalzamento dei livelli a monte di circa 5-10 cm, che si esaurisce a circa 700 m dalla traversa, mentre l'opera prevista nel progetto 2015 induce un innalzamento del livello idrico a monte inferiore a 10 cm, che non modifica sostanzialmente il profilo idrico attuale. Tali risultati sono ancor più indicativi se si considera che lungo il tratto di fiume esaminato tra la sezione S37B e S35A gli argini maestri non dispongono del franco idraulico minimo di sicurezza richiesto dalla normativa ed in alcuni casi (S35A; S35C) il franco idraulico risulta essere negativo. Per quanto riguarda le velocità idriche, entrambe le configurazioni producono una modesta variazione del campo di moto, anche se la configurazione PR2009 produce una perturbazione del campo di moto che si estende alla golena destra.
- Traversa n.4 – Le opere in variante sono risultate più efficienti rispetto all'opera PR2009 in quanto quest'ultima produce una perturbazione del campo di moto di entità ed estensione maggiori. Nello specifico, l'opera PR2009 comporta un innalzamento dei livelli a monte di circa 5-10 cm, con punte localizzate di 15-20 cm in prossimità delle opere in sponda destra in prossimità dell'argine maestro, che si esaurisce a circa 7 km dalla traversa; l'opera prevista nel progetto 2015-1 induce un innalzamento del livello idrico a monte inferiore a 5-20 cm, con punte 30-35 cm in prossimità delle opere in sponda sinistra, che si esaurisce a circa 5 km dalla traversa, mentre l'opera prevista nel progetto 2015-2 induce un innalzamento del livello idrico a monte inferiore a 5 cm, che non modifica sostanzialmente il profilo idrico attuale. Tali risultati sono ancor più indicativi se si considera che lungo il tratto di fiume esaminato gli argini maestri non dispongono del franco idraulico minimo di sicurezza richiesto dalla normativa. Nel complesso la configurazione migliore è risultata essere quella del progetto PR2015-2. Per quanto riguarda le velocità idriche, la configurazione PR2009 produce una perturbazione del campo di moto maggiore rispetto le configurazioni PR2015 con aumento delle velocità idriche e delle azioni di trascinamento sia nell'alveo principale sia in golena. Anche in questo caso la soluzione PR2015-2 è risultata essere la più efficiente tra quelle proposte in quanto induce una migliore distribuzione della portata di piena tra alveo principale e golena sinistra.
- Traversa n.5 - Le opere in variante producono entrambe modesti effetti sul campo di moto attuale, valutabili in aumenti dei livelli idrici localizzati entro un range di circa 5 cm – 20 cm. Tra le due configurazioni di progetto proposte la variante PR2015-2 induce un innalzamento dei livelli in prossimità dell'opera di circa 5 cm maggiore rispetto la configurazione PR2015-1ed un estensione della perturbazione di circa 800 m verso monte contro un estensione della perturbazione di circa 600 m nella configurazione PR2015-1. Nello specifico, l'opera PR2015-1 comporta un innalzamento dei livelli a monte di circa 10-15 cm, che si esaurisce a 600 m dalla traversa, mentre l'opera prevista nel progetto 2015-2 induce un innalzamento del livello idrico a monte variabile tra 5 cm e 20 cm che si esaurisce a circa 800 m dalla traversa. Nel complesso la configurazione migliore è risultata essere quella del progetto PR2015-1. Per quanto riguarda le velocità idriche, entrambe le configurazioni di progetto non modificano sensibilmente il campo di moto, si evidenzia un aumento delle velocità idriche soprattutto in prossimità della luce di passaggio delle traverse di circa 0,5 m/s rispetto le condizioni attuali.

8 POSSIBILE COMPLEMENTARIETÀ DELLE OPERE DI REGIMAZIONE E DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA

Dalle attività condotte nell'ambito del presente studio è emerso come le rilevanti criticità che attualmente affliggono il Po da Cremona all'incile del Po di Goro potranno essere corrette solo con molta gradualità e prudenza, e ciò indipendentemente dalle disponibilità finanziarie.

Si tratta, infatti, di un fiume fortemente dominato dalla dinamica sedimentologica avente risposte molto differenziate tratto per tratto in funzione delle variabili caratteristiche della vicenda idrologica e della morfologia dell'alveo e in relazione agli interventi antropici.

In tale ottica, le analisi dei due progetti di regimazione con traverse e di sistemazione a corrente libera, conducono a due differenti scenari di soluzione che possono essere considerati complementari anziché alternativi.

I due progetti rispondono infatti diversamente agli obiettivi di sistemazione fluviale, con relative differenze di costo: il progetto di regimazione è un progetto maggiormente multi-obiettivo con importanti ricadute ambientali, paesaggistiche, navigazionali, energetiche e di utilizzazione della risorsa idrica, mentre il progetto di sistemazione a corrente libera è soprattutto finalizzato alla navigazione e alla stabilizzazione planimetrica dell'alveo di magra a vantaggio della stabilità delle opere di difesa.

Ne consegue che un'attenta analisi dei diversi obiettivi conseguibili e della loro priorità potrebbe condurre a mettere a fuoco uno scenario integrato di interventi che consenta una graduale attuazione nel tempo calibrata sugli obiettivi progressivamente conseguibili.

Un programma a medio termine che si ponga l'obiettivo di recuperare le funzioni idroviarie del fiume, potrà quindi svilupparsi secondo fasi successive che possono vedere inizialmente la sistemazione del fiume a corrente libera, tra l'altro l'unica possibile nel tronco fluviale a valle di Stienta. A questa potrà seguire successivamente la realizzazione di alcune traverse previste nell'ambito del progetto di regimazione del fiume, quando se ne ravvisasse la necessità in rapporto alle condizioni economiche, trasportistiche, ambientali, morfologiche, ecc., tenendo soprattutto in considerazione quelle con maggior potenzialità in termini di miglioramento dell'attuale assetto morfologico ed idraulico del corso d'acqua.

Una possibile configurazione integrata (v. Figura 212), ovviamente da approfondire con tutte le istituzioni a vario titolo competenti ed interessate, che discende dall'analisi dell'insieme dei risultati ottenuti e dalle differenti situazioni dell'alveo, potrebbe consistere nella costruzione di sole tre traverse, precisamente le traverse 1, 2, 4 e nella conseguente estensione delle opere di sistemazione a corrente libera su tutti i tratti non interessati dai sostegni del livello indotti dalle traverse.



Figura 212 – Proposta di un Progetto integrato comprendente opere di regimazione e di sistemazione a corrente libera.

Tale scenario misto considererebbe in particolare che il tratto tra Boretto e Borgoforte già oggi si trova in condizioni pressoché accettabili di navigabilità in funzione degli interventi già realizzati e anche tenendo conto degli ulteriori interventi già progettati da AIPo, ciò che può far ritenere non essenziale la traversa n. 3. Inoltre la traversa n. 5 di Stienta appare meno importante e più complicata, essendo inserita in un tratto terminale del Po avente minore pendenza, minore larghezza dell'alveo di piena e maggiore permanenza dei livelli idrici.

Di contro le traverse 1 e 2 sono importanti in quanto sostengono i livelli di magra nel tratto più sensibilmente penalizzato dagli abbassamenti d'alveo registrati a valle di Cremona. Inoltre il profilo di rigurgito della traversa 1 ha importanza per una più sicura officiosità del collegamento Po - porto di Cremona, mentre quello della traversa 4 per una più sicura officiosità dell'incile del Mincio e quindi anche per il collegamento Mincio – conca di S. Leone.

Nei confronti delle opere di sistemazione a corrente libera, tale scenario misto confermerebbe praticamente tutte le nuove opere precedentemente indicate dalla traversa n. 4 fino all'incile del Po di Goro. Solo quelle inserite nel breve tratto tra foce Mincio e traversa 4 non sarebbero necessarie.

Così come non sarebbero necessarie le opere di completamento a corrente libera previste dal progetto AIPo nel tratto sotteso dalle traverse 1 e 2, mentre resterebbero validi gli interventi previsti nel tratto a valle di traversa 2, fino all'intorno di foce Oglio.

Si tratta perciò di una soluzione che, integrando i due progetti-base, potrebbe caratterizzarsi da significative gradualità realizzative in funzione delle progressive esigenze che potranno maturare nel tempo. Ad esempio, la preliminare realizzazione delle opere di sistemazione a corrente libera nei tratti non sottesi dalle tre traverse potrebbe già da sola consentire significativi incrementi del trasporto idroviario con conseguente migliore ottimizzazione della configurazione definitiva delle traverse e delle conche di navigazione.

8.1 INGEGNERIA DI MASSIMA DELLE OPERE NELLA SOLUZIONE INTEGRATA

Poiché questo scenario progettuale integrato comprende sia le traverse di sostegno 1, 2, 4 sia le opere di sistemazione a corrente libera, le corrispondenti tipologie e caratteristiche sono quelle già descritte nei capitoli precedenti, alle quali quindi si rimanda.

In particolare per le tre traverse di sostegno restano valide le considerazioni già esposte circa le tre configurazioni alternative analizzate: configurazione 1 "allargata", configurazione 2 "ristretta", configurazione 3 "ristretta" con centrale idroelettrica inserita nelle luci dello sbarramento.

In quel che segue vengono solo esposti gli aspetti che modificano il quadro complessivo di questa soluzione integrata e cioè gli aspetti inerenti la produzione idroelettrica delle tre traverse, nelle configurazioni 1 e 3, e i costi complessivi di costruzione e gestione.

8.1.1 Stima della produzione energetica

Ricordando che la produzione idroelettrica avviene per portate fino a 1'200 m3/s nella configurazione 1 "allargata" e fino a 750 m3/s nella configurazione 3 "ristretta", qui di seguito sono indicati i valori della produzione complessiva ritraibile dalle tre traverse estraendoli da quelli rispettivamente mostrati nel par. 7.3.2.

8.1.1.1 Produzione energetica complessiva delle traverse 1, 2, 4 nella configurazione 1 "allargata"

Richiamando i dati energetici esposti nel par. 6.3.4 la produzione energetica media annua complessivamente ritraibile dai tre sbarramenti 1, 2, 4 è pari a circa 400 GWh/anno come risulta dalla seguente tabella riepilogativa.

Traversa	Energia media annua (GWh/anno)
Traversa 1 a Roccabianca	162,7
Traversa 2 a Mezzano Rondani	127,9
Traversa 4 a Quingentole	117,0
Totale	407,6

Tabella 78 – Produzione energetica delle 3 traverse – configurazione 1

8.1.1.2 Produzione energetica complessiva delle traverse 1, 2, 4 nella configurazione 3 "ristretta"

Richiamando i dati energetici nel par.6.3.4 la produzione energetica media annua complessivamente ritraibile dai tre sbarramenti 1, 2, 4, limitata per effetto della portata limite turbinabile di 750 m3/s, è pari a circa 360 GWh/anno come risulta dalla seguente Tabella 79 riepilogativa.

Traversa	Energia media annua (GWh/anno)
Traversa 1 a Roccabianca	146,6
Traversa 2 a Mezzano Rondani	113,4
Traversa 4 a Quingentole	99,6
Totale	359,6

Tabella 79 – Produzione energetica delle 3 traverse – configurazione 3

8.2 Costi di costruzione e costi di gestione della soluzione integrata

Richiamando i costi esposti nel par. 7.3.4, qui di seguito sono indicati i costi di costruzione e di gestione della soluzione integrata come somma dei valori delle tre traverse 1, 2, 4, nelle loro tre configurazioni precedentemente descritte, e dei costi delle opere di sistemazione a corrente libera nei tratti non regimati dalle suddette traverse. In particolare, per quanto riguarda il tratto tra Cremona e foce Mincio sono stati considerati gli interventi di sistemazione previsti tra Boretto e foce Oglio, in quanto la traversa 3 non è inclusa nella soluzione integrata, e quelli posti nei tratti ove l'effetto di rigurgito indotto dalle traverse si è sostanzialmente esaurito; per il tratto tra foce Mincio e l'incile del Po di Goro sono stati considerati tutti gli interventi posti a valle della traversa 4.

Traverse	Costi di costruzione € x 1.000.000	Costi di gestione € x 1.000.000
Traversa 1 a Roccabianca	618	3.1
Traversa 2 a Mezzano Rondani	653	3.1
Traversa 4 a Quingentole	618	3.0
	1'889	9.2
Opere a corrente libera	Costi di costruzione € x 1.000.000	Costi di gestione € x 1.000.000
tratto Cremona – foce Mincio	55	0.7
tratto foce Mincio – Po di Goro	457	3.9
	512	4.6
	TOTALE 2'401	TOTALE 13,8

Tabella 80 – Costi di costruzione e gestione della soluzione integrata (traverse con configurazione 1 "allargata")

Traverse	Costi di costruzione € x 1.000.000	Costi di gestione € x 1.000.000

Traversa 1 a Roccabianca	376	1.8
Traversa 2 a Mezzano Rondani	412	1.9
Traversa 4 a Quingentole	376	1.7
	1.164	5.4
Opere a corrente libera	Costi di costruzione € x 1.000.000	Costi di gestione € x 1.000.000
tratto Cremona – foce Mincio	55	0.7
tratto foce Mincio – Po di Goro	457	3.9
	512	4.6
	TOTALE 1'676	TOTALE 10

Tabella 81 – Costi di costruzione e gestione della soluzione integrata (traverse con configurazione 2 "ristretta" senza centrale)

Traverse	Costi di costruzione € x 1.000.000	Costi di gestione € x 1.000.000
Traversa 1 a Roccabianca	515	2.8
Traversa 2 a Mezzano Rondani	551	2.8
Traversa 4 a Quingentole	516	2.7
	1.582	8.3
Opere a corrente libera	Costi di costruzione € x 1.000.000	Costi di gestione € x 1.000.000
tratto Cremona – foce Mincio	55	0.7
tratto foce Mincio – Po di Goro	457	3.9
	512	4.6
	TOTALE 2'094	TOTALE 12.9

Tabella 82 – Costi di costruzione e gestione della soluzione integrata (traverse con configurazione 3 "ristretta" con centrale in traversa)

9 APPROFONDIMENTI MODELLISTICI SUL TRASPORTO SOLIDO

9.1 PREMESSA

In funzione delle analisi prima esposte nei riguardi sia del progetto di sistemazione a corrente libera (Cap. 6) sia del progetto di regimazione mediante cinque traverse di sostegno (Cap. 7), il presente capitolo riveste importanza fondamentale in quanto è dedicato all'analisi delle influenze indotte dalle due tipologie di intervento sulla dinamica sedimentologica del Po e quindi anche, di riflesso, sui regimi del Delta del Po e del litorale adriatico.

Naturalmente si tratta di analisi che devono essere anche riferite alla condizione attuale delle dinamiche morfologiche del Po, dettagliatamente indagate nel Cap. 4, caratterizzate da accentuate modificazioni d'alveo che ne hanno determinato un progressivo approfondimento e canalizzazione soprattutto nel tratto tra Cremona e foce Taro. Ciò implica che le due suddette ipotesi progettuali devono confrontarsi anche con una situazione attuale presentante elevate criticità che comunque devono essere superate sia per conseguire le finalità strategiche programmate per il Po sia per il definitivo soddisfacimento dei requisiti ambientali e di sicurezza delle Direttive europee 2000/60 e 2007/60.

9.2 STUDI PRECEDENTI

Nell'ambito dello studio AIPo 2009 di "Supporto tecnico-amministrativo alle attività ed agli studi propedeutici per la definizione progettuale degli interventi relativi alla regimazione del Po mediante bacinizzazione della tratta da Cremona a foce Mincio (E-SPEC.-824)", sono state effettuate analisi mediante un modello matematico tarato sui dati e sulle risultanze del Programma Generale di Gestione dei Sedimenti del fiume Po dell'Autorità di bacino del fiume Po, volte a definire l'impatto del progetto di regimazione del fiume Po sul bilancio del trasporto solido. Le valutazioni effettuate hanno permesso di giungere alle seguenti considerazioni:

- gli effetti nei riguardi del trasporto solido risultano essere distinti tra le zone poste in prossimità delle opere di sostegno ed i lunghi tratti di asta fluviale a monte dei sostegni. Nelle zone prossime alle opere di sostegno dei livelli si ha che l'effetto indotto dalle opere è trascurabile, in quanto esse sono state configurate in modo tale da non rappresentare un ostacolo fisico al transito del materiale litoide (le soglie fisse sono poste in corrispondenza del fondo alveo). Con riferimento ai tratti di asta fluviale posti a monte dei sostegni, invece, si ha che l'innalzamento dei livelli (per portate inferiori a 2'000-2'500 m3/s) ed il conseguente effetto di rigurgito verso monte induce la sedimentazione del materiale litoide per diversi chilometri. Quando però i sostegni vengono aperti (per portate superiori a 2'000-2'500 m3/s) si instaurano condizioni di deflusso in grado di rimobilizzare il materiale depositato;
- nella quasi totalità delle sezioni esaminate, il valore della capacità di trasporto medio annuo di progetto si mantiene sempre al di sopra (o prossimo) del valore medio annuo del trasporto solido disponibile, noto dal Programma Generale di Gestione dei Sedimenti. Pertanto si può affermare che, nel medio e lungo termine, il trasporto solido totale (di fondo e in sospensione) medio annuo resta pressoché invariato o comunque prossimo al valore attuale;
- la regolazione dei livelli indotta dalle traverse tende, a parità di trasporto medio, ad accentuare l'intermittenza del trasporto solido, sia al fondo che in sospensione (portata solida più ridotta rispetto all'attuale nei periodi di basse portate quando gli sbarramenti sono chiusi, portata solida maggiore dell'attuale nei periodi di portate maggiori quando gli sbarramenti sono aperti);
- si ha un incremento del trasporto solido in sospensione che potrebbe accelerare il fenomeno di trasporto solido verso valle, con beneficio sia per il tratto intermedio, compreso tra la quarta traversa

e Pontelagoscuro, sia per il Delta del Po e il litorale Adriatico;

- la diminuzione relativa del trasporto solido di fondo, a vantaggio del trasporto torbido, comporta benefici nel tratto oggetto di regimazione, poiché il deposito conseguente potrà contrastare efficacemente l'attuale tendenza all'erosione e all'abbassamento della quota di fondo alveo. Per contro, tale fenomeno potrebbe innescare una maggiore dinamicità nel tratto fluviale immediatamente a valle della quarta traversa, in cui, per un breve tratto (a monte di Bergantino – prog. Km 524), la tendenza di fondo alveo attuale è all'approfondimento. A valle di Bergantino, invece, dove la tendenza attuale dell'alveo è al deposito, tale maggiore intermittenza nel tratto regimato potrebbe invece favorire un riequilibrio delle quote di fondo alveo;
- nel tratto prossimo al Delta viene confermata la tendenza evidenziata nel Programma Generale di Gestione dei Sedimenti, secondo cui il trasporto di fondo del fiume Po, dall'incile verso il Delta, tende a "convergere" con il trasporto in sospensione. Ciò è da attribuire alla naturale selezione granulometrica dei sedimenti da monte verso valle, verso componenti granulometriche via via più "fini";
- essendo il trasporto in sospensione strettamente legato al regime delle portate liquide e non essendo queste minimamente modificate, tale componente del trasporto resta non solo inalterata ma del tutto compatibile anche in presenza dei maggiori contributi torbidi in arrivo dal tratto regimato;
- l'incremento del trasporto in sospensione nel tratto regimato potrebbe migliorare le condizioni di alimentazione solida del Delta;
- occorre inoltre osservare che la maggiore intermittenza del trasporto in sospensione è indotta dalla regimazione circa 100 km a monte dell'incile del Delta. Nel Delta è plausibile uno smorzamento di tale effetto, anche per il contributo al trasporto solido proveniente dal tratto intermedio (tra il quarto sbarramento e Pontelagoscuro).

Per quanto riguarda la proposta di regimazione del fiume Po, le analisi relative al trasporto solido svolte nell'ambito delle "Attività e studi propedeutici relativi alla regimazione del Po nel tratto tra Cremona e foce Mincio – ipotesi, analisi e verifiche preliminari" mediante l'incarico di "Supporto tecnico-amministrativo alle attività ed agli studi propedeutici per la definizione progettuale degli interventi relativi alla regimazione del Po mediante bacinizzazione della tratta da Cremona a foce Mincio (E-SPEC.-824)" affidato da AIPo alla società ETATEC s.r.l. e STUDIO PAOLETTI INGEGNERI ASSOCIATI, sono state condotte mediante un modello matematico che riproduce la serie continua delle portate giornaliere (1982 – 2006) e tarato sui dati e sulle risultanze del Programma Generale di Gestione dei Sedimenti del fiume Po. Tale modello è caratterizzato da alcune ipotesi semplificative (il modello non considera i legami sedimentologici tra sezioni consecutive), ritenute più che accettabili per gli scopi e il grado di approssimazione richiesti nella prima fase di studio dell'intervento proposto.

Per quanto riguarda, invece, il progetto di sistemazione a corrente libera, le analisi relative al trasporto solido sono state svolte mediante il modello bidimensionale a fondo mobile MODAIPO, di proprietà AIPo, implementato dal CUDAM dell'Università degli Studi di Trento. Lo studio condotto dal CUDAM ha voluto verificare che le opere di sistemazione a corrente libera in progetto, oltre a quelle già esistenti, non provochino un sistematico peggioramento dell'attuale trend evolutivo in atto, caratterizzato sostanzialmente da erosione generalizzata del fondo alveo e da deposito a tergo delle opere di difesa (soprattutto pennelli), che come conseguenza portano ad una sistematica canalizzazione ed incassamento dell'alveo inciso del fiume Po.

La suddetta analisi si è basata sulla simulazione dell'evoluzione morfologica del fiume Po su un arco temporale di una decina di anni a partire dallo stato attuale. Il modello è stato implementato adottando una granulometria costante lungo l'intero tratto in esame e pari a d50 = 1,1 mm e le portate solide, in corrispondenza di ciascun ingresso (Po a monte di Cremona e affluenti), sono state calcolate dal CUDAM con una formulazione che valuta la portata in ingresso per mezzo della locale capacità di trasporto.

Il CUDAM afferma che "tali scelte non devono quindi indurre l'idea che tali simulazioni possano avere valenza di ricostruzione delle modificazioni morfologiche misurate nel corso degli ultimi dieci anni e che quindi possano essere confrontate con i dati di campo. Pertanto, le simulazioni possono essere utilizzate

esclusivamente con una valenza comparativa tra le soluzioni analizzate".

9.3 OBIETTIVI DELLA MODELLAZIONE

Il presente studio intende affinare ed approfondire le valutazioni relative alle dinamiche evolutive del trasporto solido del fiume Po, tra Cremona e l'incile del Po di Goro, con riferimento alle condizioni di assetto attuale ed alle due proposte di intervento: quella di regimazione mediante la costruzione di traverse fluviali e quella di sistemazione a corrente libera.

In particolare, il modello implementato e di seguito descritto vuole essere non uno strumento predittivo con valenza di ricostruzione delle modificazioni morfologiche sperimentali ma un mezzo utile sia per confrontare le diverse configurazioni (stato attuale, regimazione, sistemazione a corrente libera) che per fornire indicazioni per la progettazione delle opere. Il modello costituisce la piattaforma per futuri sviluppi e verifica degli interventi nell'ottica di ottimizzare le soluzioni al fine del raggiungimento complessivo degli obiettivi generali propri del progetto.

È bene evidenziare che la lettura dei risultati delle simulazioni deve considerare quelli che sono i limiti del modello di calcolo, quali la sensibilità alle condizioni a contorno in un tratto di lunghezza dell'ordine di qualche km, la tendenza in alcuni casi ad appiattire la sezione d'alveo, non essendo un modello tridimensionale, e le modalità di taratura del modello, descritte di seguito.

9.4 IL MODELLO BIDIMENSIONALE

9.4.1 Il codice di calcolo MIKE 21C

Lo sviluppo dello studio idraulico-morfologico del fiume Po, ai fini degli obiettivi dell'intero studio, costituisce un aspetto di primaria importanza per la valutazione delle dinamiche del trasporto solido di fondo e in sospensione lungo l'intero tratto compreso tra Isola Serafini e l'incile del Po di Goro e per l'individuazione degli effetti che potrebbero indurre gli interventi di sistemazione.

L'attività è svolta mediante l'applicazione di un modello idraulico bidimensionale a fondo mobile, MIKE 21C, distribuito dal Danish Hydraulic Institute (DHI), in grado di rappresentare con la necessaria accuratezza le dinamiche morfologiche ed evolutive del corso d'acqua e restituire i risultati per il tratto oggetto di studio in termini idraulici e morfologici.

Il codice di calcolo MIKE 21C (dove la C sta per "Curvilineo") è un modello bidimensionale di tipo "morfologico", che integra su griglia curvilinea le equazioni di continuità e di conservazione della quantità di moto alle acque basse e l'equazione convettiva-diffusiva per la simulazione della dinamica del materiale sospeso, ma considerando in maniera integrata sulla verticale gli effetti sul trasporto solido del flusso elicoidale (flusso secondario), caratteristica tipicamente tridimensionale [DHI Water & Environment. 2002]. In genere, il flusso elicoidale non ha una forte influenza sui modelli di flusso caratterizzati da alti rapporti larghezza / profondità, ma nei casi come quello in esame può avere una notevole influenza sulla direzione di trasporto dei sedimenti e dei cambiamenti morfologici (Figura 213).

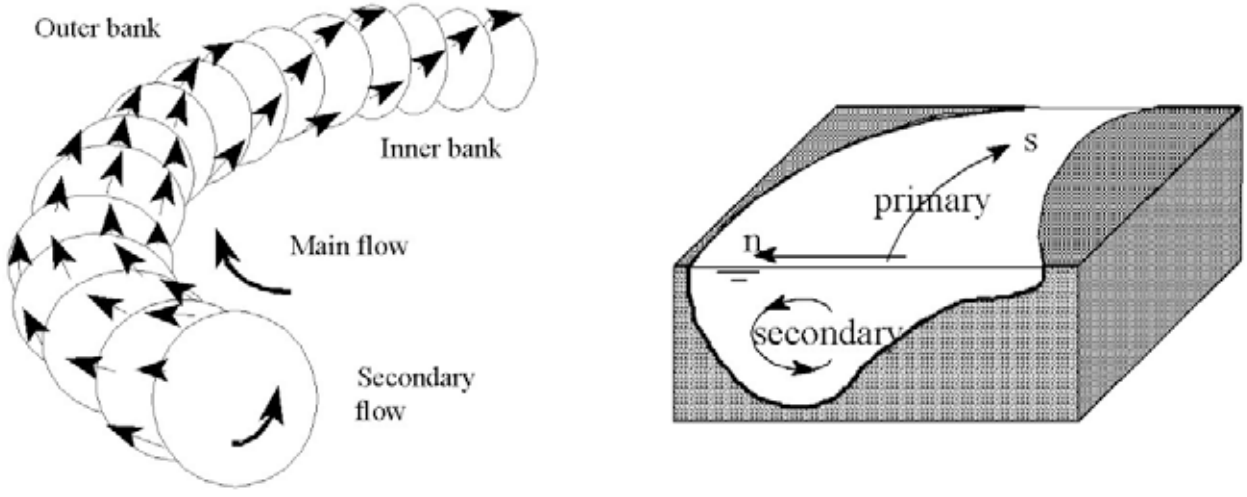


Figura 213 – Schematizzazione del flusso elicoidale.

La stabilità e l'efficienza della soluzione numerica permettono di rappresentare, con un modello disaccoppiato, il termine di flusso secondario (flusso elicoidale) ed il trasporto solido al fondo ed in sospensione dovuto all'effetto combinato del moto bidimensionale e del flusso secondario: ad ogni passo di calcolo il modello riaggiorna la geometria dei fondali sulla griglia curvilinea e rappresenta, dinamicamente, i processi di erosione e di deposito.

Le equazioni di Navier-Stokes specializzate per le acque basse insieme all'equazione convettiva-diffusiva bidimensionale vengono risolte su griglia curvilinea, dove possono essere inserite le opere idrauliche esistenti ed in progetto, che meglio si adatta a morfologie sinuose degli alvei fluviali naturali.

Il modello richiede come dati di input, oltre alle condizioni al contorno idrologiche e dei sedimenti, le caratteristiche granulometriche e le condizioni di scabrezza rappresentative dei diversi ambiti (alveo principale, barre fluviali, golene e aree agricole).

I risultati ottenibili dalle simulazioni, per quanto riguarda la parte idrodinamica, sono costituiti dai livelli e dagli idrogrammi di portata nel corso d'acqua nelle sezioni di interesse, dalla restituzione planimetrica delle aree allagate e delle velocità di deflusso.

Per quanto riguarda la componente di trasporto solido il modello è in grado di rappresentare le variazioni morfologiche della batimetria; può inoltre fornire un'analisi dei volumi di sedimento movimentati e contribuire all'individuazione degli ambiti con comportamento morfologico differente.

Gli scenari d'intervento vengono schematizzati direttamente nella geometria del modello inserendo le opere di regolazione, di difesa (trasversali o longitudinali) ed in alcuni casi modificando la geometria della griglia di calcolo, al fine di adattarla al meglio alle nuove curve imposte negli scenari di progetto.

9.4.1.1 Discretizzazione spaziale

La griglia curvilinea viene spesso adottata al fine di ridurre gli errori di troncamento nell'approssimazione numerica delle derivate spaziali in prossimità dei contorni curvilinei tipici degli alvei fluviali: ciò è particolarmente importante per simulare correttamente l'erosione spondale ed è comunque auspicabile per meglio seguire le variazioni nella direzione del flusso principale a tutto vantaggio dell'accuratezza del modello numerico [Mosselman E., 1992].

Il MIKE21C utilizza il metodo delle differenze finite su griglia curvilinea, ponendo in corrispondenza biunivoca lo spazio computazionale con la griglia curvilinea su cui viene discretizzato lo spazio del modello.

Per ottenere una soluzione numerica accurata è necessario rispettare alcune regole durante la generazione della griglia curvilinea, evitando ad esempio repentine variazioni delle dimensioni della maglia e dell'inclinazione locale.

9.4.1.2 Discretizzazione temporale

La discretizzazione temporale presenta peculiarità tipiche della modellazione dei processi fluviali. Il MIKE21C utilizza l'approccio disaccoppiato per il calcolo dell'idrodinamica e della dinamica morfologica: le variazioni morfodinamiche sono effettivamente molto più lente rispetto all'evoluzione idrodinamica, in ragione delle diverse inerzie che caratterizzano i due processi, tuttavia la relativa interdipendenza dei fenomeni ne richiede la simulazione contemporanea, dunque il processo più veloce condizionerebbe la scelta dell'intervallo di tempo per il calcolo dell'intera evoluzione.

Simulando separatamente l'idrodinamica e la morfodinamica alternandone il processamento così da includere nel risultato il reciproco effetto, è possibile utilizzare time step differenti commisurati ciascuno alla velocità tipica della dinamica rappresentata [DHI Water & Environment. 2002]: il MIKE21C prevede quindi l'indicazione di un time step idrodinamico e di un time step sedimentario maggiore (multiplo di quello idrodinamico).

Al fine di mantenere una buona stabilità numerica, è consigliabile che il time step idrodinamico sia tale da comportare un numero di Courant inferiore a 3÷5, espresso dalla seguente formula:

$$CR_{HD} = \frac{U + \sqrt{g \cdot h}}{\Delta s} \cdot \Delta t < 3 - 5$$

Fissata la spaziatura di griglia Δs e noti velocità e tiranti attesi, è possibile quindi calcolare il time step idrodinamico. Naturalmente la spaziatura di griglia è dettata dalle risoluzione con cui si vuole rappresentare il modello, tenendo conto dei conseguenti tempi di calcolo.

Sempre nell'intento di ottimizzare i tempi di calcolo il modello prevede anche l'introduzione di un "General time step", multiplo M di quello idrodinamico. Questo espediente, piuttosto efficace nel ridurre i tempi di calcolo, introduce alcune approssimazioni, pertanto la scelta del valore del "General time step" va effettuata sulla base dei tempi caratteristici di propagazione delle perturbazioni nel sistema idraulico.

Le simulazioni effettuate sono caratterizzate da un time step idrodinamico pari a 1 secondo e da un "General time step" di 2 secondi, scelto sulla base di alcuni test iniziali.

9.4.2 La griglia curvilinea e la batimetria

Il grado di risoluzione del dominio di calcolo è proporzionale ai tempi di simulazione: si è cercato quindi il giusto compromesso per poter rispondere agli obiettivi dello studio, secondo tempi computazionali accettabili.

Vista la lunghezza del tratto da esaminare e la complessità di alcune porzioni di fiume, si è deciso di suddividere l'area di studio, che si estende da Cremona all'incile del Po di Goro per una lunghezza complessiva di circa 235 km e che comprende l'intero ambito fluviale compreso tra gli argini maestri, in 10 tratti, la cui estensione è descritta nella seguente tabella ed in Figura 214:

Tratto	INIZIO	FINE
T1a	Cremona	foce Arda (p.k. 391)
T2	foce Arda (p.k. 391)	foce Taro (p.k. 413)
T3	foce Taro (p.k. 413)	foce Crostolo (p.k. 448)
T4	foce Crostolo (p.k. 448)	monte foce Oglio (p.k. 461)
T5	monte foce Oglio (p.k. 461)	Borgoforte (p.k. 472)
T6	Borgoforte (p.k. 472)	foce Mincio (p.k. 493)
T7	foce Mincio (p.k. 493)	valle Ostiglia (p.k. 510)
T8	Ostiglia (p.k. 510)	foce Panaro (p.k. 560)
T9	foce Panaro (p.k. 560)	Polesella (p.k. 580)
T10	Polesella (p.k. 580)	Po di Goro (p.k. 604)

Tabella 83 – Descrizione dei tratti in cui è stata suddivisa l'area di studio.

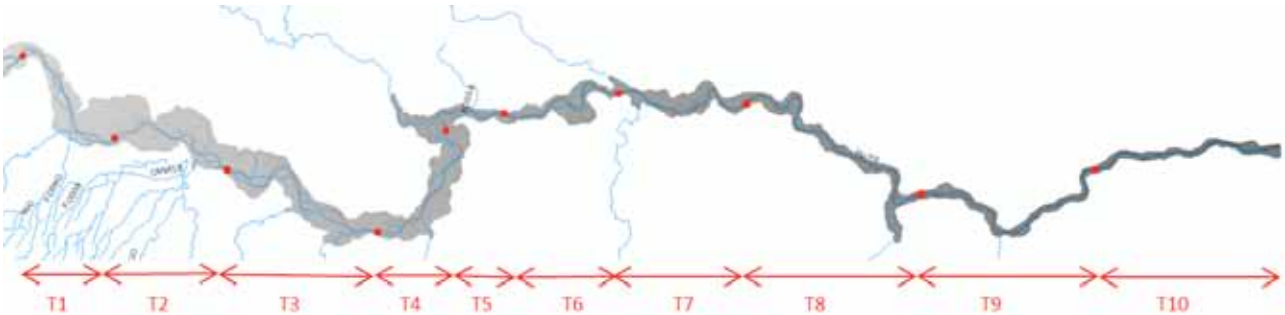


Figura 214 – Suddivisione dell'area di studio in tratti di calcolo per la modellazione.

La griglia curvilinea per la modellazione dell'alveo e dell'intera area di studio è stata costruita seguendo l'andamento delle linee di flusso della corrente, in modo da simulare in maniera quanto più accurata i moti secondari in curva, e tenendo conto della presenza di golene, di argini, di opere idrauliche, di rilevati, ecc.

Per cogliere l'andamento dell'alveo e schematizzare con cura le variazioni di direzione e di larghezza del corso d'acqua, la griglia è stata costruita per tratti successivi con dimensioni delle celle di calcolo variabili in funzione delle caratteristiche morfologiche del tratto stesso. La larghezza media delle celle che descrivono l'alveo attivo è di circa 10 metri.

Una volta costruita la griglia curvilinea di calcolo, si è passati alla costruzione dell'altimetria del terreno della griglia stessa: la quota di ciascuna delle celle è stata calcolata attribuendo il valore medio delle quote della porzione del DTM entro la cella stessa: i rilevati arginali e le opere idrauliche sono inseriti nel modello andando ad assegnare, mediante una procedura in ambiente GIS, le quote esatte (e non mediate sull'area) alle celle della griglia occupate dalle stesse opere. Si è poi assegnata la condizione di non erodibilità a tali celle.

Le quote batimetriche iniziali del calcolo sono state ricavate dal DTM del 2005, mentre per la descrizione plano-altrimetrica dell'area da modellare ci si è avvalsi del supporto cartografico costituito da ortofoto e CTR georeferenziate, nonché del hillshade dello stesso DTM del 2005.

Le celle dell'alveo attivo sono state considerate erodibili, assegnando uno spessore dello strato erodibile pari a 6 – 7 metri; le isole, le barre vegetate e le golene invece sono state considerate non erodibili, quindi pur essendo parte del dominio di calcolo su tali aree possono avvenire solo fenomeni deposizionali.

La Figura 215 indica come sono state inserite le opere lineari (curve, pennelli, traverse) nella griglia di calcolo, assegnando la condizione di non erodibilità delle celle dove si trova l'opera.

La Figura 216 riporta un esempio della griglia di calcolo curvilinea, nel tratto T5 in corrispondenza di foce Oglio e la batimetria assegnata a partire dal DTM 2005 nello stesso tratto: la griglia segue le forme morfologiche (canale principale, canali secondari, isole) e discretizza con maggior dettaglio la parte in alveo.

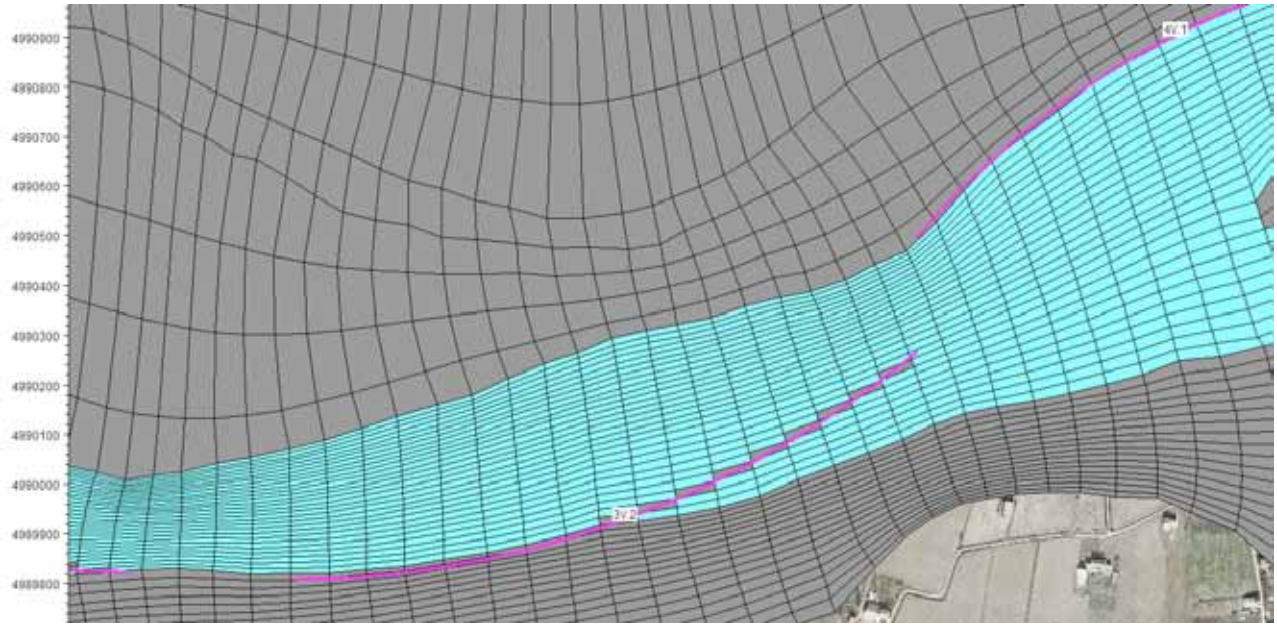


Figura 215 – Schematizzazione delle celle non erodibili in corrispondenza delle opere: celle erodibili in azzurro, non erodibili in grigio, opere in magenta.

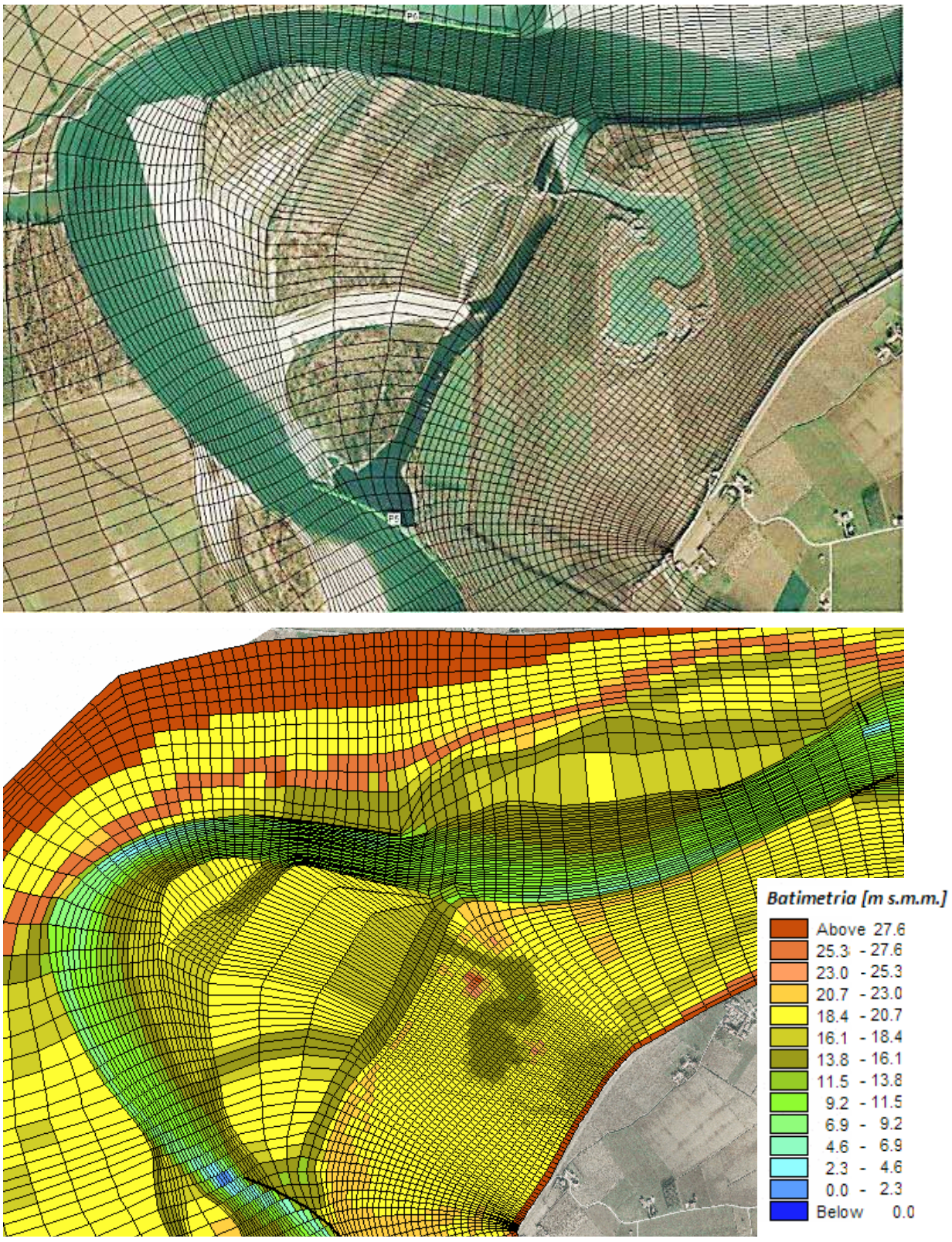


Figura 216 – Estratto della griglia curvilinea nel tratto 5, in corrispondenza di foce Oglio, (in alto) e batimetria assegnata alla griglia ricavata dal DTM 2015 nella stessa zona (in basso)

9.5 DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO

9.5.1 Condizioni al contorno

Per poter implementare i modelli a fondo mobile, sia estesi che a scala di dettaglio, occorre definire le condizioni al contorno in termini di idrogrammi di portata liquida, idrogrammi di portata solida, granulometria dei sedimenti.

Le condizioni idrauliche sono state determinate considerando gli idrogrammi registrati nel periodo 2005 – 2014, che appare significativo dal punto di vista sia idrologico che sedimentologico in quanto caratterizzato da regimi idraulici molto variabili (magra del 2006, piena del 2009): oltre ai dati misurati da ARPA, per il fiume Po sono stati utilizzati i dati ufficiali presenti negli annali relativi alle stazioni di Cremona, Boretto, Borgoforte, Sermide, Ficarolo, Pontelagoscuro.

I sedimentogrammi in ingresso al modello, nella sezione iniziale di calcolo appena a valle di Isola Serafini, sono stati determinati applicando il criterio di ridistribuzione, giorno per giorno e anno per anno, del valore del trasporto solido di fondo effettivo determinato attraverso le analisi del PGGS.

Tale criterio, dovendo necessariamente soddisfare la condizione di congruenza per cui ad una capacità di trasporto giornaliera trascurabile o nulla (tipica di condizioni idrauliche di magra) debba corrispondere anche un valore di trasporto solido in ingresso del tutto trascurabile o nullo, non può che essere correlato alla capacità di trasporto del corso d'acqua.

Premesso che alla sezione di interesse (sezione 26B) il PGGS fornisce il trasporto solido medio annuo pari a circa 4 Mm3/anno, desunto dall'analisi morfologica quantitativa riferita la periodo 1982-2005, la ridistribuzione giornaliera della portata media annua, in funzione della relativa capacità di trasporto, deve necessariamente essere riferita all'intervallo temporale 1982-2005. Una volta ricavata la funzione che consente di determinare la portata solida di fondo giornaliera, in funzione della portata liquida, è stato possibile ricalcolare la serie degli idrogrammi solidi riferiti all'intervallo temporale oggetto della modellazione bidimensionale a fondo mobile (2005 – 2015).

In base alle suddette premesse, la capacità di trasporto giornaliera nell'intervallo temporale 1982-2005 è stata calcolata applicando il "modello numerico di trasporto solido" implementato dagli scriventi a supporto delle "Attività e studi propedeutici relativi alla regimazione del Po nel tratto tra Cremona e foce Mincio", per i dettagli del quale si rimanda alla relazione "Ipotesi, analisi e verifiche preliminari", redatta nell'aprile 2009.

Di seguito, si riporta una sintesi degli algoritmi e della schema concettuale utilizzati per il calcolo della portata solida di fondo giornaliera nel periodo 1982-200:

1. Calcolo della capacità di trasporto giornaliera mediante la seguente equazione:

$$Q_S = 10 Q_L \frac{\tau_0 - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} i \Phi(Re)$$ (Shields, da Da Deppo, 2004)

in cui:

Q_S = capacità di trasporto;

Q_L = portata liquida;

τ_0 = pressione tangenziale;

τ_{cr} = pressione tangenziale critica;

γ_s = peso specifico dei granuli;

γ_w = peso specifico dell'acqua;

i = gradiente idraulico;

$\Phi(Re)$ = coefficiente dipendente oltre che dalle caratteristiche granulometriche del sedimento, dal numero di Reynolds del sedimento.

Sulla base dei risultati sperimentali di Shields & Krey, per valori del diametro dei granuli (d) molto piccoli rispetto ai valori del tirante idraulico (h), come nel caso del F. Po, il valore limite di è pari

a 0,06. Assumendo tale valore, il modello calcola, giorno per giorno, il valore della capacità di trasporto.

2. calcolo della capacità di trasporto media annua, ottenuta come media nell'intero periodo di 26 anni (1982 – 2006);

3. confronto della capacità di trasporto media annua (CT_{media_annua}) con il valore medio annuo del trasporto solido effettivo del Programma generale di Gestione dei Sedimenti(TS_{medio_annuo}). Possono verificarsi le seguenti condizioni:

a) CT_{media_annua} TS_{medio_annuo}

b) $CT_{media\_annua} < TS_{medio\_annuo}$

4. Nel caso in cui si verifichi la condizione "b", si aumenta il coefficiente "$\Phi(Re)$" e si ripete iterativamente la procedura di calcolo a partire dal punto "1." (calcolo della capacità di trasporto giorno per giorno), fino al raggiungimento della condizione di convergenza tra CT_{media_annua} e TS_{medio_annuo} ;

5. calcolo del "coefficiente moltiplicativo" $CT_{giorno} / \int CT_{giorno}$ e ridistribuzione giornaliera del TS_{medio_annuo}

I risultati ottenuti per il periodo 1982-2005 sono stati ordinati in funzione della portata liquida, ottenendo le funzioni riportate nella seguente Figura 217.

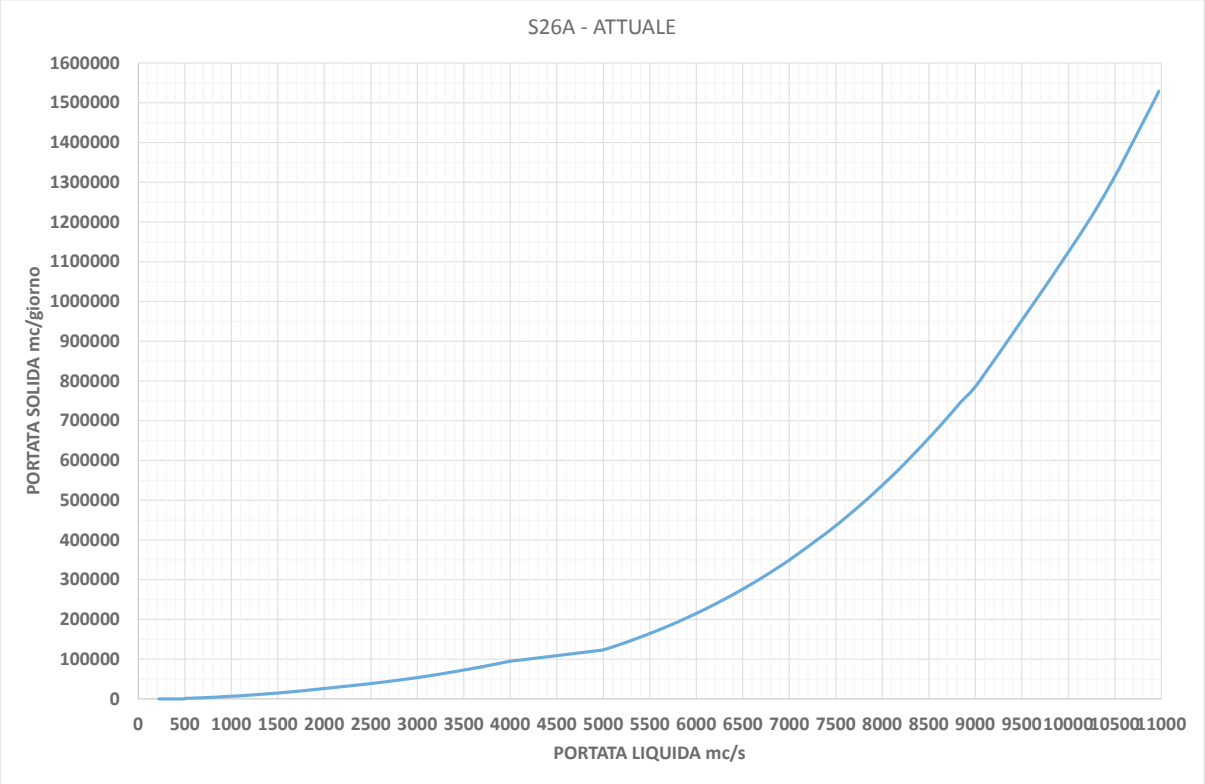


Figura 217 – Relazioni tra portata liquida giornaliera e trasporto solido al fondo ottenuta dall'analisi nell'intervallo 1982-2005

Le osservazioni di campagna, effettuate nell'ambito dei rilievi e dei campionamenti del PGSS, hanno evidenziato come al di sotto di valori di portata dell'ordine di 500 mc/s il trasporto solido, sia di fondo che sospeso, sia del tutto trascurabile. Dette osservazioni sono state effettuate in condizioni di magra, con portata liquida minore di 500 mc/s, rilevando le modalità di eventuale movimento delle microforme di fondo (ripples-mark) e la contestuale presenza o meno di materiale fine (limo) nei "cavi d'onda" dei ripples stessi.

A sostegno di questa affermazione, la funzione di trasporto ricavata per il periodo 1982-2005 ha evidenziato come l'integrale del trasporto solido per opera di portate minori di 500 mc/s sia dell'ordine di 1,6% del volume complessivo trasportato dal Po nel periodo 1982-2005.

Il modello numerico utilizzato restituisce valori di trasporto solido maggiori di zero (per quanto modesti), anche per portate minori di 500 mc/s. Pertanto, nella definizione delle funzioni di trasporto solido, è stata imposta la condizione, verificata sperimentalmente, secondo la quale il valore di portata liquida a cui corrisponde la condizione di movimento incipiente sia pari a 500 mc/s. Onde garantire la congruenza tra i valori di trasporto solido calcolati con le suddette funzioni e il volume noto sperimentalmente dal PGSS, si è provveduto a ridistribuire il quantitativo in difetto (pari per l'appunto a 1,6% circa del totale) nei giorni in cui la portata liquida risulti maggiore di 500 mc/s, secondo il meccanismo di ridistribuzione già descritto sopra.

Note così le funzioni che correlano il trasporto solido di fondo alla portata liquida, è stato possibile ricavare gli idrogrammi solidi nel periodo 2005-2014 (Figura 218) nella sezione al contorno di monte (sez. 26B).

Complessivamente l'integrale dell'idrogramma solido del decennio 2005-2014 risulta pari in media a 4,83 Mm3/anno, quindi dello stesso ordine di grandezza del valore medio di circa 4 Mm3/anno del precedente periodo 1982-2005 risultante dal PGGS.

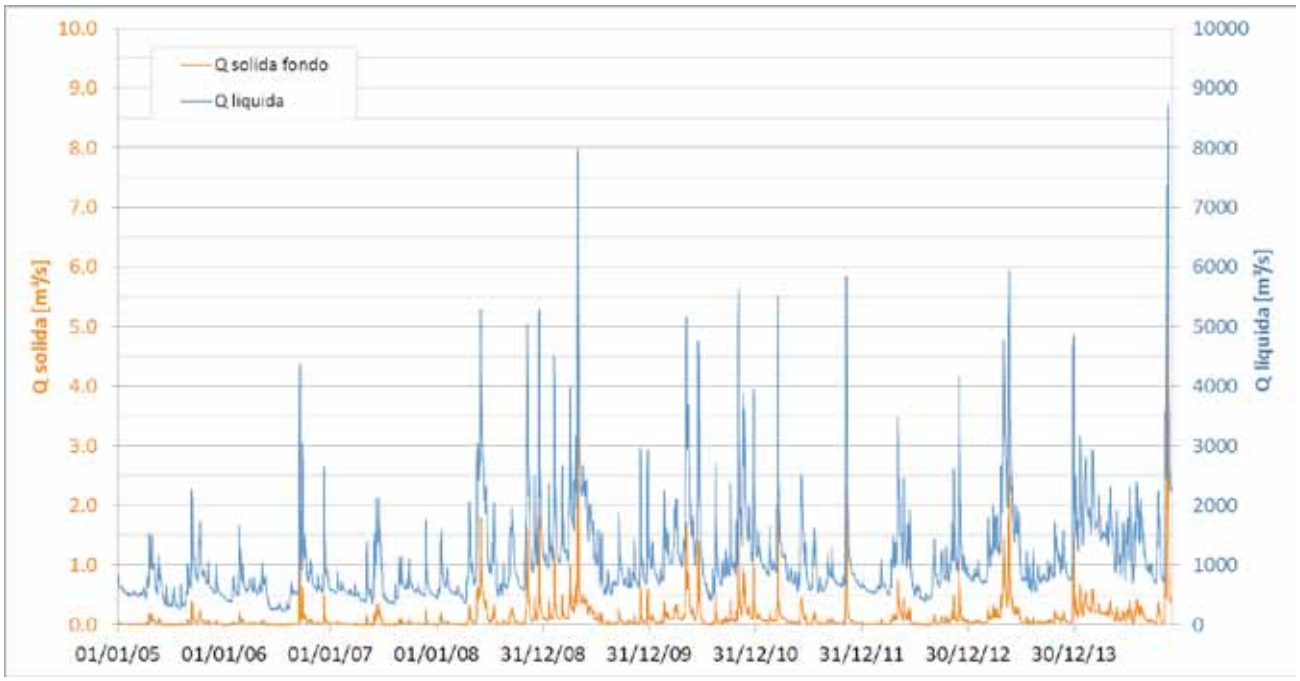


Figura 218 – Idrogrammi in ingresso al modello per il f. Po a Cremona

9.5.2 Condizioni al contorno in riferimento ai contributi in portata solida degli affluenti

9.5.2.1 Studi di riferimento

Lungo l'asta del Po oggetto delle modellazioni idrauliche (Cremona-Po di Goro), è necessario definire i contributi in termini di portata solida derivanti dagli affluenti, durante il periodo di simulazione considerato. Nel presente studio, tali contributi sono derivati associando alla portata liquida media giornaliera il relativo contributo in portata solida media giornaliera, espressa in volume effettivo.

Gli affluenti presenti lungo l'asta esaminata (Cremona-Po di Goro) sono riepilogati nella seguente Tabella 84 in cui sono riportate le progressive del fiume Po dove si hanno le confluenze degli affluenti.

Affluente	Distanza progressiva (Km)
Arda	386
Taro	408
Parma	425
Enza	436
Crostoso	444
Oglio	461
Mincio	490
Secchia	493
Panaro	541

Tabella 84 - Distanze progressive degli affluenti da Cremona a Po di Goro.

Al fine di definire la più appropriata formula di trasporto, sono stati consultati studi ed analisi precedenti. Tra questi i più significativi, sia in termini di completezza di trattazione sia in termini di estensione dell'indagine sono lo studio (Ministero dell'Agricoltura, 1990) condotto nella seconda metà degli anni ottanta ed il successivo (Autorità di bacino del Po, 1995) elaborato nella seconda metà degli anni novanta.

Nell'ambito del primo studio, fu effettuata una ricostruzione dei contributi degli affluenti in riferimento alla vicenda idrologica-idrometrica del periodo 1954-1983, anche attraverso modelli semplificati di ricostruzione delle portate medie giornaliere alle confluenze a partire dalle informazioni disponibili in corrispondenza delle stazioni idrometriche interne ai singoli bacini confluenti ed ai valori dei volumi medi mensili. Alla vicenda idrologica così ricostruita fu accoppiata la formula di trasporto monomia di Engelund-Hansen tarata sulle informazioni morfologiche, idrauliche e sedimentologiche raccolte in occasione dello stesso studio.

Nel secondo studio citato (Autorità di bacino del Po, 1995) la ricostruzione del contributo solido degli affluenti è stata effettuata a partire dalla ricostruzione della scala di durata delle portate alle sezioni di confluenza dei singoli affluenti, accoppiando a questa la formula di trasporto di Engelund-Hansen. Nei casi in cui fossero disponibili rilievi topografici d'alveo nei tronchi terminali degli affluenti in periodi successivi, quest'ultimi sono stati utilizzati per tarare la formula di trasporto su base "morfologica" confrontando il risultato del bilancio sedimentario medio nel periodo ottenuto dall'applicazione della curva di durata con il confronto batimetrico dei rilievi topografici successivi.

Per la definizione del modello idrologico lo studio (Autorità di bacino del Po, 1995) si è riferito a:

- Master Plan del Po - Attività 3.4.1 (Idrologia del sistema idrico superficiale): è stata utilizzata la banca dati idrologica (serie storiche dei dati medi mensili ed annui di precipitazione, temperatura e portata), sono state tratte le formule di regionalizzazione dell'informazione idrometrica sul bacino padano.
- Studio SIMPO - Idrologia e modello di simulazione idrologica del Bacino del Po: sono state tratte le formule di regionalizzazione dell'informazione idrometrica sul bacino padano.

In definitiva, per la stima della portata media e per i valori caratteristici della scala di durata delle portate, si è orientato verso i valori forniti dalle formule SIMPO, che furono ritenuti sufficientemente affidabili, soprattutto per le portate con durata di maggiore interesse per le valutazioni concernenti il trasporto solido (i.e. durata Q10 Q91 Q182).

Oltre ai citati studi sono stati consultati gli annali idrologici di ARPA-RER (parte seconda) per gli anni 2005-2014, nonché il sito di AIPo per l'acquisizione dei dati idrometrici alle stazioni di interesse (http://www.agenziainterregionalepo.it/dati-idrologici.html).

9.5.2.2 Premessa

Si evidenzia che il contributo in volume di solidi trasportati dagli affluenti verso il Po, considera il solo contributo del materiale solido del fondo (letto) trascinato per rotolamento, saltazione o trasportato in

sospensione.Tale volume complessivo si ritiene possa transitare tal quale dalla sezione di confluenza verso il Po e qui possa essere coinvolto nei processi di trasporto solido al fondo.

I contributi in portata solida media giornaliera degli affluenti, sono valutati in riferimento alla capacità di trasporto del singolo affluente.

Le ipotesi sulle quali si basa il calcolo della capacità di trasporto solido al fondo sono le seguenti:

- le formule si riferiscono a condizioni di moto mediamente uniforme. La capacità di trasporto della corrente coincide con la quantità di materiale effettivamente trasportato solo nel caso in cui nel materiale dell'alveo tale quantità risulti effettivamente disponibile al trasporto;
- la capacità di trasporto calcolata si intende in equilibrio con le caratteristiche idrauliche, sedimentologiche e geometriche del corso d'acqua;
- le formule forniscono il valore del trasporto totale (trasporto al fondo più trasporto in sospensione sedimentabile) del solo materiale costituente il letto (bed-load); non tengono in alcun conto dell'eventuale presenza di materiale fine non sedimentabile e non riscontrabile in misura apprezzabile nell'alveo (wash-load), che peraltro può rappresentare una frazione considerevole del trasporto solido totale.

La capacità di trasporto può essere stimata applicando una formula di trasporto di tipo monomio alle portate liquide medie giornaliere ricostruite alle sezioni di confluenza degli affluenti:

$$Q_S = a \cdot Q^b \qquad 9\text{-}1$$

Ove Q e Qs indicano rispettivamente la portata liquida e portata solida in volume effettivo (m3/s). Tale formula è essenzialmente riconducibile alla nota formula di Engelund-Hansen:

$$g_s = 0{,}05 \cdot \gamma_s \cdot U^2 \cdot \sqrt{\frac{d}{g(\gamma_s/\gamma - 1)}} \cdot \left(\frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)d}\right)^{3/2} \qquad 9\text{-}2$$

Ove

g_S la portata solida in peso secco per unità di larghezza della corrente (kgf/s/m);

γ il peso specifico dell'acqua (kg/m3);

γ_S il peso specifico dei sedimenti (kg/m3);

τ_o la tensione tangenziale media al fondo (kg/m2);

U la velocità media della corrente (m/s);

D il diametro mediano dei sedimenti dell'alveo (m);

g l'accelerazione di gravità (m/s2).

Associando la formula di resistenza di Manning-Strikler a condizioni di moto localmente uniforme la precedente $g_s = 0{,}05 \cdot \gamma_s \cdot U^2 \cdot \sqrt{\frac{d}{g(\gamma_s/\gamma - 1)}} \cdot \left(\frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)d}\right)^{3/2}$ 9 -2 diventa:

$$g_s = 0{,}05 \cdot \gamma_s \cdot U^2 \cdot \sqrt{\frac{d}{g(\gamma_s/\gamma - 1)}} \cdot \left(\frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)d}\right)^{3/2} \qquad 9\text{-}3$$

Ove, si è assunto gS = 2650 (kgf/m3) e si indica con:

G_S la portata solida in peso secco (kgf/s);

S_f la pendenza del fondo alveo;

b la larghezza d'alveo (m);

Negli studi qui considerati (Autorità di bacino del Po - 1995, Ministero dell'Agricoltura - 1990), le indagini dirette ed indirette condotte al fine di definire la più appropriata formula di trasporto da utilizzare per la valutazione dei contributi degli affluenti hanno individuato la formula di Engelund-Hansen quale la più adatta al contesto in esame. In particolare nello studio dell'Autorità di bacino del Po, la formula di trasporto, nel caso degli affluenti di cui si disponeva di rilievi topografici diretti estesi su un arco temporale di qualche lustro, è stata opportunamente tarata in considerazione dei fattori geomorfologici (pendenza del tratto di valle dell'affluente, larghezza della sezione di confluenza)

sedimentologici (diametri caratteristici del fondo alveo nel tronco di valle degli affluenti), idraulici (resistenze al moto), per mezzo del confronto dei rilievi diretti effettuati a distanza di tempo. Altrove, ove tali rilievi non erano disponibili, fu adottata la formula di Engelund-Hansen come proposta precedentemente nello studio del Ministero dell'Agricoltura, opportunamente aggiornata nei suoi parametri fisici, modificando i valori dei parametri la cui conoscenza risultava più incerta, senza però mai stravolgerne il significato fisico e mantenendoli sempre all'interno di un campo di valori molto probabile e ben giustificabile.

I risultati delle modellazioni di bilancio sedimentario per tratti, estese all'asta principale del Po ed ai suoi affluenti, effettuate in quell'occasione (Autorità di bacino del Po, 1995) hanno condotto ad una stima del trasporto medio annuo in volume solido per i singoli tratti, e fra questi anche i tronchi terminali degli affluenti.

I contributi solidi più rilevanti a valle di Cremona derivano dagli affluenti in destra idraulica (Arda, Taro, Parma, Enza, Crostolo, Oglio, Mincio, Secchia, Panaro) e sono stimati complessivamente in 715'438 m3/anno.

Nella successiva Tabella 85 sono riportate le superfici dei bacini alla sezione di chiusura

Affluente	Stazione	Bacino [kmq]
Arda	Polesine	339
Taro	Gramignazzo	1979
Parma	Trai	767
Enza	Brescello	670
Crostolo	Guastalla	546
Oglio	S. Matteo delle chiaviche	6385
Mincio	Governolo	2828
Secchia	S. Lucia	2089
Panaro	Bondeno	1789

Tabella 85 - dati caratteristici alla sezione di chiusura degli affluenti a valle di Cremona

Di questi, quelli relativi all'Arda, Crostolo e Mincio rappresentano nel loro insieme meno del 6% del contributo solido totale medio annuo e pertanto sono stati considerati irrilevanti nell'ambito delle simulazioni idrauliche.

Nella Figura 219 sono riportati i contributi in volume solido effettivo medio annuo dei singoli affluenti qui considerati.

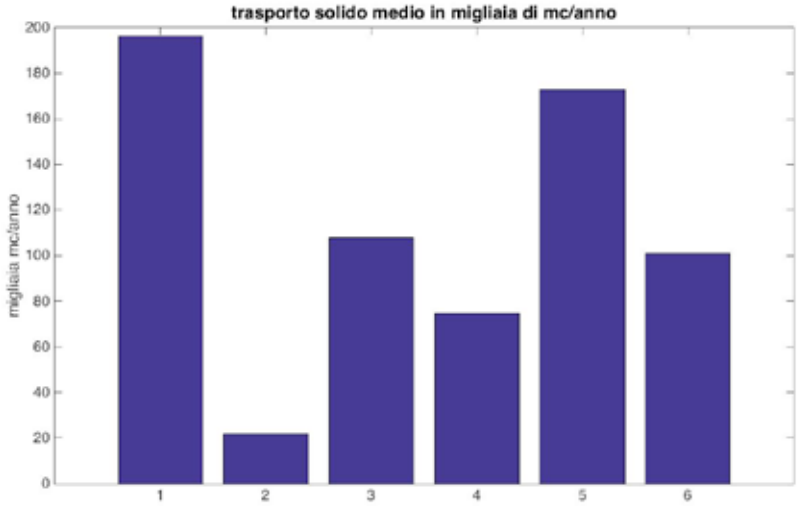


Figura 219 - Trasporto solido medio annuo in volume effettivo degli affluenti (da sinistr Taro, Parma, Enza, Oglio, Secchia, Panaro) (v. Autorità di bacino del Po, 1995)

Le analisi successive sono quindi finalizzate alla ricostruzione dei contributi solidi in termini di portata solida media giornaliera dei sei affluenti sopra indicati, nel decennio 2005-2014.

9.5.2.3 Metodologia adottata per la ricostruzione dei contributi solidi medi giornalieri degli affluenti nel periodo 2005-2014

Il calcolo del contributo solido medio giornaliero degli affluenti nel periodo in esame (anni 2005-2014) è stato effettuato assumendo la portata solida coincidente con la capacità di trasporto nella sezione di confluenza. Anziché applicare la formula di Engelund Hansen (ad esempio nella forma della eq.7-1), si è preferito procedere a partire dalla forma monomia di tipo 'aggregato', ricostruendo il coefficiente a della formula 7-1, assumendo *b=1.7* in ossequio alla formula di Engelund-Hansen.

La ricostruzione del valore del coefficiente a è stata effettuata a partire dal dato integrato del trasporto solido medio annuo, in riferimento alla corrispondente vicenda idrologica. In particolare, si è fatto riferimento alle risultanze dello studio dell'Autorità di bacino del Po (1995), nel quale la vicenda idrologica di riferimento è rappresentata attraverso la ricostruzione della curva di durata media delle portate dedotta, a loro volta, dallo studio del Ministero dei Lavori Pubblici-Magistrato per il Po (1982).

Il valore del coefficiente a ricavato per questa via è stato successivamente confrontato con il valore dello stesso ricostruito a partire dai dati morfologico-idraulici disaggregati utilizzati nello studio del Ministero dell'Agricoltura (1990), per verificarne la ragionevolezza.

Pertanto la procedura seguita per la ricostruzione del contributo solido medio giornaliero per gli affluenti può essere così riassunta:

1. ricostruzione della curva di durata media delle portate degli affluenti in forma continua ed applicazione della formula di trasporto in forma monomia (eq. $Q_s = a \cdot Q^b$ 9 -1) alla curva di durata delle portate per la taratura della formula di trasporto coerente con la stima del volume medio annuo trasportato;
2. analisi idrologica del periodo 2005-2014 al fine di ricostruire l'andamento delle portate medie giornaliere nel periodo alle sezioni di confluenza degli affluenti;
3. applicazione della formula monomia di trasporto (tarata in precedenza) alla serie storica delle portate ricostruite alla sezione di confluenza nel periodo (anni 2005-2014) per la quantificazione dei contributi solidi medi giornalieri.

9.5.2.4 Ricostruzione della curva di durata delle portate degli affluenti e taratura della formula di trasporto

Il calcolo del volume medio annuo di materiale trasportato dagli affluenti verso il Po viene effettuato quindi tramite la equazione monomia $Q_s = a \cdot Q^b$ 9 -1, adottando la curva di distribuzione delle frequenze cumulate (curva di durata) delle portate liquide corrispondente alla sezione di confluenza.

La curva di durata delle portate si rende necessaria per caratterizzare adeguatamente il regime idrico, in quanto i maggiori contributi solidi sono connessi proprio agli eventi di portata più intensi, anche se di minor durata, soprattutto se il regime in questione è di tipo torrentizio.

Allo scopo si è fatto riferimento ai valori delle portate Q10, Q91, Q182, Q274, Q355 dedotte dallo studio dell'Autorità di bacino del Po (1995).

Al fine di stimare i valori delle portate relative a tempi di superamento inferiori ai 10 giorni, si è resa necessaria l'estrapolazione della curva di durata ottenibile dai dati sopra menzionati.

A questo scopo è stato impiegato il metodo di Gibrat, che consiste nell'eseguire sulle curve di frequenza di Gauss una trasformazione del tipo di Edgeworth e Kapteyn; in particolare, la trasformazione a tre parametri di Gibrat associa ad ogni valore della portata Q, una variabile ausiliaria z, così definita:

$$z = \log (Q - Q_0) + b \qquad 9\text{-}4$$

alla quale è assegnata una distribuzione gaussiana, quindi una durata espressa in giorni/anno da:

$$\Phi(z) = \frac{365}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{z} e^{-z^2} dz \qquad 9\text{-}5$$

I valori dei tre parametri a, b, e Q0 possono essere stimati, in funzione dei dati di durata caratteristici,

tramite le seguenti relazioni:

$$a = \frac{-1,36}{\log\left(\frac{Q10 - Q_0}{Q182 - Q_0}\right)}$$

$$Q_0 = \frac{Q182^2 - Q10 \cdot Q355}{2 \cdot Q182 - Q10 - Q355}$$

$$b = -1,36 - a \cdot \log(Q10 - Q_0)$$

In base a fonti di letteratura, la curva di Gibrat sembra fornire risultati soddisfacenti anche per estrapolazioni a durate inferiori al giorno. Nel presente studio sono stati pertanto ottenuti, con tale metodo, i valori delle portate con durata fino a un giorno all'anno.

In definitiva, nota la distribuzione di durata delle portate, il contributo solido medio annuo dei singoli affluenti è ricostruibile tramite l'eq. $Q_s = a \cdot Q^b$ 9 -1, associando ad ogni portata liquida Q la rispettiva portata solida Q_S in volume solido effettivo e sommando tutti i contributi. In altri termini:

$$VS = \sum_{i=1}^{365} \frac{G_S(Q_i) \cdot 86400}{\gamma_S} \qquad 9\text{-}6$$

$$VS = a \cdot \sum_{i=1}^{365} \frac{Q_i^{1.7} \cdot 86400}{\gamma_S} \qquad 9\text{-}7$$

in cui:

V_S = volume medio annuo in m3/anno (volume solido effettivo con peso specifico γ_s);

G_S = portata solida, in peso secco, dei sedimenti dell'alveo in kgf/s;

Q = portata liquida in m^3/s.

Noto il contributo solido medio annuo VS, è possibile esplicitare la $VS = a \cdot \sum_{i=1}^{365} \frac{Q_i^{1.7} \cdot 86400}{\gamma_S}$ 9 -7 rispetto al coefficiente a:

$$a = \frac{VS}{\sum_{i=1}^{365} \frac{Q_i^{1.7} \cdot 86400}{\gamma_S}} \qquad 9\text{-}8$$

Di seguito, per tutti gli affluenti alla sezione di chiusura in corrispondenza della confluenza in Po presenti lungo l'asta a valle di Cremona, sono riepilogati i valori caratteristici della scala di durata delle portate, la curva di durata delle portate in forma continua, il volume medio annuo di contributo solido in volume effettivo, ed il coefficiente a della formula monomia di trasporto.

Il confronto con i valori dello stesso coefficiente calcolati a partire dai dati morfometrici-idraulici-sedimentologici adottati nello studio (Ministero dell'Agricoltura, 1990), evidenzia una discrepanza che può essere utilmente interpretata considerando lo scarto del coefficiente a normalizzato in funzione del contributo solido medio annuo specifico:

$$e_i = \Delta a_i \Big/ a_i \frac{Vs_i}{\sum Vs_i} \qquad 9\text{-}9$$

Ove:

e_i = scarto normalizzato della formula di trasporto riferita all'i-esimo affluente,

V_{Si} = contributo solido medio annuo del i-esimo affluente,

a_i = coefficiente della formula monomia di trasporto del i-esimo affluente.

Lo scarto normalizzato rimane contenuto all'interno del 1-2 % ad eccezione del Taro e del Secchia, che evidenziano una significativa sottostima del coefficiente della formula di trasporto calcolato per questa via, rispetto a quello utilizzato nello studio del Ministero dell'Agricoltura (1990).

D'altra parte si osserva che nello studio dell'Autorità di bacino del Po (1995), la taratura della formula di trasporto è stata effettuata sia su base 'morfologia' (i.e. confronto rilievi topografici ad epoche successive laddove disponibili, come nel caso del Secchia ove sono stati confrontati i rilievi del 1969 e 1992) sia attraverso la validazione del modello complessivo di bilancio sedimentario esteso al bacino del Po. Pertanto si ritiene tale taratura più appropriata, e verrà utilizzata nel calcolo dei contributi medi solidi giornalieri nel periodo di simulazione 2005-2014.

ARDA A POLESINE

Durata [giorni]	10	91	182	274	355
Portate Q [mc/s]	19.1	3.7	18.6	6.8	1.5

Tabella 86 - Arda a Polesine -Portate caratteristiche della scala di durate ottenute col metodo di regionalizzazione (Autorità di bacino del Po, 1995)

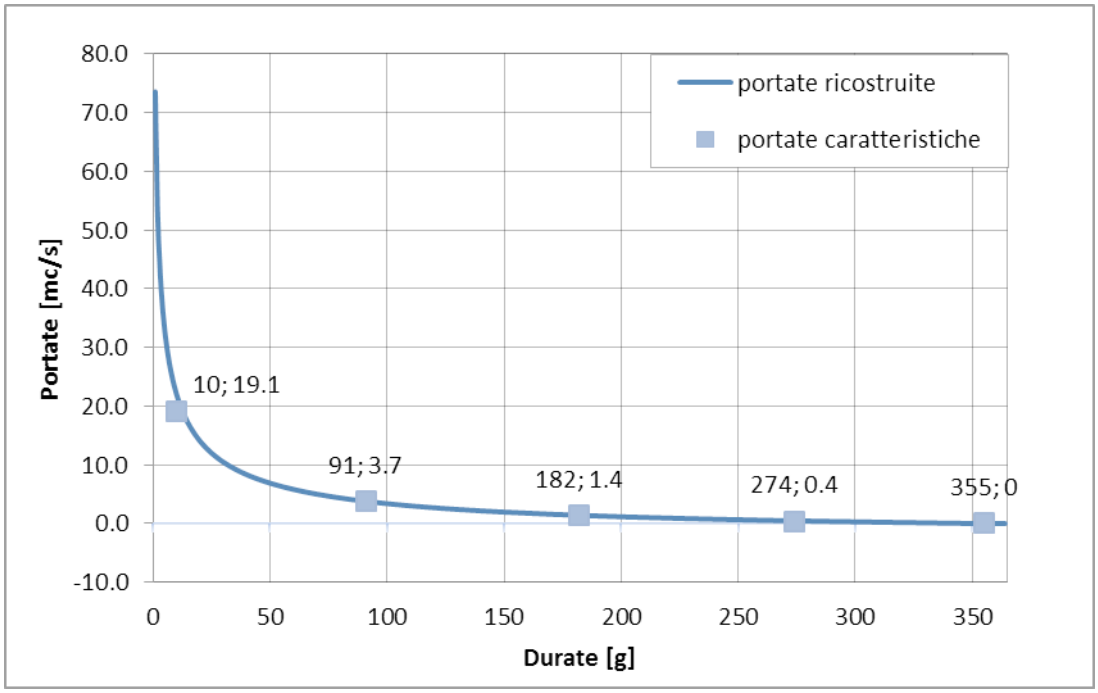


Figura 220 - Arda a Polesine-Estrapolazione della curva di durata col metodo di Gibrat a partire dalle portate caratteristiche

Trasporto solido totale Vs[mc/anno]	3012
ΣQ^1.7	8880

$$\alpha = \frac{V_s \cdot \gamma_s}{86400 \cdot \sum_i^{365} Q^{1.7}} = \frac{3012 \cdot 2650}{86400 \cdot 8880} \cong 0.0104$$

TARO A GRAMIGNAZZO

Durata [giorni]	10	91	182	274	355
Portate Q [mc/s]	201.7	40.9	1.4	0.4	0

Tabella 87 - Taro a Gramignazzo-Portate caratteristiche della scala di durate ottenute col metodo di

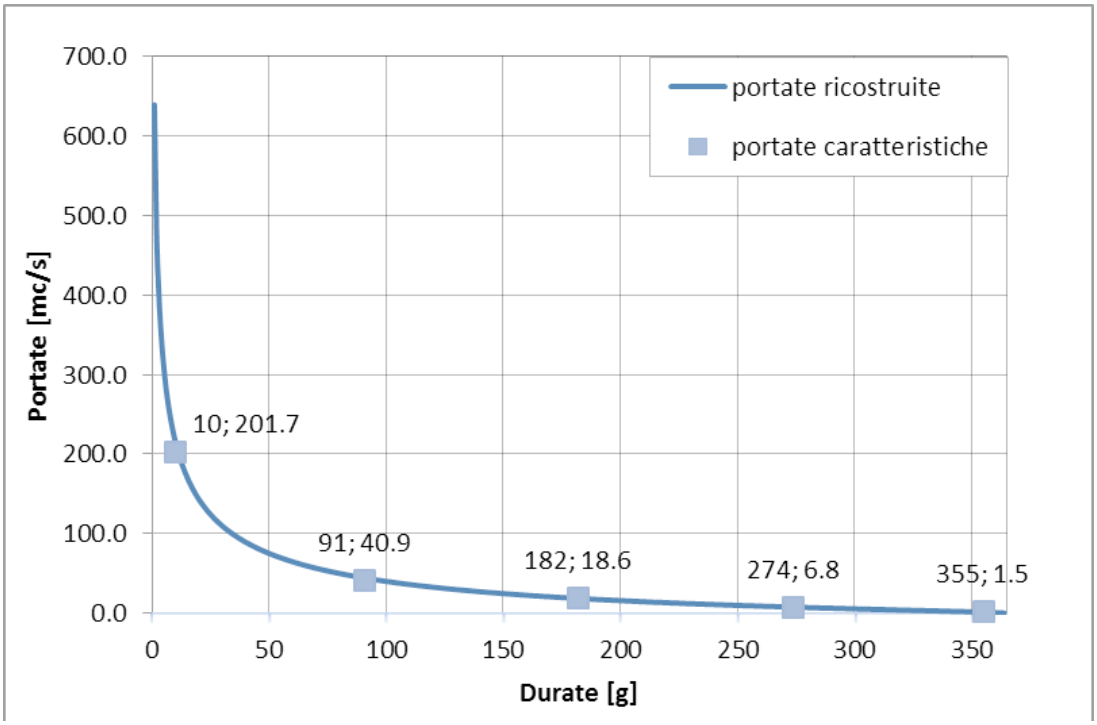


Figura 221 - Taro a Gramignazzo-Estrapolazione della curva di durata col metodo di Gibrat a partire dalle portate caratteristiche

Trasporto solido totale Vs[mc/anno]	196340
ΣQ^1.7	434118

$$\alpha = \frac{V_s - \gamma_s}{86400 \cdot \sum_1^{365} Q^{1.7}} = \frac{19634 - 2650}{86400 \cdot 434118} \cong 0.0014$$

PARMA A TRAI

Durata [giorni]	10	91	182	274	355
Portate Q [mc/s]	65.6	13.1	5.6	1.8	0.3

Tabella 88 - Parma a Trai-Portate caratteristiche della scala di durate ottenute col metodo di regionalizzazione (Autorità di bacino del Po, 1995)

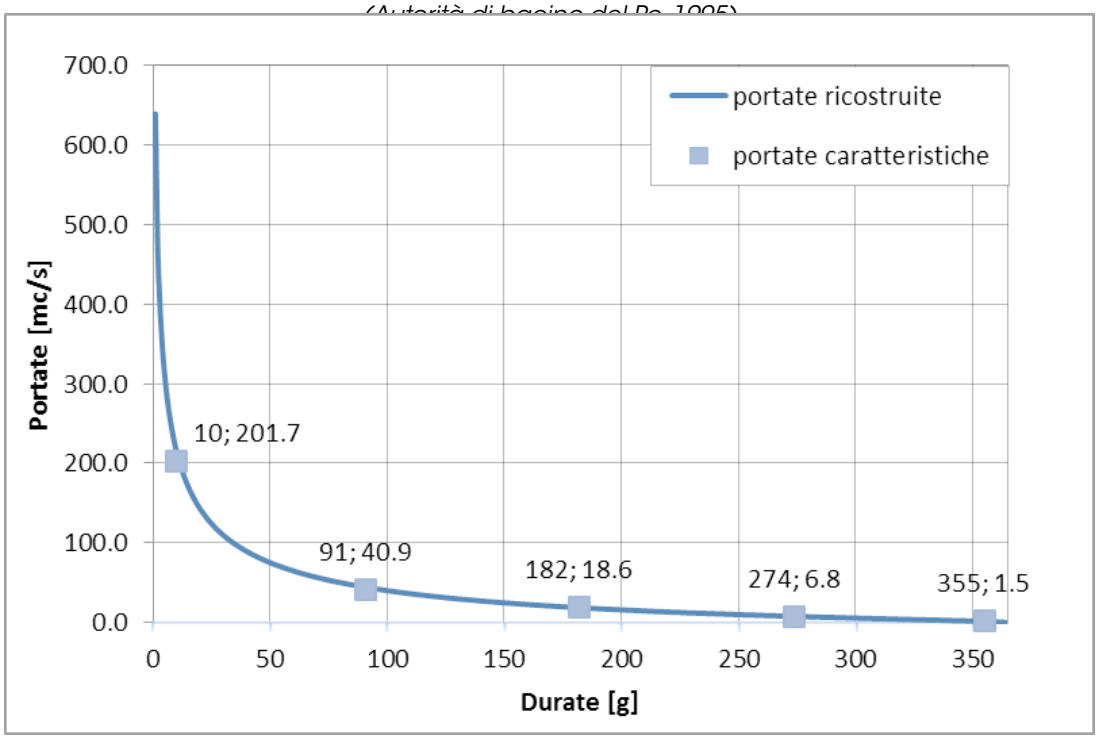


Figura 222 - Parma a Trai-Estrapolazione della curva di durata col metodo di Gibrat a partire dalle portate caratteristiche

Trasporto solido totale Vs[mc/anno]	196340
ΣQ^1.7	434118

$$\alpha = \frac{V_s \cdot \gamma_s}{86400 \cdot \sum_1^{365} Q^{1.7}} = \frac{21631 \cdot 2650}{86400 \cdot 708534} \cong 0.0094$$

ENZA A BRESCELLO

Durata [giorni]	10	91	182	274	355
Portate Q [mc/s]	67.5	13.7	6	2.1	0.4

Tabella 89 - Enza a Brescello-Portate caratteristiche della scala di durate ottenute col metodo di regionalizzazione (Autorità di bacino del Po, 1995)

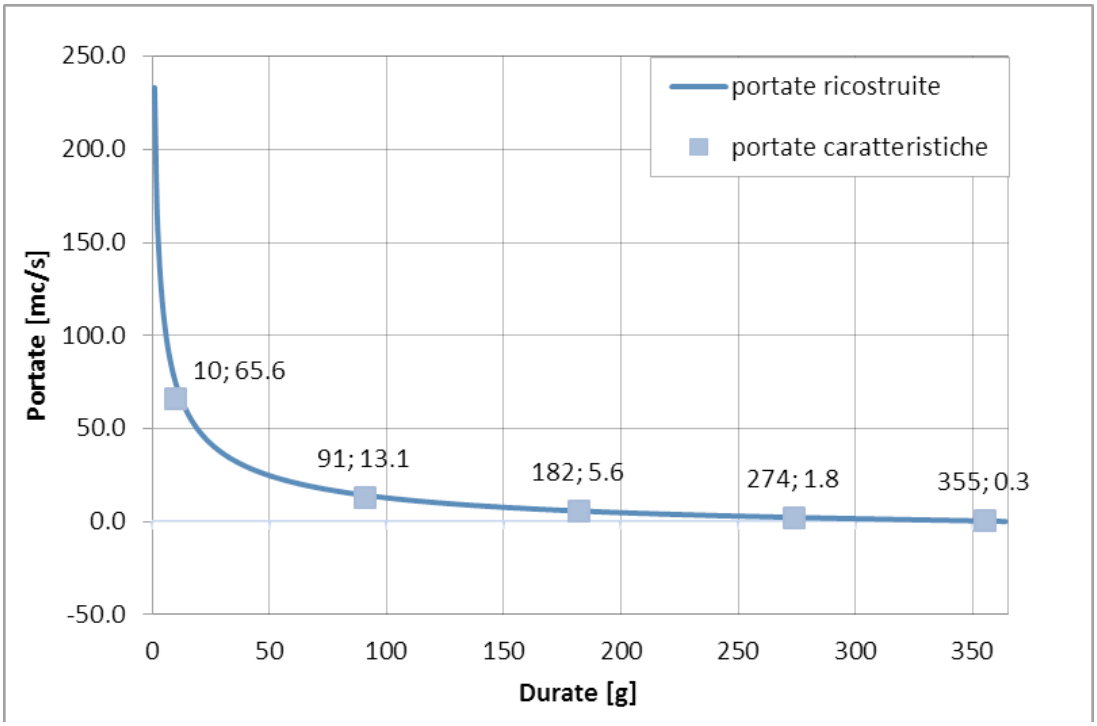


Figura 223 - Enza a Brescello - Estrapolazione della curva di durata col metodo di Gibrat a partire dalle portate caratteristiche

Trasporto solido totale Vs[mc/anno]	107745
ΣQ^1.7	69775

$$\alpha = \frac{V_s \cdot \gamma_s}{86400 \cdot \sum_1^{365} Q^{1.7}} = \frac{107745 \cdot 2650}{86400 \cdot 69775} \cong 0.0474$$

CROSTOLO A GUAZZALLA

Durata [giorni]	10	91	182	274	355
Portate Q [mc/s]	18.4	3.5	1.2	0.3	0

Tabella 90 - Crostolo a Guazzalla - Portate caratteristiche della scala di durate ottenute col metodo di (Autorità di bacino del Po, 1995)

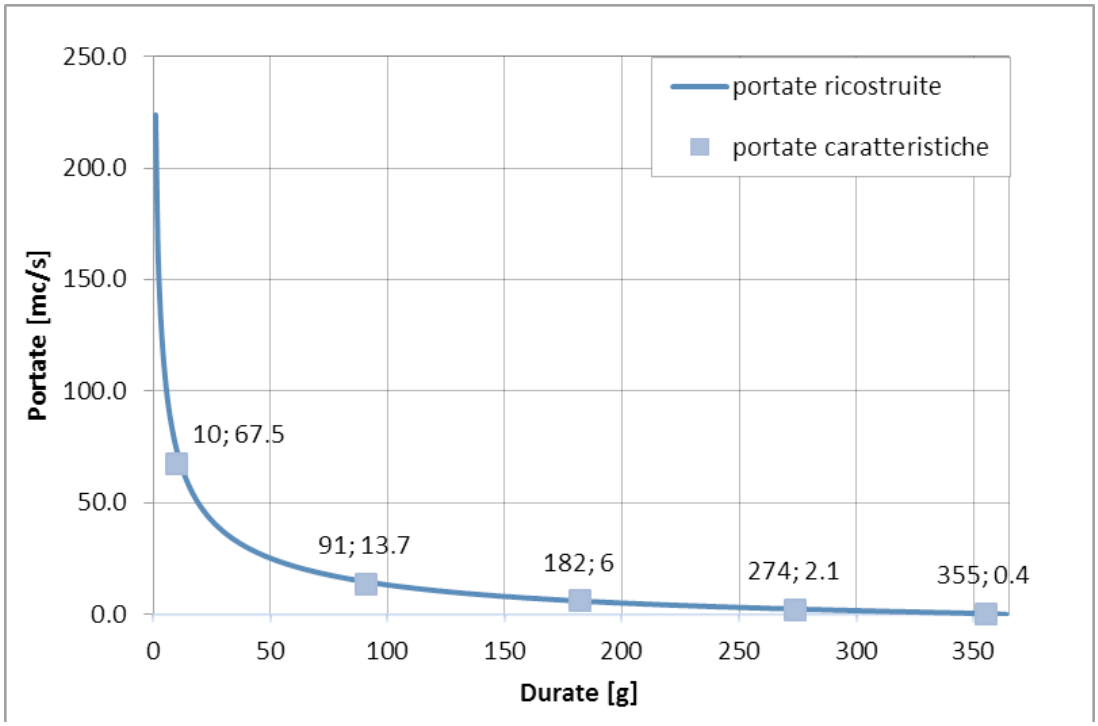


Figura 224 - Crostolo a Guazzalla - Estrapolazione della curva di durata col metodo di Gibrat a partire dalle portate caratteristiche

Trasporto solido totale Vs[mc/anno]	11232
ΣQ^1.7	9943

$$\alpha = \frac{V_s \cdot \gamma_s}{86400 \cdot \sum_1^{365} Q^{1.7}} = \frac{11232 \cdot 2650}{86400 \cdot 9943} \cong 0.0346$$

OGLIO A S.MATTEO DELLE CHIAVICHE

Durata [giorni]	10	91	182	274	355
Portate Q [mc/s]	362.5	173.7	104.1	62.8	37

Tabella 91 - Oglio a S. Matteo delle Chiaviche -Portate caratteristiche della scala di durate ottenute col metodo di regionalizzazione (Autorità di bacino del Po, 1995)

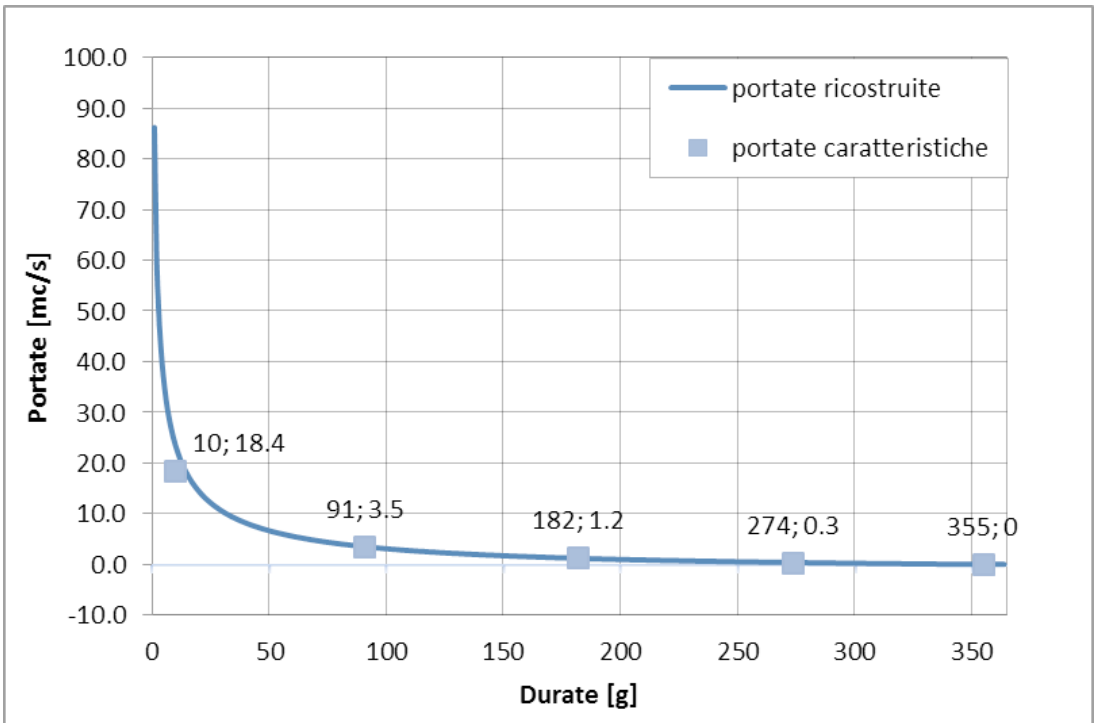


Figura 225 - Oglio a S. Matteo delle Chiaviche - Estrapolazione della curva di durata col metodo di Gibrat a partire dalle portate caratteristiche

Trasporto solido totale Vs[mc/anno]	74638
ΣQ^1.7	2036388

$$\alpha = \frac{V_s \cdot \gamma_s}{86400 \cdot \sum_1^{365} Q^{1.7}} = \frac{74638 \cdot 2650}{86400 \cdot 2036388} \cong 0.0011$$

MINCIO A GOVERNOLO

Durata [giorni]	10	91	182	274	355
Portate Q [mc/s]	362.5	173.7	104.1	62.8	37

Tabella 92 - Mincio a Governolo -Portate caratteristiche della scala di durate ottenute col metodo di regionalizzazione (Autorità di bacino del Po, 1995)

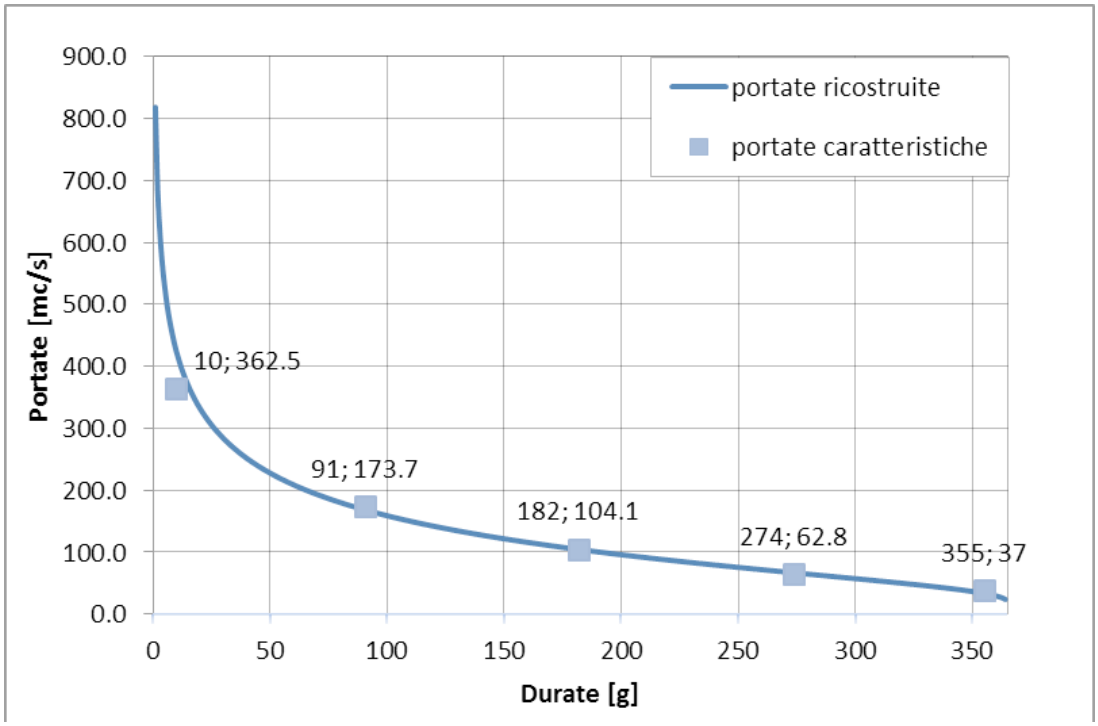


Figura 226 - Mincio a Governolo - Estrapolazione della curva di durata col metodo di Gibrat a partire dalle portate caratteristiche

Trasporto solido totale Vs[mc/anno]	26891
ΣQ^1.7	443670

$$a = \frac{V_s - V_o}{86400 \cdot \sum_1^{365} Q^{1.7}} = \frac{26891 - 2650}{86400 \cdot 443670} = 0.0010$$

SECCHIA A S. LUCIA

Durata [giorni]	10	91	182	274	355
Portate Q [mc/s]	200.5	40.5	18.1	6.5	1.3

Tabella 93 - Secchia a S. Lucia -Portate caratteristiche della scala di durate ottenute col metodo di regionalizzazione (Autorità di bacino del Po, 1995)

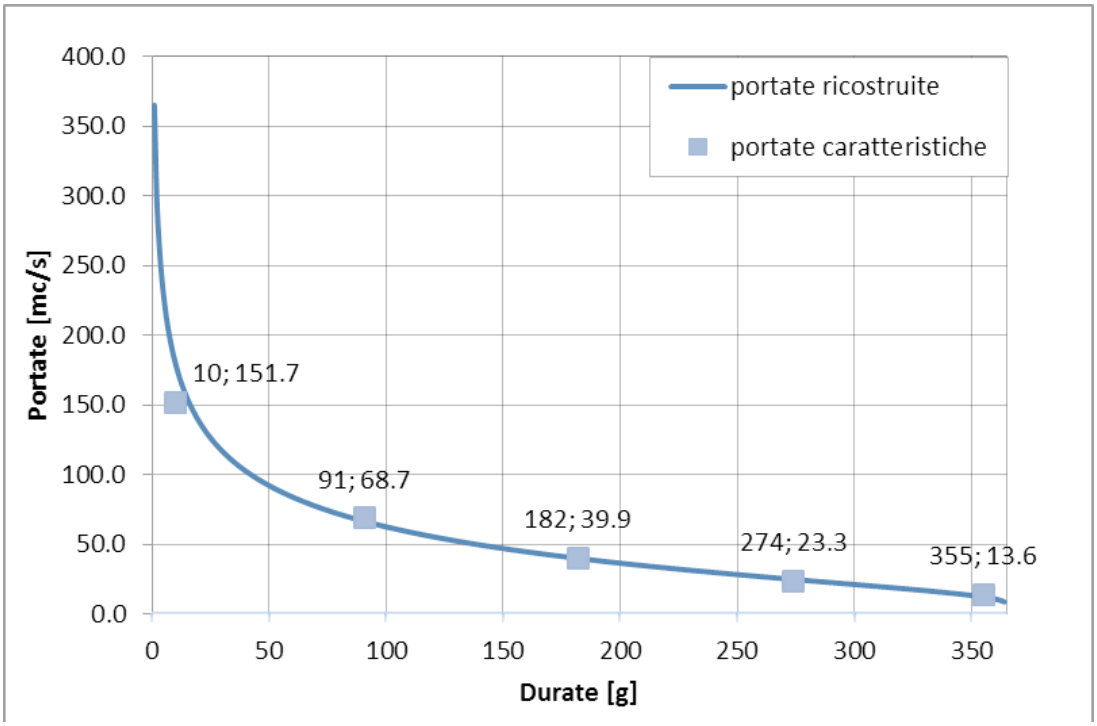


Figura 227 - Secchia a S. Lucia - Estrapolazione della curva di durata col metodo di Gibrat a partire dalle portate caratteristiche

Trasporto solido totale Vs[mc/anno]	172894
ΣQ^1.7	431765

$$\alpha = \frac{V_s \cdot \gamma_s}{86400 \cdot \sum_1^{365} Q^{1.7}} = \frac{172894 \cdot 2650}{86400 \cdot 431765} \cong 0.0123$$

PANARO A BONDENO

Durata [giorni]	10	91	182	274	355
Portate Q [mc/s]	138.1	27.5	11.6	3.8	0.6

Tabella 94 – Panaro a Bondeno -Portate caratteristiche della scala di durate ottenute col metodo di regionalizzazione (Autorità di bacino del Po, 1995)

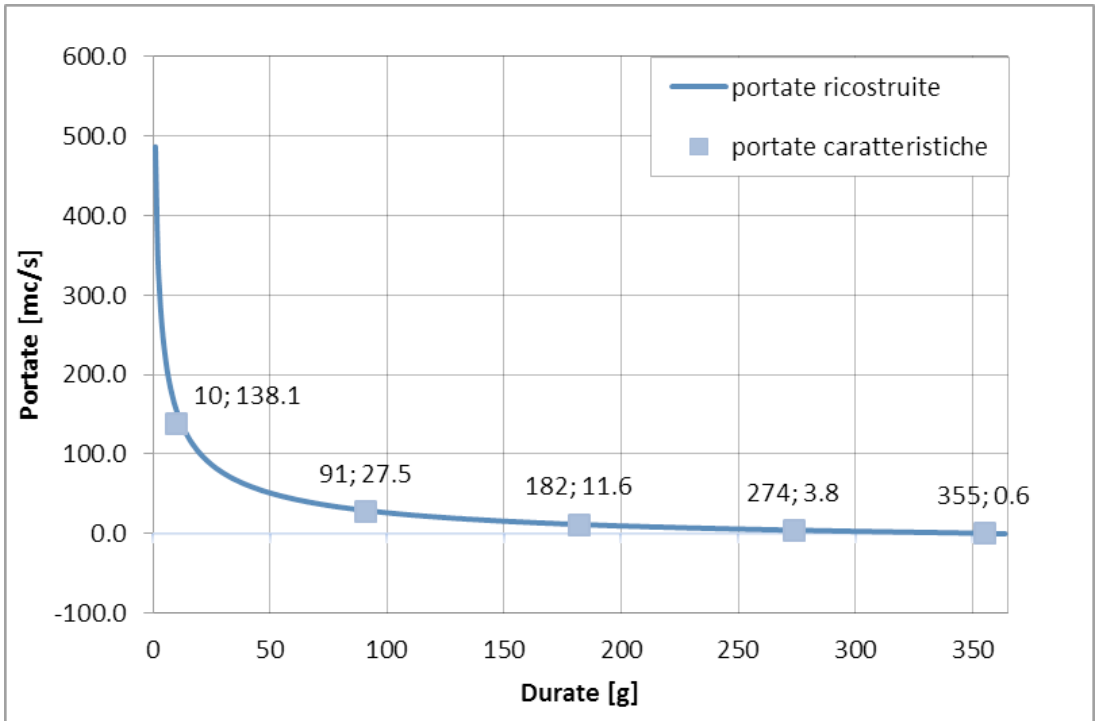


Figura 228 – Panaro a Bondeno - Estrapolazione della curva di durata col metodo di Gibrat a partire dalle portate caratteristiche

Trasporto solido totale Vs[mc/anno]	101055
ΣQ^1.7	245168

$$\alpha = \frac{V_s \cdot \gamma_s}{86400 \cdot \sum_1^{365} Q^{1.7}} = \frac{101055 \cdot 2650}{86400 \cdot 245168} = 0.0126$$

9.5.2.5 Analisi idrologica del decennio 2005-2014

Come anticipato al par.9.5.2.2, gli affluenti considerati nell'ambito del presente studio per la definizione delle condizioni al contorno della modellazione idraulica in riferimento ai contributi di trasporto solido sono Taro, Parma, Enza, Oglio, Secchia e Panaro.

Per la ricostruzione dell'andamento delle portate medie giornaliere alle sezioni di chiusura degli affluenti si è fatto riferimento agli annali idrologici pubblicati da ARPA Emilia Romagna disponibili per il decennio in esame, ed alle registrazioni disponibili presso il sito di AIPo per il solo affluente di sinistra qui considerato (i.e. Oglio).

Nella Tabella 95 si riportano per ciascun affluente le stazioni idrometriche monitorate, il codice di riferimento e l'area del bacino sotteso corrispondente.

Affluente	Stazione	Simbolo	Bacino [kmq]
Taro	Ostia Parmense	opa	384
	Solignano	sol	605
	P.te Taro	pta	1372
	S. Secondo	sse	1457
	gramignazzo	gra	1979
Parma	Corniglia	cor	111
	P.te Verdi	Pve	600
	trai	tra	767
Enza	Selvanizza	sel	85
	Vetto	vet	299
	Currada	cur	430
	Sorbolo	Sor	648
	Brescello	bre	670
Oglio	Marcaria	mar	6236
	S. Matteo delle chiaviche	smc	6385
Secchia	P.te Lugo	plu	693
	Rubiera	rub	1303
	P.te Bacchello	pba	1371
	La Pioppa	Pio	1377
	S. Lucia	slu	2089
Panaro	P.te samone	psa	584
	Bomporto	bom	1017
	Spilamberto	Spi	742
	Bondeno	bon	1789

Tabella 95 - Elenco delle stazioni idrometriche monitorate lungo gli affluenti di Po considerati nello studio e relativi bacini idrografici (in grassetto le sezioni di chiusura alla confluenza in Po prive di idrometri)

In via preliminare è stata condotta una analisi per caratterizzare il comportamento dei singoli bacini sotto il profilo della risposta idrologica. Si è evidenziato che:

- tutti i bacini evidenziano una diversa risposta idrologica per valori di portata specifica discriminante pari a 100 l/s/km^2;
- è possibile riconoscere un comportamento di autosimilitudine all'interno di ogni singolo bacino;
- è possibile individuare un tempo di trasferimento caratteristico della risposta idrologica da una stazione alla successiva all'interno di ogni singolo bacino indipendente dal valore della portata.

Sulla base delle suddette considerazioni, e sulla scorta delle osservazioni effettivamente disponibili alle diverse stazioni nel decennio in esame, sono state individuate 2 stazioni caratteristiche all'interno di ogni singolo bacino, stimando la legge di autosimilitudine alla risposta idrologica:

$$q_v^j = p_i \cdot q_m^j + p_{i+1} \qquad 9\text{-}10$$

ove:

q^{vj} indica la portata specifica media giornaliera nella sezione di valle e qmj indica la portata specifica media giornaliera nella sezione di monte (eventualmente 'anticipata' in relazione al tempo di trasferimento caratteristico delle due sezioni dello specifico bacino). L'apice j=1,2 indica rispettivamente le risposte idrologiche con portate specifiche inferiori e superiori a 100 l/s/km^2, il pedice i = j+1 individua i 4 coefficienti di regressione della equazione di autocorrelazione.

Sulla scorta di considerazioni morfologiche e in considerazione della copertura di dati disponibile, all'interno di ciascun bacino vengono individuate due stazioni idrometriche caratteristiche (identificate con pedice v, m rispettivamente per la sezione di valle e di monte).

Successivamente vengono stimati i 4 parametri dell'equazione 7-10 di autosimilitudine con il metodo dei minimi quadrati.

L'equazione di autosimilitudine viene poi applicata alla sezione di confluenza in Po, avente superficie del bacino Ac , per calcolare la portata media giornaliera Q_c corrispondente:

$$Q_C=A_C \cdot (p_i \cdot q^j_v+p_{i+1}) \qquad 9\text{-}11$$

Il solo caso del fiume Oglio fa eccezione, poiché la stazione idrometrica coincide sostanzialmente con la sezione di chiusura del bacino idrografico. In questo caso la portata media giornaliera alla sezione S. Matteo delle Chiaviche alla confluenza, è calcolata assumendo inalterato il corrispondente contributo unitario a Marcaria.

Nella seguente Tabella 96 sono indicati i coefficienti delle equazioni di autosimilitudine per gli affluenti esaminati in riferimento alle stazioni considerate. Nelle figure successive, a titolo di esempio, si riporta l'analisi condotta per il fiume Secchia.

Affluente	p_1	p_2	p_3	p_4
Taro (sol-pta)	0.87369	-0.00287	1.34000	-0.007
Parma (cor-pve)	0.24756	0.00731	0.11207	0.13557
Enza (cur-sor)	0.31347	0.00562	0.88356	0.06572
Secchia (plu-pio)	0.80108	0.00042	0.33977	0.11433
Panaro (psa-bom)	0.80250	0.00150	0.52868	0.11010

Tabella 96 - Coefficienti della relazione di autosimilitudine per la stima dei contributi unitari all'interno dei bacini degli affluenti considerati. (in parentesi il codice identificativo delle stazioni idrometriche prese in esame)

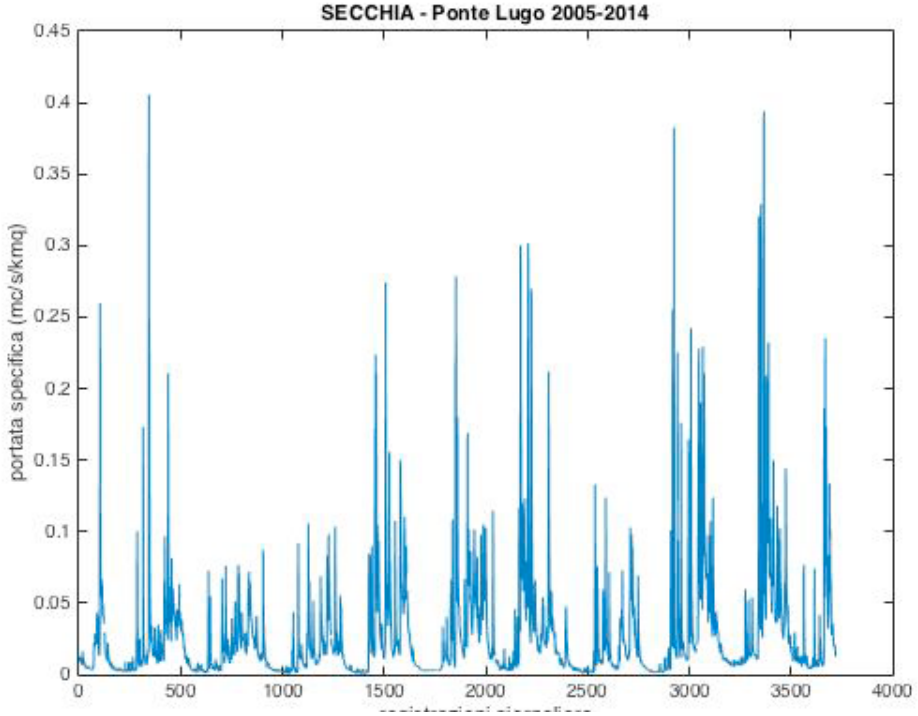


Figura 229 - Secchia – registrazioni idrometriche a Ponte Lugo

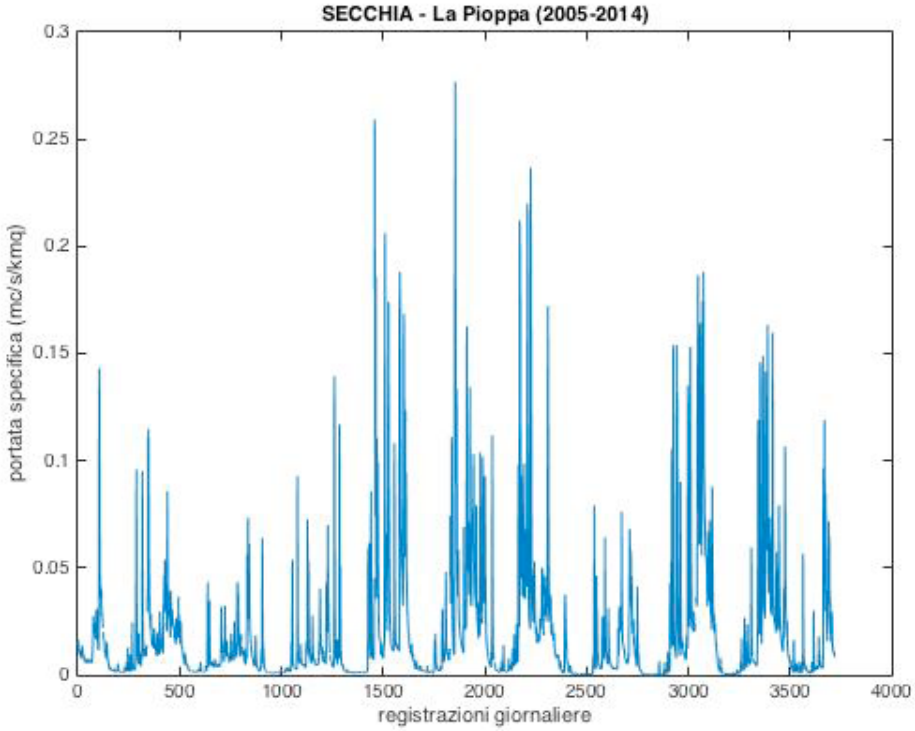


Figura 230 - Secchia – registrazioni idrometriche a La Pioppa

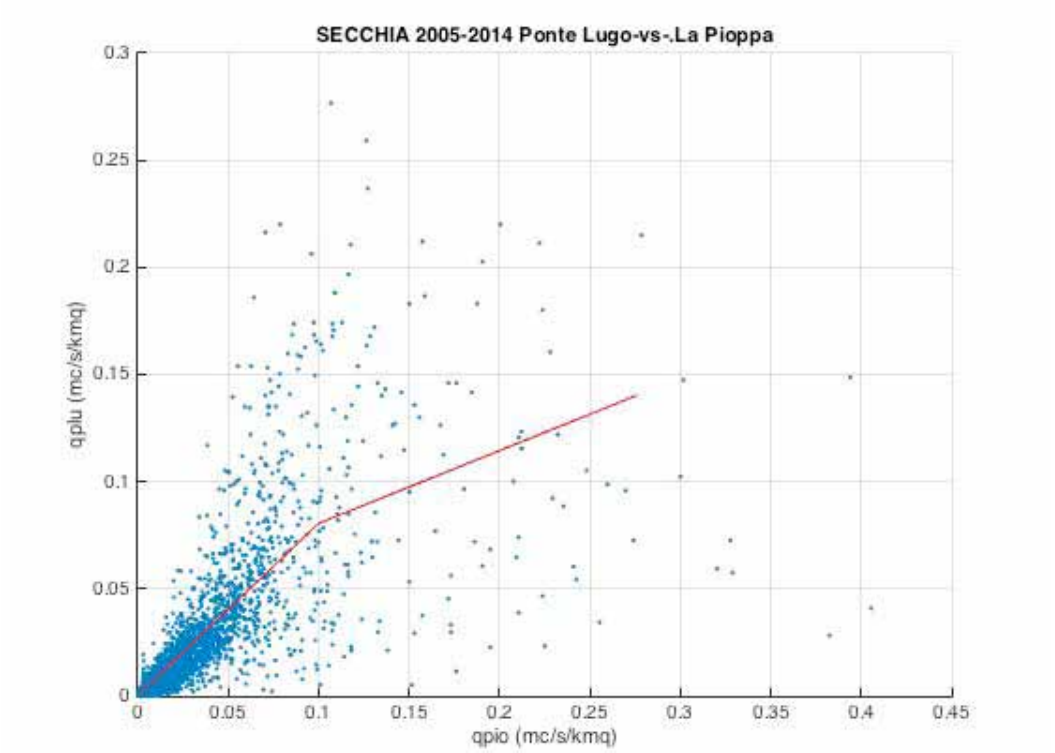


Figura 231 - Secchia – serie storica dei dati idrometrici osservati e rette di autosimilitudine per portate specifiche inferiori e superiori a 100 l/s/km2.

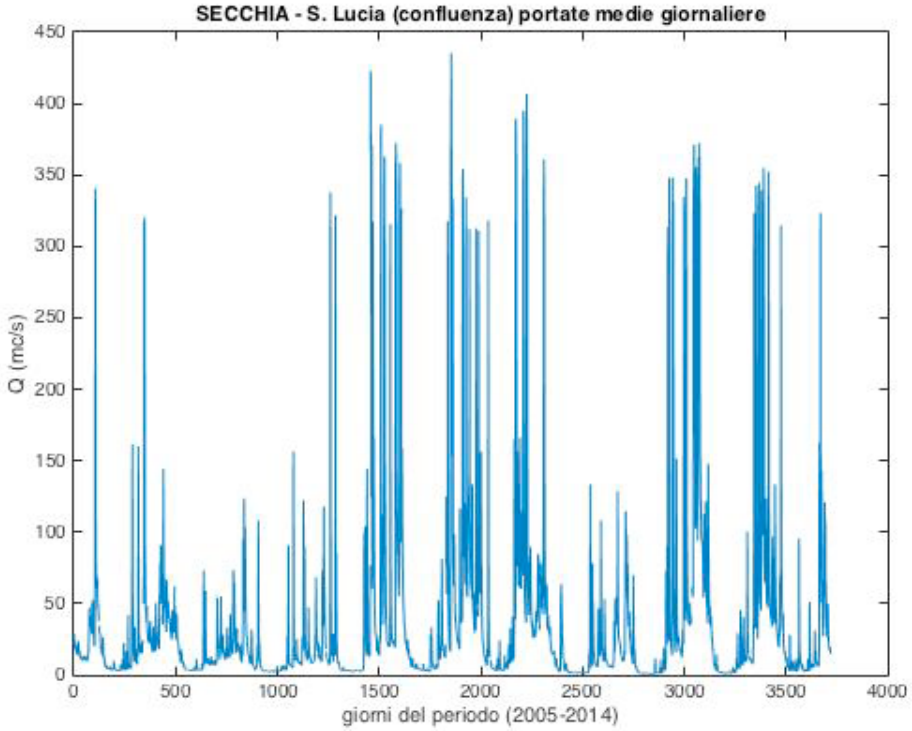


Figura 232 - Secchia a S, Lucia (sezione di confluenza). Andamento delle portate liquide medie giornaliere nl decennio 2005-2014

Analizzando la serie storica delle osservazioni si osserva che nel regime delle magre e delle morbide i dati registrati evidenziano una buona correlazione con la equazione di autosimilitudine, laddove nel caso delle piene evidenziano un ampio scatter nel quadrante delle portate specifiche. In conseguenza di ciò, la stima delle portate liquide nel regime idrologico dei contributi più significativi (i.e. superiori a 100 l/s/km2) è affetta da maggiore incertezza.

Poiché la finalità dell'analisi è quella della ricostruzione dei contributi in portata solida in ingresso al Po (e non quello della ricostruzione del regime dei deflussi di per sé) l'eventuale errore commesso nella stima delle portate liquide si riflette sulla stima dei contributi solidi in ragione della relazione monomia (eq. $Q_S=a\cdot Q^b$ 9 -1), restituendo un errore che è abbondantemente ricompreso nelle approssimazioni conseguenti le ipotesi adottate (prime fra tutte quelle di aver ammesso che il trasporto effettivo coincida con la capacità di trasporto e che il contributo solido degli affluenti si traduca "istantaneamente" nel carico solido elaborato dal Po). D'altra parte va anche osservato che il periodo decennale considerato (2005-2014) ricomprende deflussi particolarmente significativi se confrontati con le medie di lungo periodo, cui si associano valori sostenuti anche in termini di portata solida.

9.5.2.6 Ricostruzione del contributo solido degli affluenti nel periodo 2005-2014

Sulla scorta della vicenda idrologica ricostruita per ogni affluente in termini di contributo di portata liquida media giornaliera alla confluenza, si applica la eq. $Q_s=a\cdot Q^b$ 9 -1 e si ricavano i contributi in portata solida effettiva giornaliera. In Figura 233 si riporta a titolo di esempio il caso del fiume Secchia.

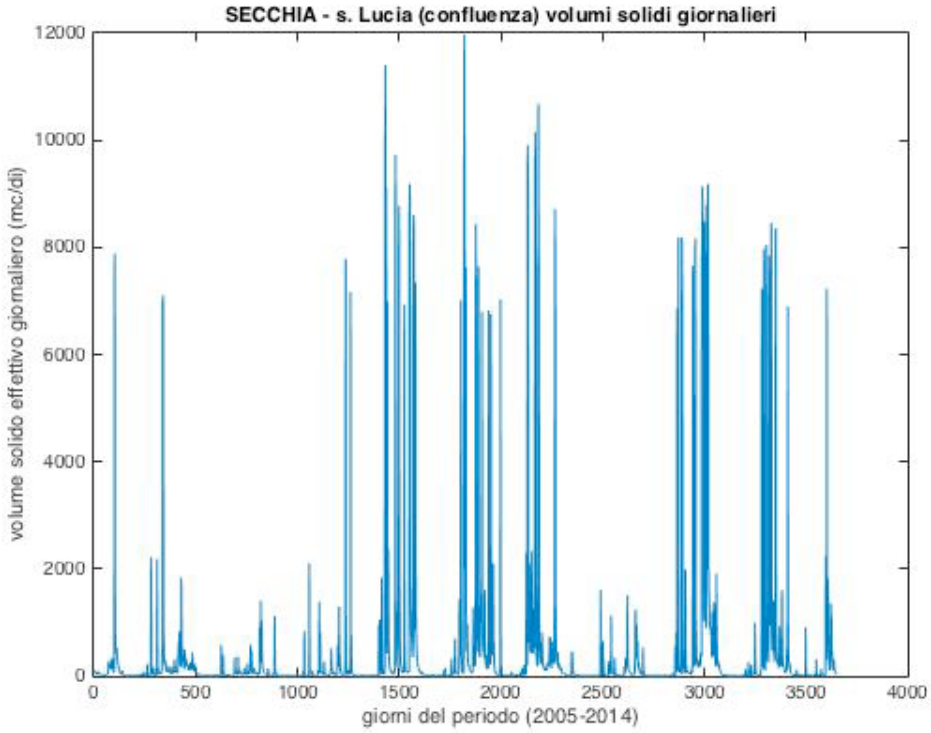


Figura 233 - Secchia a S. Lucia – sezione di chiusura alla confluenza. Andamento dei volumi effettivi di sedimento giornalieri in transito verso Po.

Nella Tabella 97 sono riportati il contributo solido medio annuo per ciascun affluente nel periodo 2005-2014, mentre la riporta i contributi solidi annuali per tutti gli affluenti considerati.

Affluente	Contributo solido annuale medio nel decennio 2005-2014 (mc)
Taro	376'000
Parma	25'000
Enza	256'000
Oglio	64'000
Secchia	162'000
Panaro	141'000

Tabella 97 - Contributo solido in volume effettivo medio annuo nel decennio 2005-2014

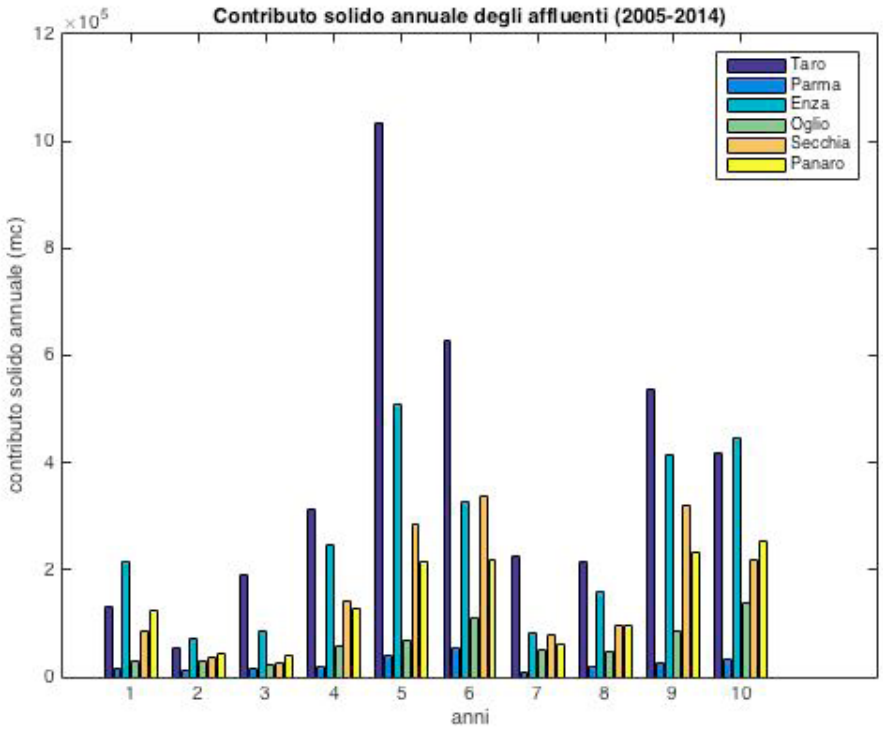


Figura 234 - Contributo solido annuale in volume effettivo degli affluenti nel decennio considerato (2005-2014)

Nella Figura 235 sono riportati i sedimentogrammi inseriti nel calcolo relativi agli affluenti ritenuti significativi.

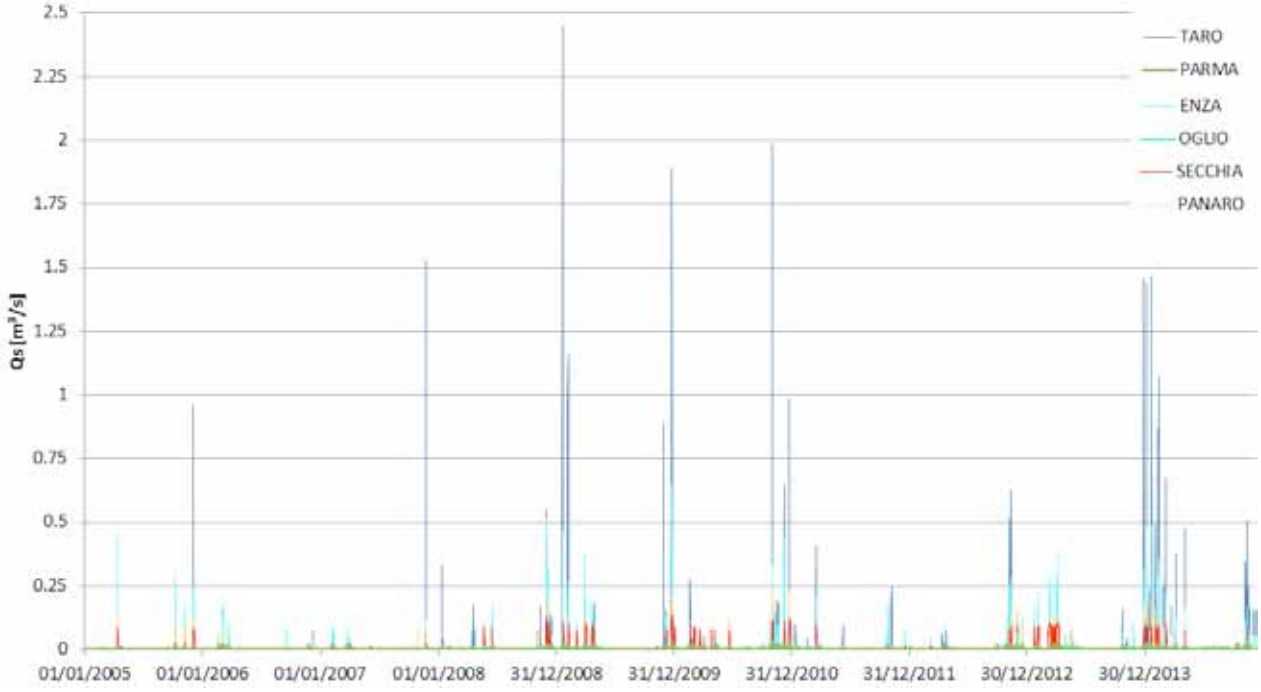


Figura 235 – Sedimentogrammi relativi agli affluenti, inseriti nel calcolo.

I sedimentogrammi relativi agli apporti del F. Po inseriti in ciascuno dei tratti successivi al primo sono stati ricavati dai risultati del tratto immediatamente a monte; i contributi degli affluenti sono stati aggiunti come condizione in ingresso nei tratti più prossimi alle confluenze, ed in particolare:

- il contributo del F. Taro è stato inserito in ingresso al tratto 3;
- il contributo di Parma ed Enza è stato inserito in ingresso al tratto 4;
- il contributo del F. Oglio è stato inserito in ingresso al tratto 5;
- il contributo del F. Secchia è stato inserito in ingresso al tratto 7;
- il contributo del F. Panaro è stato inserito in ingresso al tratto 8.

Come riferito di seguito, per la taratura del modello si è utilizzata la serie storica di 2 anni, compresa tra 03.07.2007 e 03.07.2009, caratterizzata da un regime idrologico tranquillo nel primo periodo e più vivace nel secondo.

9.5.3 Caratteristiche granulometriche

Il modello tiene contro dei nuovi dati conoscitivi, attinenti alle granulometrie, derivanti dalle attività di campionamento effettuate nell'ambito del presente studio (cfr. paragrafo 4.3), e riproduce in continuo le diverse dinamiche evolutive già messe in evidenza nel Programma Generale di Gestione dei Sedimenti ed aggiornate nel presente studio, per quanto riguarda l'assetto attuale, valutando quindi l'influenza degli interventi previsti (regimazione e sistemazione a corrente libera) sul trasporto solido al fondo del Po, sia lungo il tratto interessato dalle opere, sia con riferimento all'incile del Delta del Po.

I valori delle granulometrie sono stati inseriti per tratti stabilendo, in funzione del grado di consolidamento delle forme di fondo e della copertura vegetale, quale parte del dominio di calcolo è considerata "mobile", cioè erodibile, e quale parte, invece, non erodibile.

Sono stati effettuati alcuni test preliminari per valutare la sensibilità del modello e le differenze in termini di restituzione dei risultati utilizzando come dato di input 3 frazioni granulometriche (D28, D50, D84) oppure un'unica frazione (D50). Tali test non hanno evidenziato differenze significative, pertanto si è scelto di utilizzare per ciascun tratto un'unica granulometria. In generale, i valori di D50 utilizzati variano da 0.49 a 0.35 mm (da monte verso valle).

La Figura 236 riporta un esempio delle aree considerate non erodibili, nel terzo tratto a monte di foce Parma.

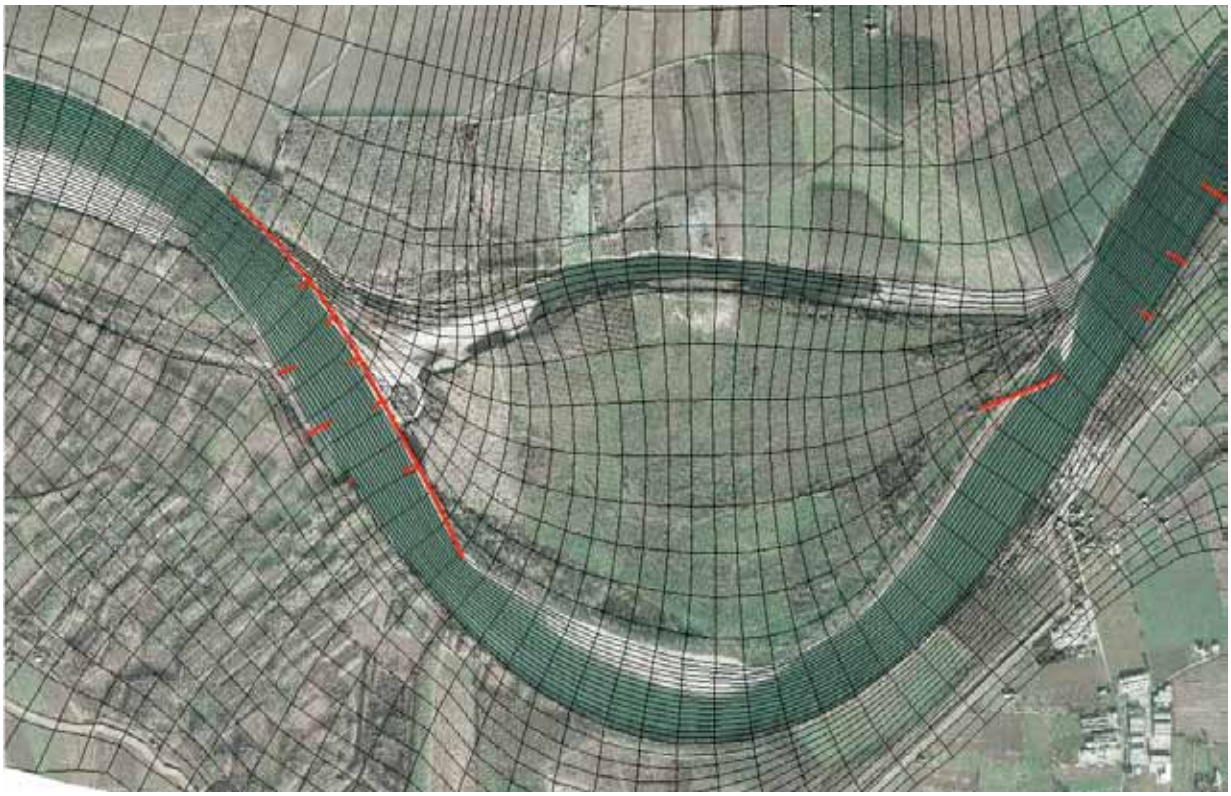


Figura 236 – Esempio delle aree considerate non erodibili, rappresentate in grigio, nel terzo tratto a monte di foce Parma, oltre alle opere longitudinali e trasversali, rappresentate in rosso.

9.5.4 Scabrezze

La definizione della mappa delle scabrezze, inserita nel modello come condizione di input, ha tenuto conto delle caratteristiche vegetazionali, di uso del suolo e granulometriche in alveo. In generale si è distinto tra:

- l'alveo di magra;
- le barre sabbiose;
- le barre fluviali vegetate e le aree golenali caratterizzate da vegetazione o colture erbacee;
- le barre fluviali vegetate e le aree golenali caratterizzate da presenza di alberi e arbusti.

La taratura del modello è avvenuta considerando i livelli della piena del 2000, facendo riferimento ai valori riportati nel documento dell'Autorità di Bacino del fiume Po "Aggiornamento catasto arginature del fiume Po da foce Tanaro all'incile del Po di Goro – Riepilogo dati principali (nov. 2004)".

La Figura 237 riporta un estratto della mappa delle scabrezze inserita nel modello ricavata del processo di taratura, in un tratto a valle di foce Mincio.

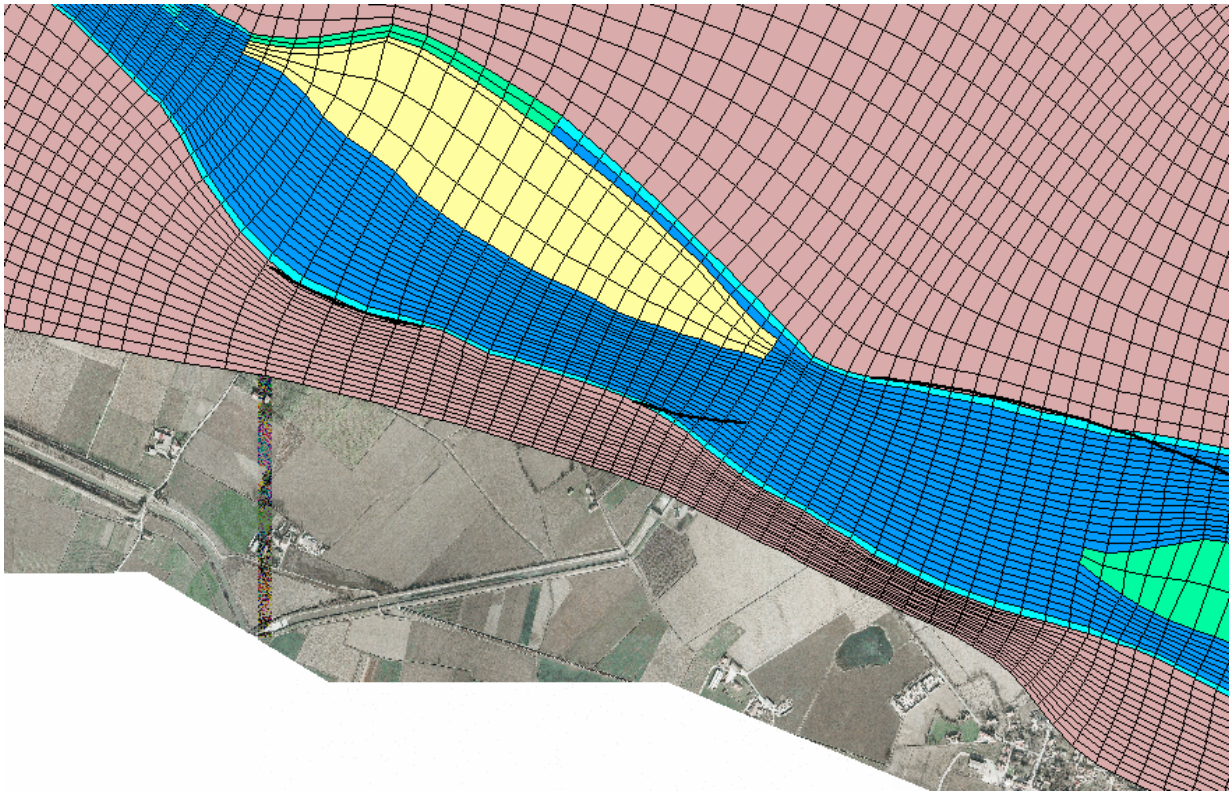


Figura 237 – Estratto della mappa delle scabrezze inserita nel modello ricavata del processo di taratura, in un tratto a valle di foce Mincio, valori espressi come coefficiente di Strickler ($m^{1/3}s^{-1}$)

9.5.5 Opzioni di calcolo utilizzate e formule di trasporto solido

I calcoli sono stati impostati analizzando i tratti in cui è stata suddivisa l'area di studio da monte verso valle, in modo da utilizzare i risultati del tratto di monte, con particolar riferimento ai sedimentogrammi e quindi ai volumi movimentati, come condizioni a contorno in ingresso del tratto immediatamente a valle.

Lo schema di calcolo morfodinamico si compone di diverse componenti; quelle utilizzate nelle simulazioni sono:

- *Helical Flow*: il modulo computa il flusso elicoidale in presenza di curve ed i suoi effetti sul trasporto in sospensione;
- *Sediment Transport (bed load and/or suspended load)*: il modulo riguarda il trasporto solido e permette di scegliere i parametri e le formulazioni;
- *Alluvial Resistance:* questa opzione consente di modificare il coefficiente di scabrezza in funzione

dell'altezza d'acqua nella cella e di altri parametri di calcolo – questa componente è stata utilizzata solo nei primi tratti di studio, dove il fiume risulta più sinuoso;

- *Morphological Update:* calcola le variazioni altimetriche del fondo.

Il modulo morfodinamico, oltre all'equazione di continuità dei sedimenti, include diverse formule di trasporto solido. In generale, il trasporto al fondo e in sospensione vengono calcolati separatamente:

- il trasporto al fondo (*bed load*) viene valutato calcolando la capacità di trasporto al fondo in forma esplicita note le grandezze idrodinamiche; il valore viene poi modificato tenendo conto dell'effettiva disponibilità di volume di sedimento rispetto alla capacità calcolata;
- il trasporto in sospensione (*suspended load*) è valutato risolvendo l'equazione convettiva-diffusiva scritta per la rappresentazione della dinamica sul piano orizzontale della concentrazione c media sulla verticale.

La scelta della formula di trasporto è avvenuta a valle di alcuni test effettuati per valutare la risposta del modello all'applicazione delle diverse formule disponibili (Engelund & Hansen, Engelund & Fredsoe, Van Rijn, Yang, Meyer-Peter and Muller, ecc.). La formula di Van Rijn è stata utilizzata per avere indicazioni sulla ripartizione tra trasporto al fondo e trasporto in sospensione nei tratti di studio, in quanto questa formula dipende, oltre che dal deflusso e dalle caratteristiche dei sedimenti, anche dalle condizioni critiche di incipiente movimento della fase in sospensione, e permette di calcolare le due componenti separatamente.

Le simulazioni sono state condotte invece utilizzando la formulazione di Engelund & Hansen, in cui la ripartizione tra trasporto solido sospeso e al fondo è stata imposta secondo i test effettuati utilizzando la formula di Van Rjin.

9.6 CALIBRAZIONE DEL MODULO MORFODINAMICO

La calibrazione morfodinamica ha come obiettivi il rispetto dei volumi movimentati e la corretta rappresentazione della morfologia fluviale nel tempo. Nel MIKE 21C i parametri che si possono regolare a tal fine e che compaiono nelle diverse formulazioni del trasporto solido sono principalmente l'effetto dei flussi elicoidali e delle pendenze del fondo alveo sul trasporto solido al fondo, che controllano entità e direzione dell'attrito al fondo e quindi del trasporto solido in direzione trasversale, e l'intensità delle formule di trasporto.

Per quanto riguarda la rappresentazione della morfologia fluviale nel tempo, non avendo a disposizione misure batimetriche ante e post un evento significativo, si è fatto riferimento ai dati topografici disponibili (DTM del 2005, DTM della sola batimetria del 2010) ed alle ortofoto disponibili per diversi anni nel periodo considerato (2000, 2005, 2010, 2012). La fase di calibrazione del modello ha preso in considerazione diversi aspetti dell'evoluzione morfologica, quali l'evoluzione delle barre durante la simulazione. La Figura 238 riporta a titolo di esempio i risultati di alcuni test effettuati per valutare l'influenza dei diversi parametri di calcolo sulla conservazione delle barre al termine di un periodo simulato di 1 anno in un tratto sinuoso:

- nel primo caso sono stati utilizzati i parametri di default;
- nel secondo caso è stato introdotto il modulo di "alluvial resistance" descritto al paragrafo precedente, che permette di modificare il coefficiente di scabrezza in funzione dell'altezza d'acqua nella cella: si riscontra una migliore conservazione delle barre rispetto al caso precedente;
- nel terzo caso sono stati modificati i parametri che regolano il trasporto solido in direzione trasversale: si osserva una incisione delle curve ed un accrescimento delle barre;

nel quarto caso sono stati attribuiti valori di scabrezza differenti alle barre ed all'alveo bagnato, ottenendo anche in questo caso un effetto di conservazione delle barre.

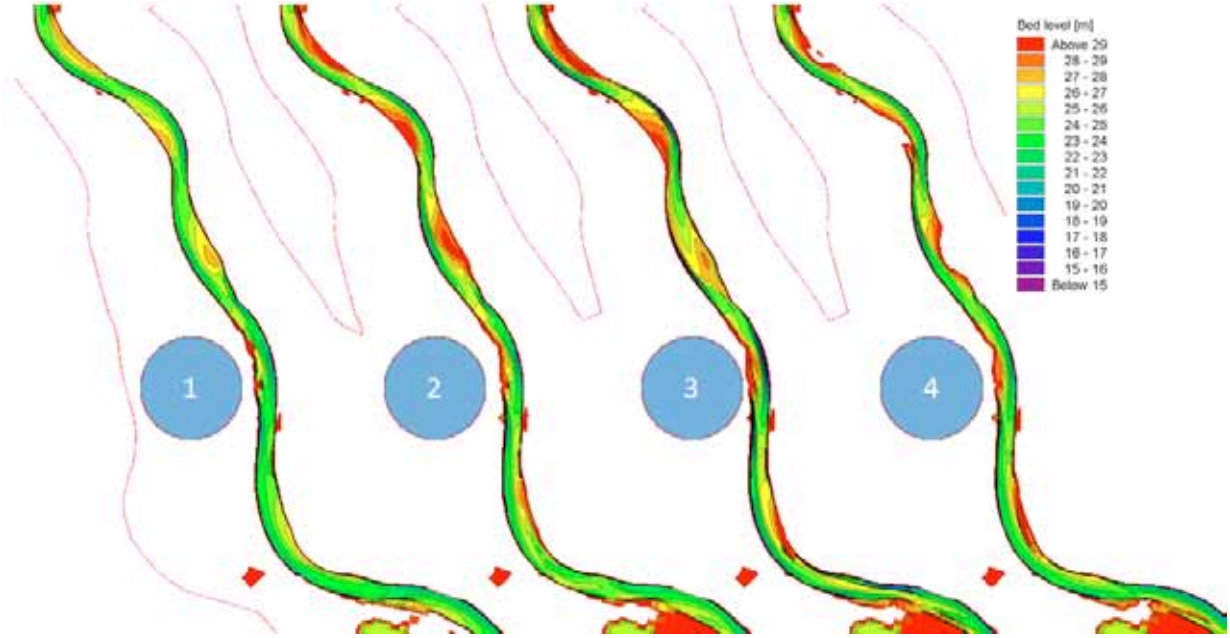
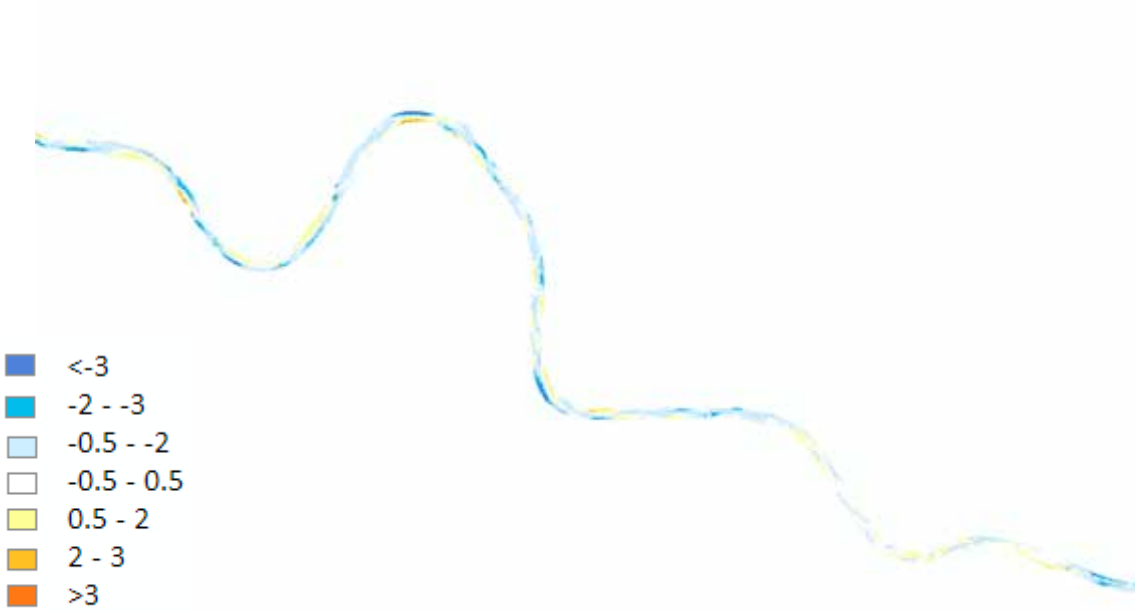


Figura 238 – Test effettuati sui parametri morfodinamici: confronto tra quattro batimetrie finali di calcolo in funzione dei parametri di simulazione.

Alla luce delle prove effettuate, come precedentemente indicato, il modulo di "alluvial resistance" è stato inserito nel modello nei tratti simili a quello del test, mentre negli altri casi si è agito sui parametri che regolano la componente trasversale del trasporto solido, avvicinando il modello ad un calcolo quasi-3D.

Si riportano di seguito alcuni esempi dell'evoluzione morfologica in termini di modifiche al fondo, confrontate con le differenze ottenute dal confronto delle batimetrie rilevate nel 2010 e nel 2005.

Il modello restituisce risultati confrontabili con il dato sperimentale rispetto alle zone in deposito/erosione, soprattutto in alcuni tratti (cfr. ad esempio la Figura 239 relativa al tratto T3); in altri amplifica l'effetto di deposito/erosione. Va tenuto presente che le simulazioni si riferiscono a 2 anni vivaci e non a 10, inoltre non è disponibile il confronto sulle barre.



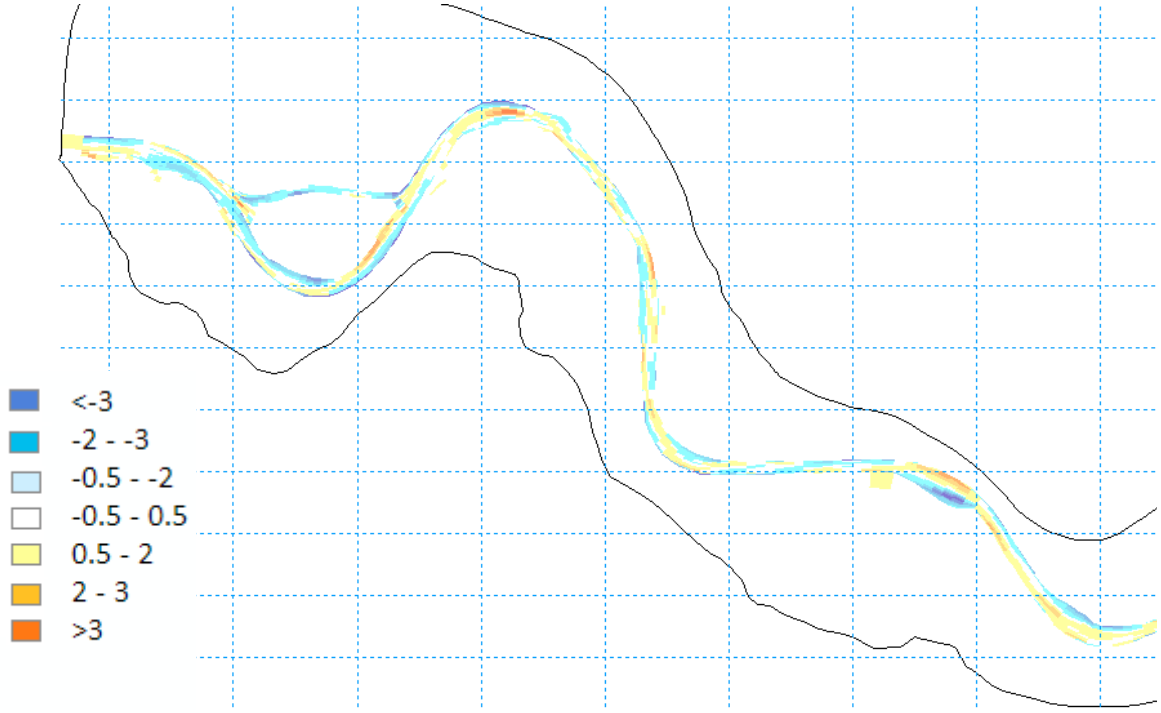


Figura 239 – Confronto tra il dato sperimentale ed il dato numerico – Tratto 3: in alto differenza delle batimetrie ottenute da rilievi batimetrici 2010 – 2005, in basso differenze batimetriche ottenute dalla modellazione nel periodo 2009 – 2007 (in scala di rosso i depositi, in scala di blu le erosioni)

La taratura del modello, riferita ai bilanci volumetrici, è avvenuta invece regolando i parametri che regolano l'intensità delle formule di trasporto, tratto per tratto.
Il periodo scelto per la taratura del modello è il biennio 03.07.2007 – 03.07.2009 caratterizzato da un periodo iniziale con portate basse, buono per l'avviamento del calcolo, e da un secondo periodo più vivace, utile a verificare il comportamento del modello sollecitato da eventi di piena (Figura 240): complessivamente, in tale biennio, la portata solida in ingresso a Cremona è pari a 5.3 milioni di m³/anno.

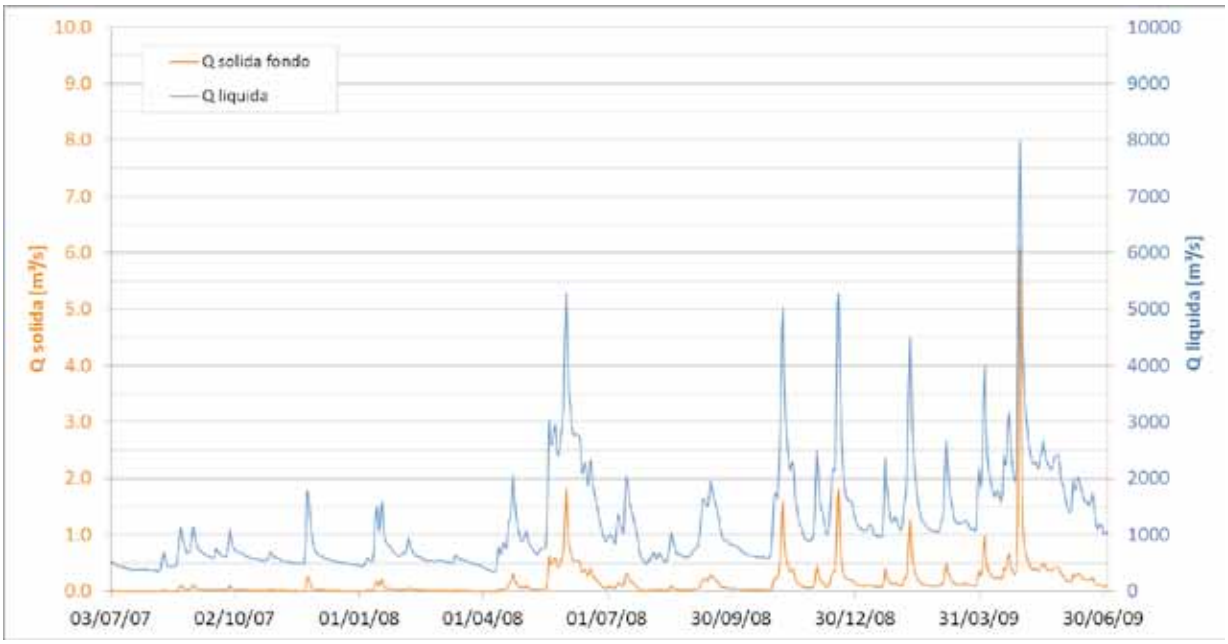


Figura 240 – Serie storica di portate solide e liquide utilizzate nella fase di taratura.

La taratura del modello si basa sui bilanci volumetrici ricavati dal Piano Generale di Gestione Sedimenti (in seguito PGGS), e dal confronto dei rilievi batimetrici del 2010 e del 2005 disponibile nel

tratto tra Cremona e foce Mincio. In particolare le letture da PGGS si riferiscono alle curve cumulate 1982-2005 di Figura 241, mentre le letture da DTM si riferiscono alla curva cumulata 2005-2010 di Figura 242 riferita al progetto AIPo di sistemazione a corrente libera e pertanto determinata solo nel tratto Cremona – foce Mincio.

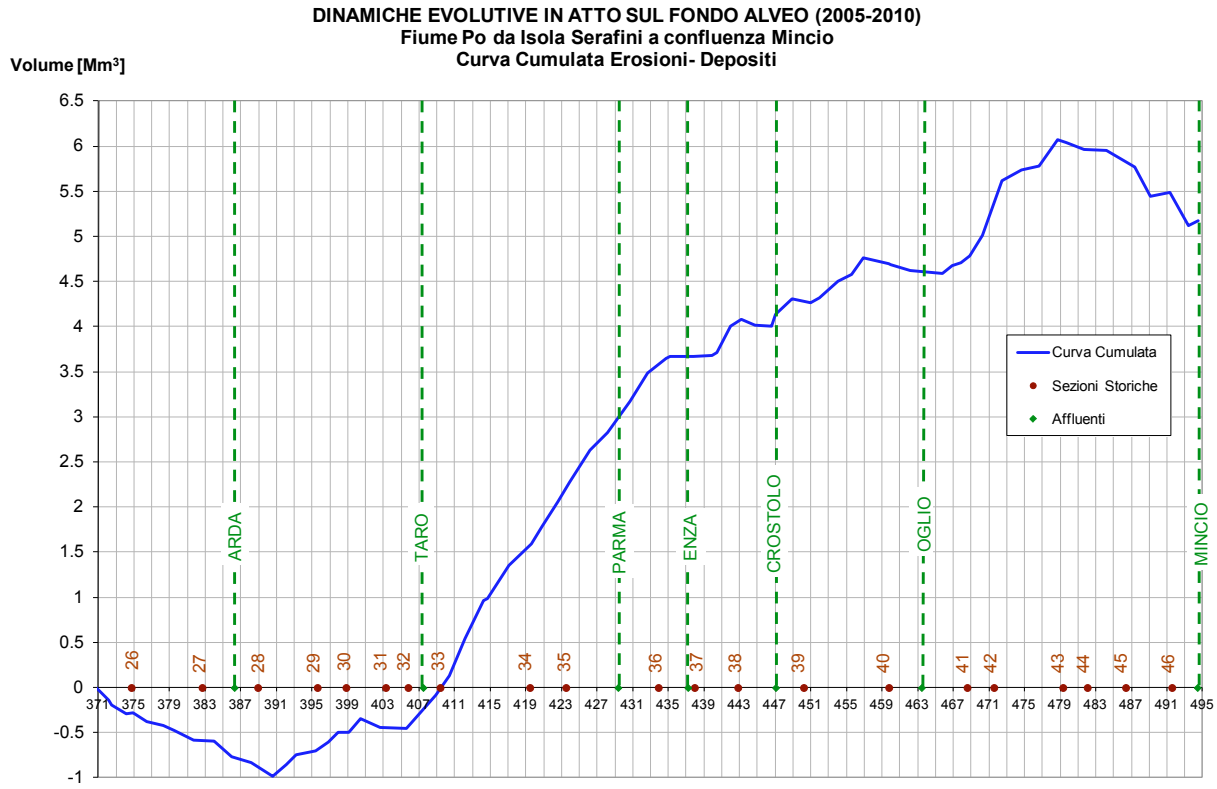


Figura 241 – Andamento delle singole componenti del bilancio medio annuo del trasporto solido al fondo del Po nel periodo 1982 – 2005 (ricavato dai risultati degli studi sui sedimenti dell'AdBPo).

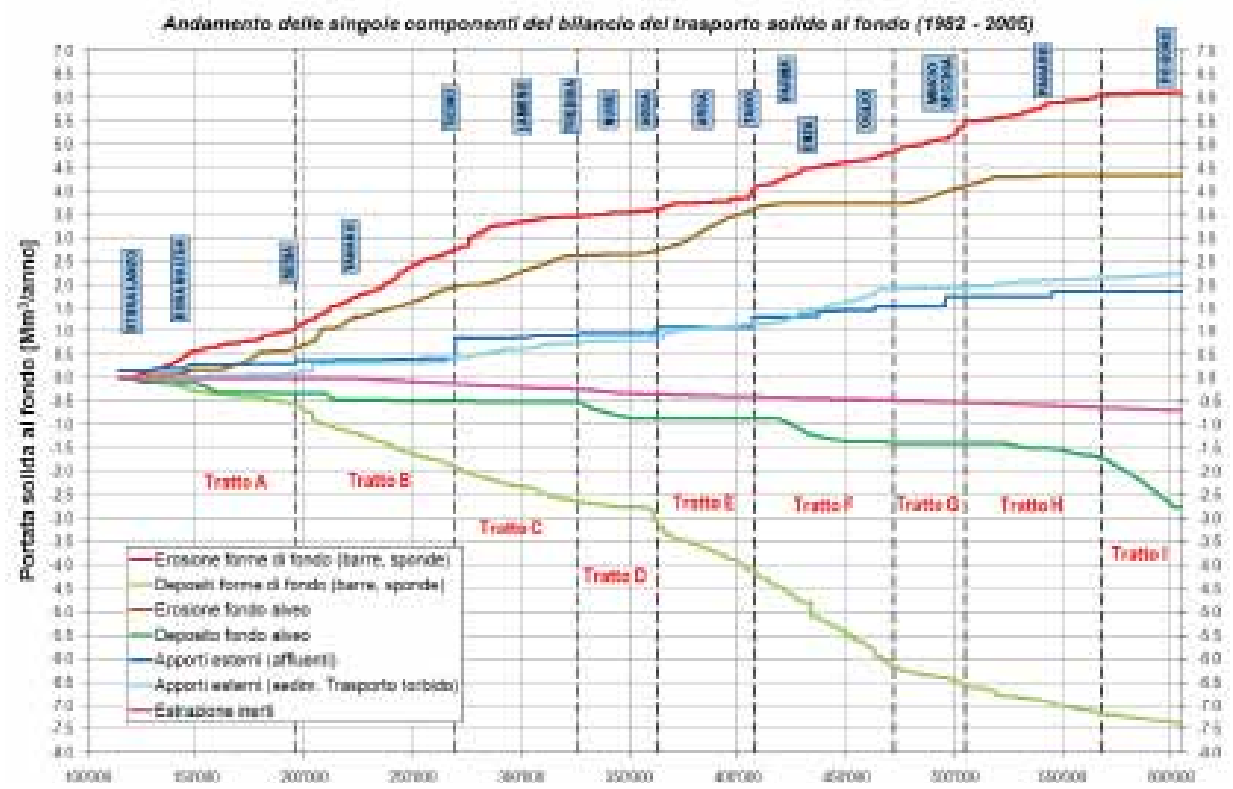


Figura 242 – Confronto DTM 2005 – 2010 – Analisi dinamiche evolutive in atto nel fondo alveo. Curva cumulata erosioni - depositi.

I volumi totali considerati per la taratura derivano pertanto:

- per il tratto fino a foce Mincio: dalle informazioni barre "PGGS" + fondo "DTM";
- per il tratto da foce Mincio a Po di Goro: dalle informazioni barre "PGGS" + fondo "PGGS".

In tabella il tratto 4a è suddiviso in due tratti in quanto dal confronto tra i DTM 2005-2010 emergono tendenze opposte del fondo alveo (erosione nel I tratto; deposito nel II tratto).

Tratto		Da PGGS (1982-2005)				Da DTM 2005-2010		Totali da considerare per la taratura modello	
		Barre		Fondo alveo		Fondo alveo			
n.	fino a km	Erosione	Deposito	Erosione	Deposito	Erosione	Deposito	Barre (PGGS) + Fondo (DTM)	Barre (PGGS) + Fondo (PGGS)
		Δ Mmc/a	Δ Mmc/a	Δ Mmc/a	Δ Mmc/a	Δ Mmc/a	Δ Mmc/a	Δ Mmc/a	Δ Mmc/a
1	391 (foce Arda)	-0.05	0.25	-0.40			0.20	0.40	
2	413 (valle foce Taro)	-0.35	0.55	-0.40		-0.34		-0.14	
3	448 (foce Crostolo)	-0.50	1.10		0.45	-0.70		-0.10	
4	461 (monte foce Oglio)	-0.10	0.35			-0.08		0.17	
5	472 (Borgoforte)	-0.10	0.45		0.05	-0.14		0.21	
6 I	479					-0.16		-0.16	
6 II	493 (foce Mincio)	-0.30	0.20	-0.20	0.05		0.02	-0.08	
7	510 (valle Ostiglia)	-0.40	0.20	-0.30	0.00				-0.50
8	560 (Occhiobello)	-0.40	0.50	-0.15	0.15				0.10
9-10	604 (Po di Goro)	-0.20	0.30	0.00	1.15				1.25

Tabella 98 – Volumi considerati per la taratura del modello.

La Figura 243 seguente mostra i risultati della taratura in termini di bilanci volumetrici per ciascun tratto simulato rispetto ai dati di taratura.

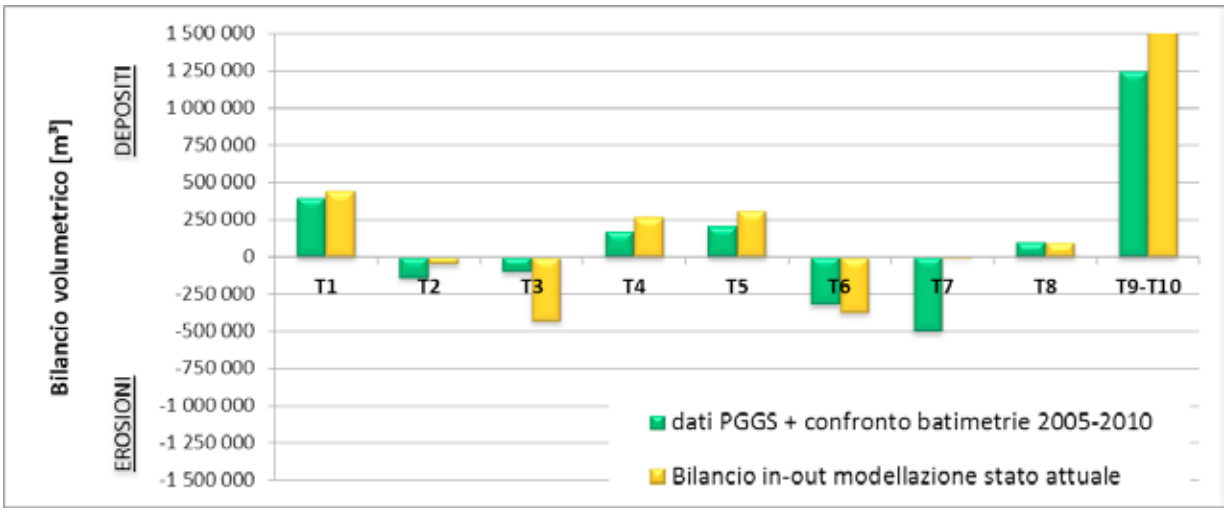


Figura 243 – Risultati della taratura in termini di bilancio dei volumi per ciascuno dei tratti simulati (lug.2007-lug.2009).

Come scritto all'inizio del paragrafo, ciascun tratto è stato tarato applicando valori differenti dei coefficienti che regolano l'intensità del trasporto solido, nel campo di validità ammissibile del modello: come si osserva dagli istogrammi di Figura 243 il modello risponde ai dati di taratura, con la singolarità del tratto T3 (foce Taro – foce Crostolo), dove il modello tende ad una maggior erosione, e del tratto T7 (foce Mincio – Ostiglia), dove il modello tende ad un equilibrio a differenza dei dati sperimentali che mostrano erosione.

Come si vede le differenze volumetriche indicate dalla Figura 14 restano contenute in percentuali pienamente accettabili in rapporto al trasporto di fondo globale.

Infine, come riportato in Figura 244, si è verificato che il modello riproduce in maniera fedele la capacità di trasporto osservata a Cremona.

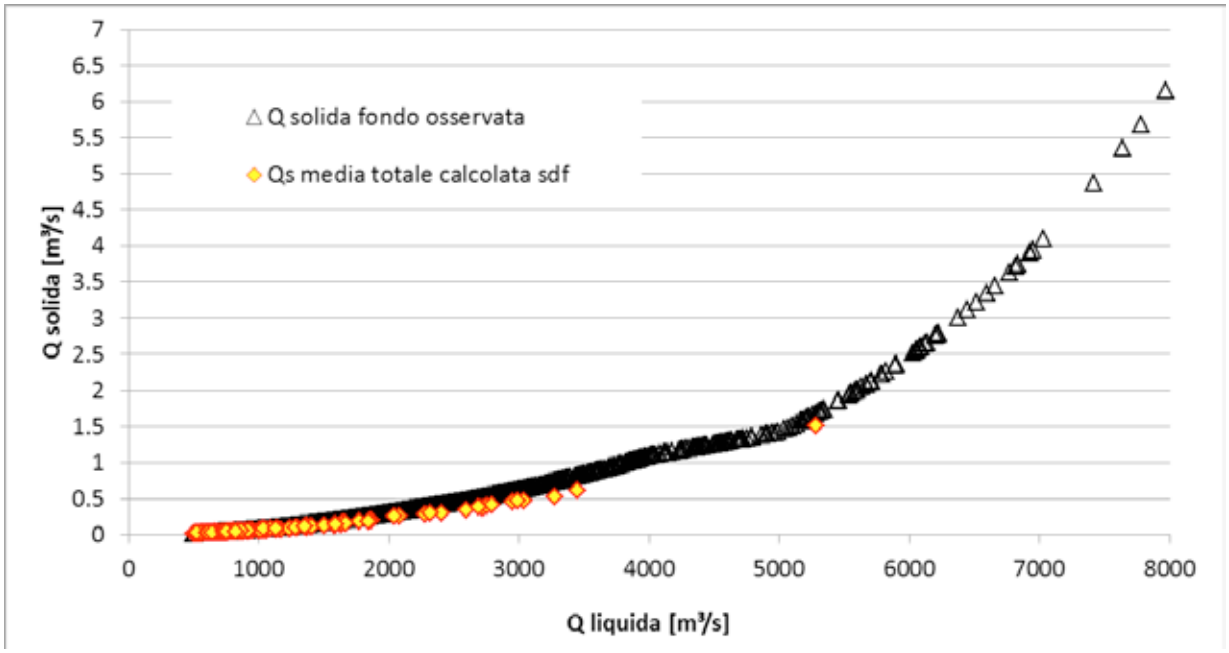


Figura 244 – Confronto tra la relazione portata liquida – solida osservata, ed utilizzata per ricavare i sedimentogrammi in ingresso a Cremona, e calcolata dal modello nel primo tratto.

Il modello così tarato si ritiene pertanto adeguato a rispondere agli obiettivi dello studio inizialmente preposti.

9.7 RISULTATI

9.7.1 Premessa

La modellazione morfodinamica consente di determinare i volumi di sedimento movimentati (erosi o depositati) e la variazione delle quote del fondo alveo e delle barre interessate dai fenomeni erosivi/deposizionali così da ottenere indicazioni sulle tendenze evolutive del corso d'acqua nei tre scenari necessari per il confronto: stato di fatto senza opere nuove, progetto di regimazione, progetto di sistemazione a corrente libera. Precisamente in ogni scenario la modellazione è stata effettuata implementando come condizioni morfologiche iniziali quelle note al 2005 e prolungando la ricostruzione delle dinamiche (simulazione continua) sia nel biennio della serie idrologica prima citata utilizzata per la taratura del modello, sia nell'intera serie decennale 2005 – 2014. I risultati hanno quindi consentito di valutare i confronti di bilancio del trasporto solido e di morfologia batimetrica nell'istante terminale delle suddette serie idrologiche, conseguenti ai tre suddetti scenari.

9.7.1.1 Progetto di regimazione. Regolazione delle traverse.

Le prime simulazioni effettuate relativamente alla configurazione di regimazione hanno mostrato l'influenza sul trasporto solido della frequenza di apertura degli sbarramenti in progetto.

Precisamente le simulazioni condotte in prima fase hanno riprodotto la regola gestionale considerata nello Studio AIPO 2009, che prevedeva la chiusura delle paratoie nei regimi di magra o morbida con portate inferiori ai valori, variabili da traversa a traversa, di 2000 – 2500 m3/s e la totale apertura delle medesime per portate superiori, con corrispondente pieno ripristino della continuità idraulica e sedimentologica del fiume. Tale regola gestionale, nell'alternanza del regime idrologico del Po, comporta una durata media annua complessiva dei periodi di chiusura di circa 320 giorni/anno, come mostrano le curve di durata delle portate riportate nel precedente par. 3.1.2. Ovviamente nei periodi di chiusura il rallentamento della corrente nei tratti a monte dei sostegni, conseguente

alla regolazione del livello idrico, induce tendenze al deposito delle componenti granulometriche più fini dei sedimenti che partecipano al trasporto di fondo. Depositi che poi tendono ad essere rimovimentati nei periodi di apertura delle traverse.

Dalle prime risultanze del modello è emerso come, infatti, complessivamente nella serie decennale 2005-2014 delle portate giornaliere considerate si manifesti una complessiva tendenza al deposito nei tratti di fiume rallentati a monte delle traverse. Si tratta comunque di una tendenza che naturalmente non può mantenersi all'infinito dal momento che ad un progressivo aumento dei depositi corrisponde un incremento dell'azione di trascinamento e quindi una tendenza asintotica ad una condizione di equilibrio.

Comunque, tale tendenza al deposito può valutarsi positivamente o negativamente in funzione di differenti aspetti. Infatti:

- avrebbe il vantaggio di produrre un recupero sia pure parziale dei fondali e quindi dei livelli idrici oggi molto abbassati tra Cremona e foce Mincio, con corrispondente contrasto alla canalizzazione oggi lamentata;
- potrebbe avere controindicazioni se dovesse compromettere i tiranti idrici necessari in magra per la navigazione;
- potrebbe avere controindicazioni nei riguardi della tendenza all'erosione localizzata nei tratti a valle delle traverse, ove la corrente tende a recuperare dai sedimenti di fondo il minore apporto da monte.

In considerazione di ciò si è ritenuto di accertare se una differente regola gestionale comportante una durata maggiore dei periodi di apertura potesse minimizzare o eliminare tali effetti. Analizzando le suddette curve di durata si è quindi deciso di verificare un nuovo limite di regolazione ben minore del precedente e pari a 1'200 m3/s, uguale per tutte e cinque le traverse.

Con tale limite la durata media annua dei periodi di apertura delle traverse aumenta considerevolmente e supera i 100 giorni/anno (in particolare, 110 per la prima e la seconda traversa, 125 per la terza, 155 per la quarta e 180 per la quinta); quindi la durata di chiusura è di circa 185 ÷ 255 giorni/anno, a seconda della traversa.

Avendo in effetti riscontrato dai risultati preliminari del modello l'effetto positivo di tale modifica della regola gestionale, si è pertanto deciso di far riferimento a quest'ultima configurazione che prevede l'apertura delle paratoie per portate superiori a 1'200 m³/s, anziché per portate superiori a 2'000 m³/s come invece prevedeva l'ipotesi progettuale di partenza.

9.7.1.2 Progetto di sistemazione a corrente libera.

Per il progetto di sistemazione a corrente libera, introdotti nel modello tutti i pennelli longitudinali e trasversali prima descritti (v. cap. 6), per la simulazione su periodo di due anni si è scelto di procedere modificando rispetto alla situazione 2005 la configurazione iniziale del fondo alveo. Poiché infatti le opere hanno proprio lo scopo di risolvere le criticità dei bassi di navigazione oggi lamentati, in tali posizioni è stata introdotta nel modello come condizione iniziale una geometria del fondo alveo già compatibile con l'ubicazione delle opere e con i tiranti utili per la navigazione.

La modellazione ha poi ovviamente continuamente modificato tale configurazione iniziale simulando i fenomeni di erosione/deposito e le migrazioni lungo l'alveo delle forme sedimentarie e quindi verificando l'effetto delle opere nel mantenimento o meno dei tiranti di navigazione nel tempo e al suo termine delle serie simulate.

9.7.1.3 Simulazioni effettuate.

Le simulazioni effettuate su breve periodo (2 anni) hanno riguardato il corso d'acqua da Cremona all'incile Po di Goro in tutti gli scenari (stato attuale, regimazione con apertura delle traverse per portate superiori a 1'200 m³/s, regimazione con apertura delle traverse per portate superiori a 2'000 m³/s, sistemazione a corrente libera).

Le simulazioni effettuate su medio periodo (10 anni) hanno riguardato:

- il corso d'acqua da Cremona all'incile Po di Goro nello stato attuale (batimetria iniziale ricavata

dal DTM 2005);

- il corso d'acqua da Cremona all'incile Po di Goro nello scenario di regimazione con apertura delle traverse per portate superiori a 1'200 m³/s (batimetria iniziale ricavata dal DTM 2005);
- il corso d'acqua da foce Mincio all'incile Po di Goro nello scenario di sistemazione a corrente libera che comprende le nuove opere progettate nell'ambito del presente studio (batimetria iniziale ricavata dal DTM 2005 e modificata localmente per tener conto dell'inserimento delle opere): è stato escluso nelle simulazioni di medio periodo il tratto da Cremona a foce Mincio, le cui opere, già oggetto di verifica e progettate a livello definitivo, non alterano in maniera consistente la morfologia dell'alveo, ma come emerso dalle simulazioni su periodo di due anni risolvono le criticità locali.

Il presente studio restituisce i risultati necessari al confronto tra i due schemi progettuali in termini di:

- andamento dei volumi di materiale solido trasportato nelle diverse configurazioni, con riferimento a diversi periodi di analisi;
- batimetrie ricavate dal modello di calcolo riferite all'istante finale di simulazione di medio periodo (10 anni) elaborate in ambiente GIS per ottenere un confronto più immediato tra i diversi scenari simulati (stato attuale, scenario di regimazione, scenario di sistemazione a corrente libera);
- verifiche puntuali in alcune sezioni trasversali al fine di verificare situazioni locali.

Di seguito si descrivono le considerazioni emerse dalle analisi effettuate ed i relativi estratti cartografici di supporto.

9.7.2 Bilanci volumetrici

I risultati delle simulazioni sono stati elaborati per ottenere grafici che evidenzino l'andamento dei volumi trasportati lungo il corso d'acqua, e conseguentemente individuino i tratti in erosione o deposito, nelle diverse configurazioni implementate.

9.7.2.1 Risultati delle simulazioni di breve periodo (2 anni)

Come già esposto il modello è stato calibrato utilizzando una serie idrologica breve della durata di due anni, che ha permesso di effettuare una prima verifica di sensibilità del modello al variare degli scenari progettuali. Ciò per valutare come le diverse routine di calcolo e i loro parametri caratteristici, calibrati come prima esposto in relazione allo stato attuale (2005) dell'alveo, potessero rispondere anche in presenza di opere modificanti in modo significativo l'assetto dell'alveo.

I risultati ottenuti, utili per il suddetto scopo, hanno confermato l'affidabilità delle scelte modellistiche effettuate, ma ovviamente non possono considerarsi utili per considerazioni conclusive sui diversi scenari progettuali, dal momento che le dinamiche morfologiche di un fiume quale il Po non possono essere apprezzabili con una serie di durata solo biennale.

Con tale importante avvertenza si riportano qui di seguito le principali considerazioni ricavate dai risultati ottenuti con la suddetta serie breve biennale.

La Figura 245 mostra l'andamento delle curve cumulate erosioni/depositi relative ai quattro scenari implementati, ricavate dalle simulazioni effettuate per tarare il modello, su periodo di simulazione di 2 anni (breve periodo). L'andamento decrescente delle curve indica deposito mentre l'andamento crescente delle curve indica erosione.

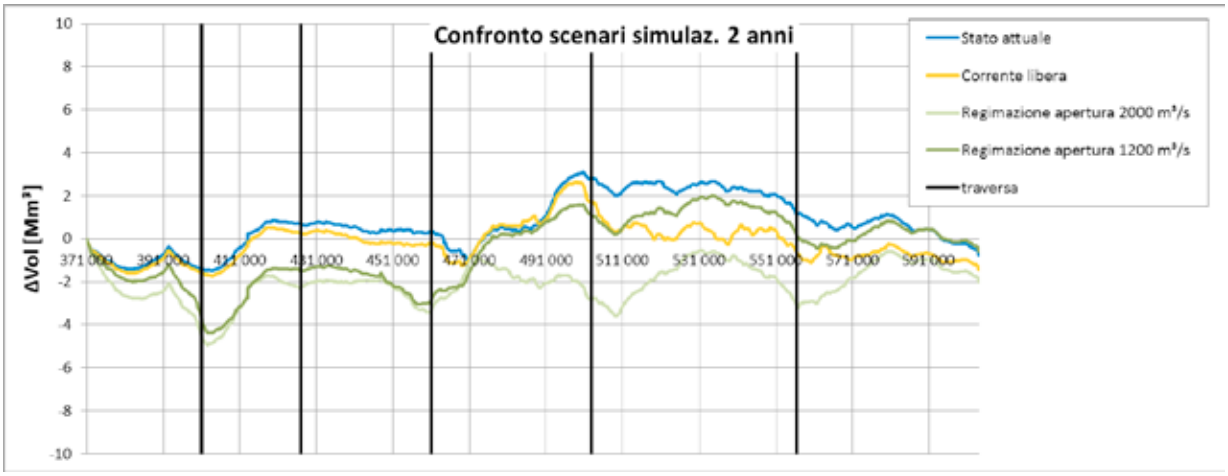


Figura 245 – Curve cumulate erosioni/depositi relative ai quattro scenari implementati, ricavate dal periodo di simulazione di 2 anni (periodo di taratura)

Le osservazioni che emergono dall'analisi dei risultati delle simulazioni sul periodo di due anni e dalla figura precedente sono le seguenti:

- nello stato attuale, tarato con le modalità descritte al paragrafo 9.6, fino alla progressiva 400 km si ha una tendenza generalizzata al deposito. Oltre tale progressiva le golene presentano un'estensione ridotta e l'andamento del corso d'acqua appare meno sinuoso; dal punto di vista morfologico si ha una inversione di tendenza con erosioni distribuite fino a foce Oglio. A valle di foce Secchia il modello mostra una tendenza al deposito, progressiva fino all'incile di Po di Goro;
- gli scenari relativi alla regimazione mostrano una tendenza al deposito più marcato nel primo tratto, dovuto all'effetto della prima traversa; i risultati mostrano, invece, che la seconda traversa non altera in maniera significativa il trasporto solido; la terza e la quarta traversa determinano depositi nei tratti di monte differentemente da quanto accade nello stato attuale; la quinta traversa è situata in un tratto che già nello stato attuale tende al deposito ed i risultati del modello non mostrano differenze sostanziali;
- il confronto tra gli scenari di regimazione caratterizzati da frequenze di apertura differenti, ovvero per portate superiori a 1'200 m³/s (linea verde scuro) e per portate superiori a 2'000 m³/s (linea verde chiaro), evidenzia il maggior impatto della seconda configurazione rispetto alla prima, sia in termini di maggiori depositi a monte delle opere, sia di erosioni a valle delle stesse;
- lo scenario di sistemazione a corrente libera restituisce risultati del tutto simili a quelli dello stato attuale fino a foce Mincio: le opere previste fino a foce Mincio non alterano infatti in maniera sostanziale il corso d'acqua, ma intervengono a risolvere criticità locali; tra le progressive 500 km e 520 km si registra una tendenza al deposito maggiore che nello stato di fatto, dovuto ai depositi a tergo delle opere in progetto (pennelli); questa tendenza al deposito tende a diminuire proseguendo verso valle;
- in generale, le simulazioni sui due anni considerati per la taratura mostrano che gli scenari di progetto analizzati non modificano considerevolmente l'apporto di volume solido al delta rispetto alla simulazione relativa allo stato attuale: il corso d'acqua tende infatti a recuperare dal letto il materiale che viene trattenuto dalle opere, mantenendo quella che è la sua capacità di trasporto.

Rispetto alla modellazione dello scenario di sistemazione a corrente libera, effettuata su periodo di 2 anni, si deve tener presente che la batimetria di calcolo iniziale, data in input al modello, differisce in alcuni tratti rispetto a quella dello stato attuale, che è stata modificata in maniera estesa, abbassando il fondo a quote compatibili con le opere in progetto, pertanto la "distanza" tra le due curve (azzurra – stato attuale – e arancione – corrente libera) di Figura 245 è dovuta anche a questa impostazione.

9.7.2.2 Risultati delle simulazioni su medio periodo (10 anni)

L'analisi dei risultati delle simulazioni effettuate sul medio periodo (10 anni) mostra come l'evoluzione

del corso d'acqua tenda ad un equilibrio nelle due configurazioni di progetto.

In particolare, l'andamento delle curve dei volumi medi annui di erosione e deposito presentano un andamento meno marcato rispetto alla curva riferita ai due anni, pur mantenendo in generale la tendenza dei diversi tratti.

Al fine di interpretare le risposte del modello numerico, sono state ricavate e confrontate le curve medie dei volumi cumulati erosioni/depositi sul periodo di 10 anni e su quattro periodi di 2 anni ritenuti significativi compresi nei 10 analizzati, individuati in Figura 246, caratterizzati dai volumi di apporto solido medio annuo indicati in Tabella 99. I bienni 2007-2009, 2010-2012 e 2012-2014 sono caratterizzati da apporti superiori alla media, al contrario del biennio 2011-2013 che è stato considerato per esaminare la risposta del modello in un periodo caratterizzato da minori afflussi.

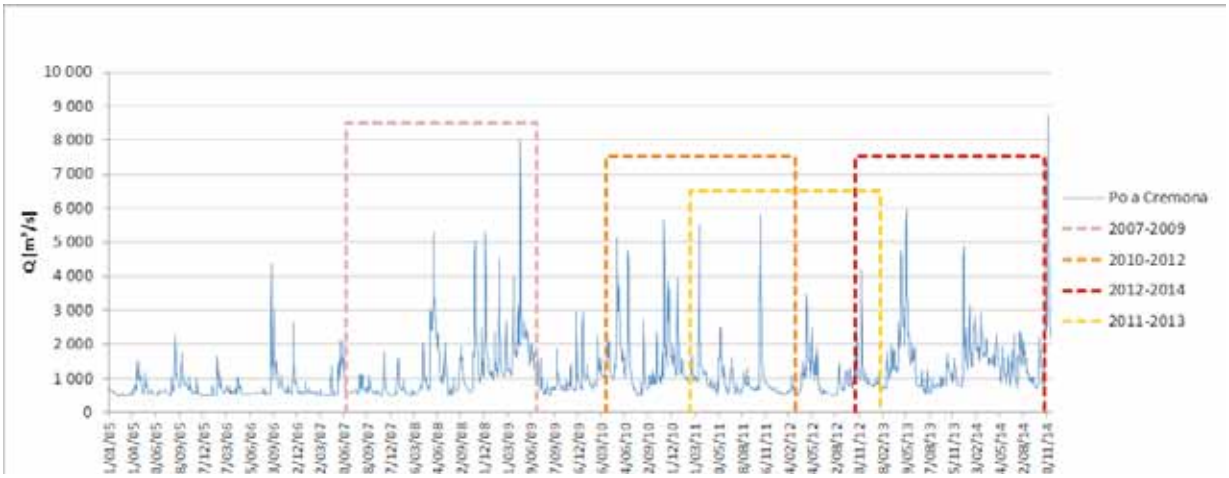


Figura 246 – Individuazione di quattro bienni significativi all'interno del periodo di 10 anni simulato per cui sono state ricavate le curve di bilancio erosione/deposito di cui alle successive figure.

Periodo	Volume solido medio annuo in ingresso (Po a Cremona + affluenti) [Mm³]
2005-2014	4.83
2007-2009	5.94
2010-2012	5.17
2012-2014	6.50
2011-2013	3.23

Tabella 99 – Volume solido medio annuo in ingresso (Po + affluenti) per i diversi periodi considerati

La Figura 247 riporta l'andamento dei volumi medi cumulati riferiti ai bienni identificati in Figura 246 ed al decennio simulato per lo scenario stato attuale.

L'analisi dei periodi biennali da un lato mostra la vivacità dei fenomeni morfologici e la variabilità temporale dell'evoluzione morfologica, dall'altro conferma come, negli scenari di progetto, i fenomeni di deposito ed erosione tendano ad un equilibrio passando da un biennio al successivo, con ciò confermando come necessaria una visione di medio lungo periodo. Tale considerazione risulta ancor più necessaria dal momento che lo stesso modello numerico esige tempi di "avvio" non trascurabili.

La lettura delle curve cumulate erosione/depositi mostra la progressiva migrazione del materiale lungo il fiume: i punti indicati in Figura 247 vogliono indicare in successione spaziale e temporale depositi ed erosioni (A1, A2, A3 per una situazione di deposito, B1, B2, B3 per una situazione di erosione): quanto evidenziato sembra suggerire che i tempi di transito del materiale lungo il tratto esaminato sono ben maggiori rispetto ai 10 anni simulati.

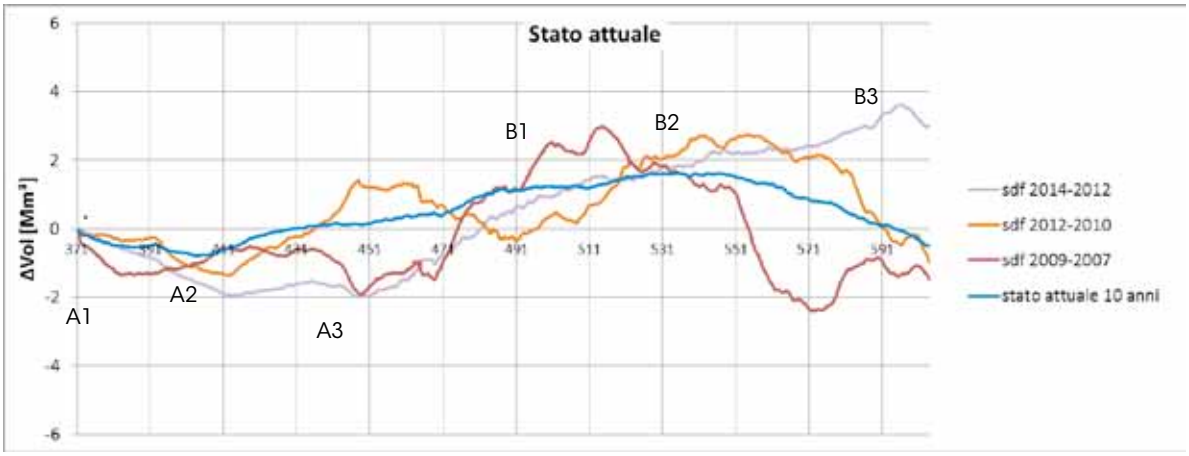


Figura 247 – Curve cumulate erosioni/depositi relative allo scenario stato attuale considerando periodi di 2 anni e l'intero periodo di 10 anni: individuazione di punti in successione spaziale e temporale in deposito (A1, A2, A3) ed erosione (B1, B2, B3).

Confrontando i risultati ottenuti dalla simulazione su medio periodo (10 anni) rispetto ai dati di taratura, si può osservare che i punti sperimentali sono compresi tra le curve assai variabili dei bienni analizzati: il volume medio annuo ha un andamento che rispecchia quello dei dati sperimentali, fatta eccezione per i due tratti, evidenziati con le frecce nere in figura, dove il modello tende ad esagerare i fenomeni erosivi: correggendo la curva ricavata dal modello in questi due punti, si ritrova l'andamento dei dati sperimentali (curva azzurra tratteggiata in Figura 248).

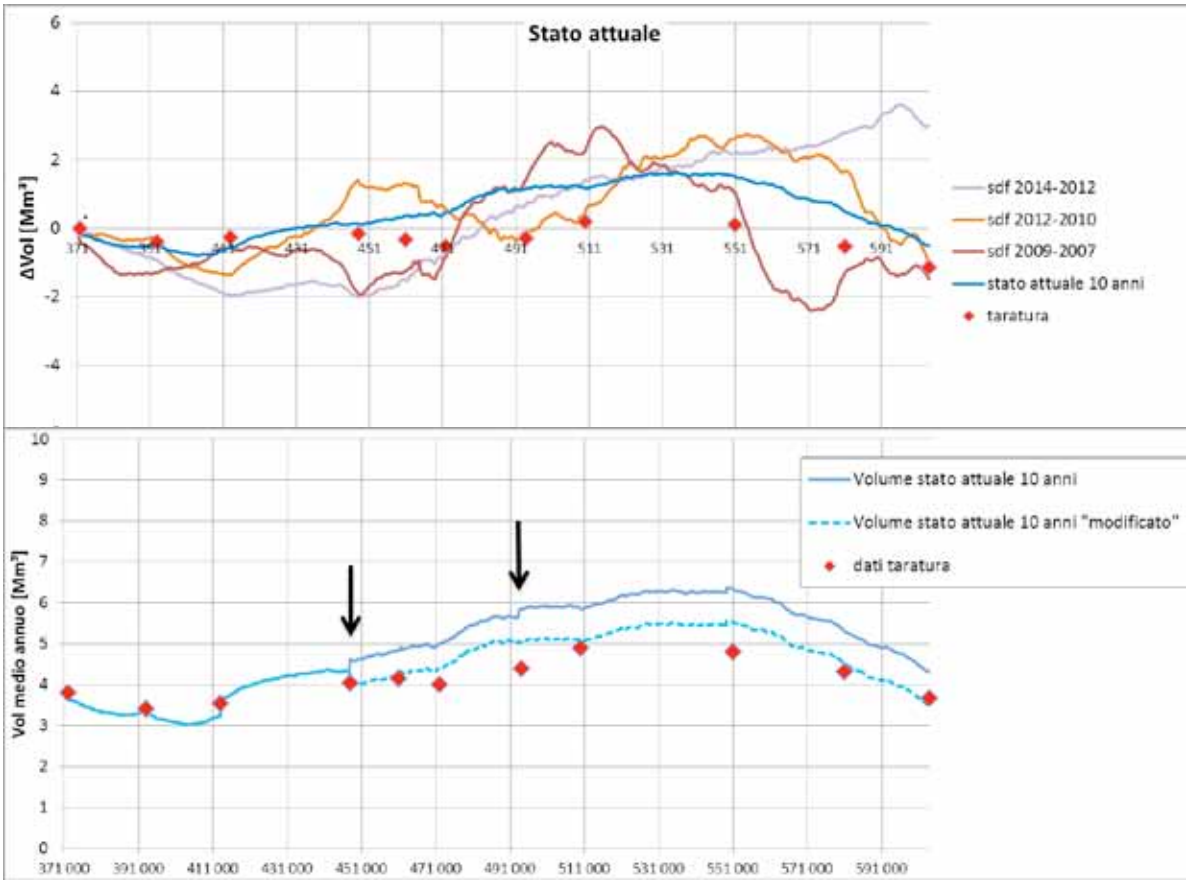


Figura 248 – Confronto con dati taratura: la curva tratteggiata in azzurro è ricavata da quella ottenuta dalle simulazioni numeriche (curva blu continua) e corretta nei due punti indicati dalle frecce nere.

La Figura 249 e la Figura 250 riportano l'andamento dei volumi medi cumulati riferiti ai bienni identificati in Figura 246 ed al decennio simulato per gli scenari di regimazione e sistemazione a corrente libera rispettivamente.

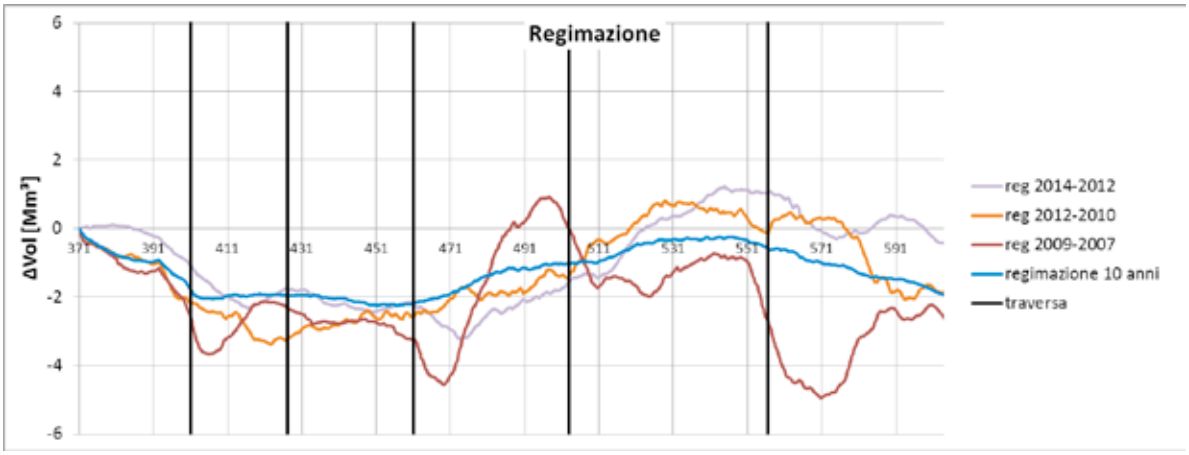


Figura 249 – Curve cumulate erosioni/depositi relative allo scenario di regimazione considerando periodi di 2 anni e l'intero periodo di 10 anni.

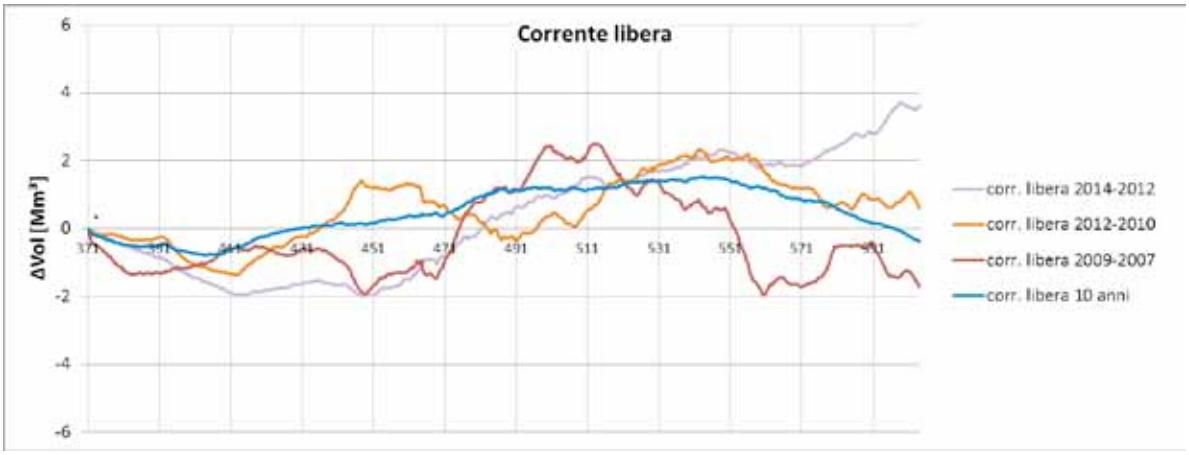


Figura 250 – Curve cumulate erosioni/depositi relative allo scenario di sistemazione a corrente libera considerando periodi di 2 anni e l'intero periodo di 10 anni.

La Figura 251 confronta le curve di portata solida media annua lungo l'intero tratto di studio riferite ai tre scenari nel medio periodo. I successivi grafici, da Figura 252 a Figura 255, confrontano gli scenari stato attuale (sdf), di regimazione (reg) e di sistemazione a corrente libera (corr. libera), per ciascun biennio.

Si ricorda che rispetto alle simulazioni effettuate su periodo di 2 anni per la taratura del modello, la simulazione di medio periodo (10 anni) per lo scenario di corrente libera è stata fatta senza apportare modifiche consistenti alla batimetria iniziale di calcolo, ma lasciando che fossero le sole opere a modificare l'alveo fluviale.

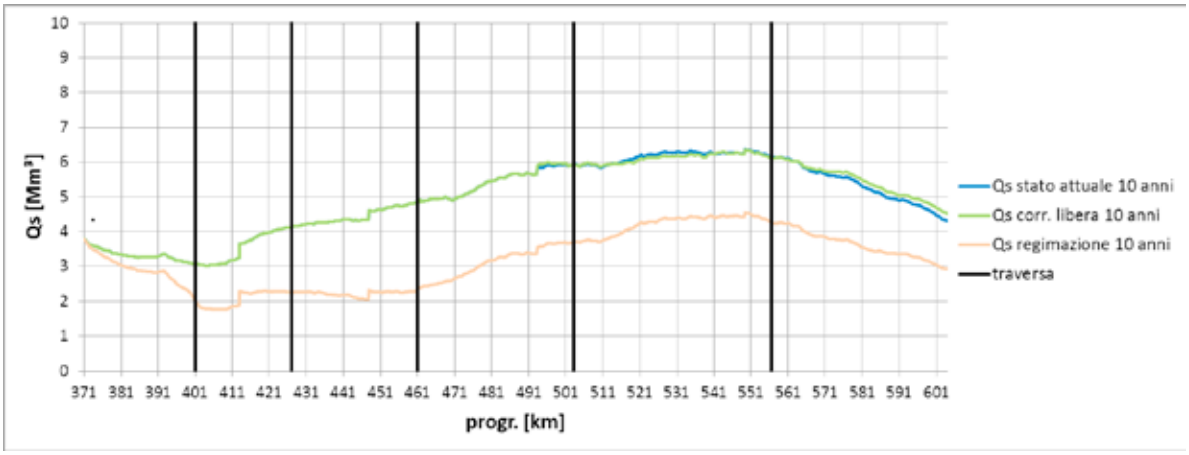


Figura 251 – Curve cumulate erosioni/depositi relative ai tre scenari il periodo di 10 anni.

Come si osserva da Figura 252 a Figura 255, l'andamento delle curve relative agli scenari stato attuale e sistemazione a corrente libera risulta molto simile: nei primi due bienni analizzati si nota una maggior tendenza al deposito nello scenario di sistemazione a corrente libera, dovuto all'effetto di accumulo nelle aree retrostanti i pennelli, soprattutto nel tratto centrale, dove l'alveo si presenta più largo e con maggior possibilità di movimento.

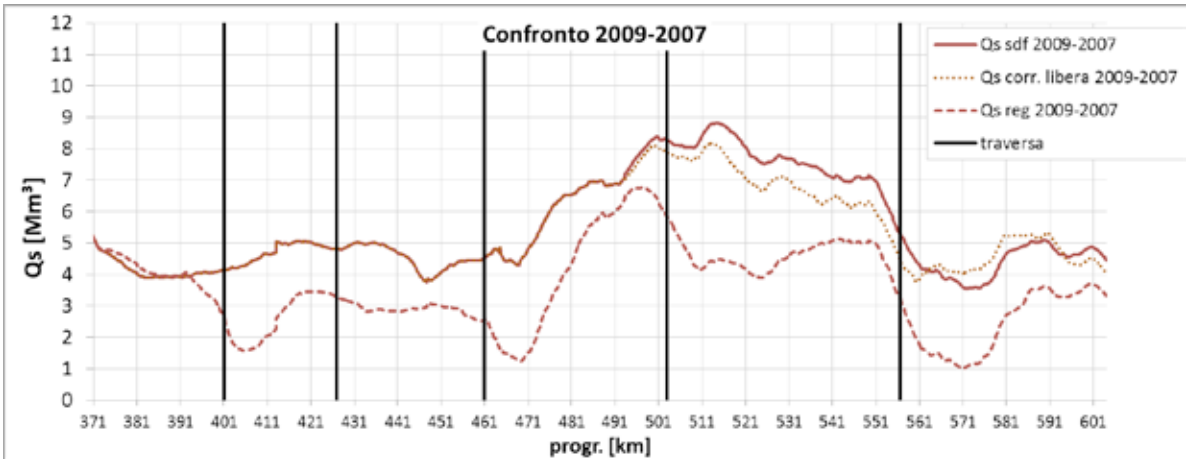


Figura 252 –Portata solida media simulata nei diversi scenari per il biennio 2007-2009.

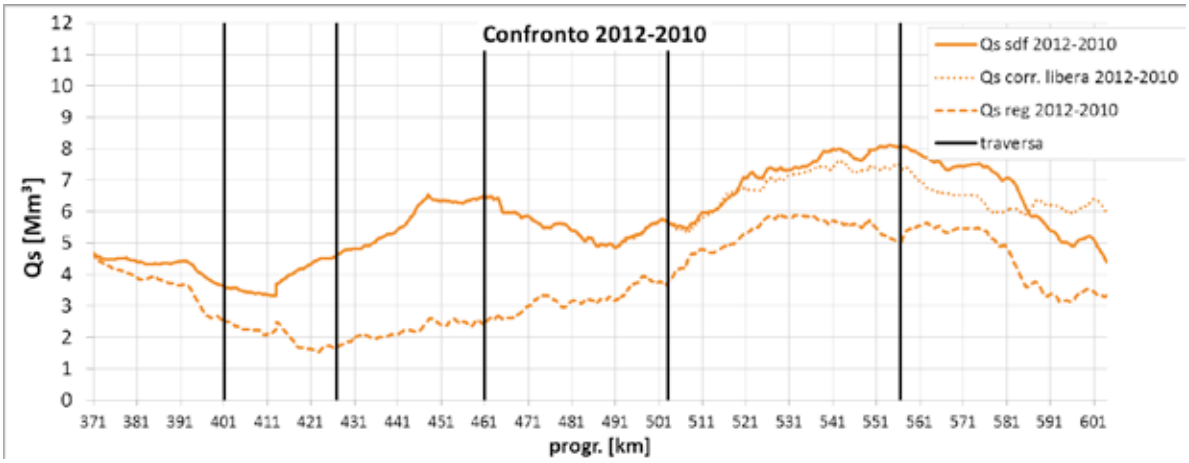


Figura 253 – Portata solida media simulata nei diversi scenari per il biennio 2010-2012.

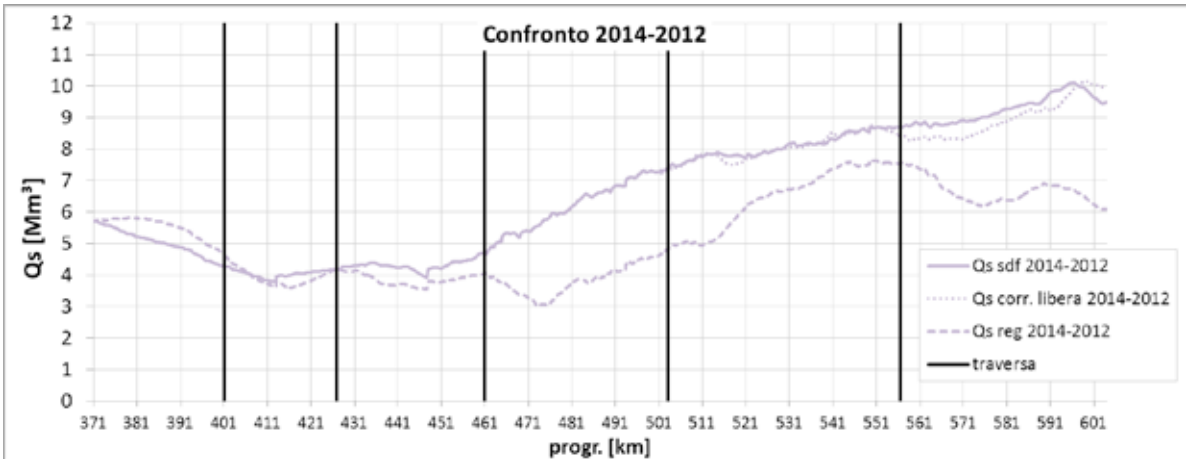


Figura 254 – Portata solida media simulata nei diversi scenari per il biennio 2012-2014.

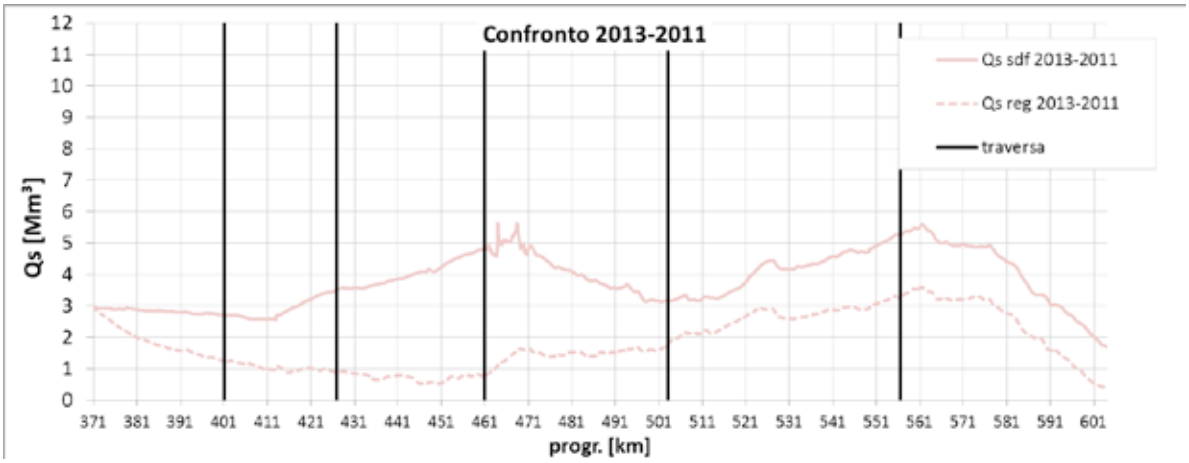


Figura 255 – Portata solida media simulata negli scenari stato attuale e regimazione per il biennio 2011-2013.

Per quanto riguarda lo scenario di regimazione, dai grafici si può osservare che:

- nel corso del tempo l'effetto delle traverse tende a stabilizzarsi ed il fiume tende verso un nuovo equilibrio;
- nel tratto tra km 500 e km 510 si osserva una inversione di tendenza: nel primo biennio considerato il fiume tende a depositare mentre nei periodi successivi la tendenza è opposta verso l'erosione, avvicinandosi al comportamento, in termini di tendenza, dello stato attuale;
- a valle del km 550 si registra un diverso comportamento nel primo biennio (in forte deposito e successivamente erosione) rispetto ai successivi ed al decennio (in deposito più graduale lungo l'intero tratto);
- l'effetto delle traverse è osservabile soprattutto nel primo biennio analizzato, con situazioni di deposito a monte delle stesse ed erosione a valle: le opere invertono quella che è la tendenza dello stato attuale (ad eccezione dell'ultima traversa situata in un tratto in deposito e in una sezione più larga rispetto alle precedenti);
- tale tendenza rimane confermata nel secondo biennio per la prima traversa e in maniera minore per la quarta e la quinta, mentre la seconda e la terza sembrano meno risentire di questo fenomeno;
- nel primo biennio considerato si osserva inoltre una maggior tendenza all'erosione rispetto allo stato attuale tra la prima e la seconda traversa, a significare che il fiume tende a mobilitare il materiale dall'alveo non ricevendone da monte come nello stato attuale;
- lo stesso fenomeno, di maggior erosione nello scenario di regimazione, si verifica nel secondo biennio tra la terza e la quarta traversa, e nell'ultimo biennio (2012-2014) tra la quarta e la quinta traversa;
- nell'ultimo biennio analizzato, fino a progressiva 470 km sembra essere raggiunto un equilibrio nello scenario di regimazione a confronto con lo stato attuale;
- il confronto in un biennio caratterizzato da minori apporti solidi (2011-2013) mostra maggiori depositi nello scenario di regimazione, soprattutto nel tratto iniziale e centrale, caratterizzato da sezioni di deflusso che comprendono le golene;
- le traverse che sembrano indurre nel tempo un maggior deposito rispetto allo stato attuale sono la prima e, in forma minore, la terza.

Nel complesso si può affermare che i fenomeni erosivi/deposizionali si mantengono in termini di tendenza, oltre una prima fase di assestamento di qualche anno, ed in molti tratti tendono ad attenuarsi sul medio periodo di 10 anni, per poi nel lungo termine tendere ad una nuova condizione di equilibrio.

La Tabella 100 sintetizza il volume solido in ingresso (Po a Cremona) e in uscita (incile Po di Goro) simulate. Complessivamente le simulazioni mostrano che nello scenario di regimazione si ha una maggior tendenza al deposito, pari a circa 1.38 Mm³ medi annui. Tale valore, costituisce circa il 32% del volume di trasporto solido al fondo ed il 14% del volume di trasporto solido totale (trasporto di fondo e trasporto in sospensione) stimato in circa 10 milioni di m³.

	Periodo				
	2005-2014	2007-2009	2010-2012	2012-2014	2011-2013
V ingresso [Mm³]	3.81	5.23	5.23	5.72	2.97
V uscita stato attuale[Mm³]	4.31	4.46	4.94	9.49	1.69
V uscita regimazione[Mm³]	2.93	3.32	3.32	6.08	0.38
Differenza V uscita stato attuale - regimazione[Mm³]	1.38	1.14	1.62	3.41	1.31
V uscita corrente libera[Mm³]	4.50	4.02	6.49	10.08	
Differenza V uscita stato attuale - corrente libera[Mm³]	-0.19	0.43	-1.55	-0.59	

Tabella 100 – Volume solido in ingresso (Po a Cremona) e in uscita (incile Po di Goro) simulate nei diversi scenari e per i diversi periodi analizzati.

Alla luce dei risultati ottenuti, nonostante sia evidente che le risposte morfologiche del corso d'acqua a sistemazioni artificiali richiedano periodi ancora più lunghi, si ritiene che il periodo di medio termine di 10 anni considerato sia sufficiente per analizzare e confrontare gli scenari progettuali oggetto di studio.

È anche da ricordare che i suddetti andamenti dei volumi di trasporto solido di fondo rappresentano i volumi annui globali di trasporto nelle successive sezioni fluviali e quindi non sono in grado di mettere in luce i differenti effetti di deposito o erosione che possono avvenire nei comparti interni alle sezioni dell'alveo mobile nei diversi scenari progettuali.

In particolare, nel progetto di regimazione la citata tendenza al deposito indotta dalle traverse si concentra prevalentemente solo all'interno dell'alveo di magra e non sulle altre forme di fondo ad esso esterne, dal momento che il profilo di rigurgito indotto dalle traverse si verifica solo quando le traverse sono chiuse per portate fino a 1200 m³/s e non per le portate superiori quando le traverse sono completamente aperte.

Al contrario nel progetto di sistemazione a corrente libera i pennelli inducono effetti differenziati all'interno dell'alveo mobile, composti da effetti deposizionali nelle aree a tergo dei pennelli ed effetti erosivi nell'alveo canalizzato. Il fatto quindi che non si riscontrano sostanziali differenze nel trasporto solido globale tra il progetto a corrente libera e lo stato attuale indica che i due effetti sostanzialmente si compensano reciprocamente pur essendo entrambi presenti.

Il confronto tra i diversi scenari progettuali deve quindi avvenire anche verificando gli effetti sull'evoluzione morfologica del fondo alveo.

9.7.3 Evoluzione del fondo alveo

L'analisi dei risultati del modello numerico mostra che l'altimetria varia generalmente con andamento ciclico, mentre solo alcune zone tendono in maniera progressiva ad erosione o deposito.

A titolo di esempio, la Figura 256 mostra l'andamento altimetrico di alcune celle nel tempo, in deposito progressivo (nel primo tratto), con variazioni cicliche (nel terzo e nel quarto tratto) in erosione progressiva (nel sesto tratto).

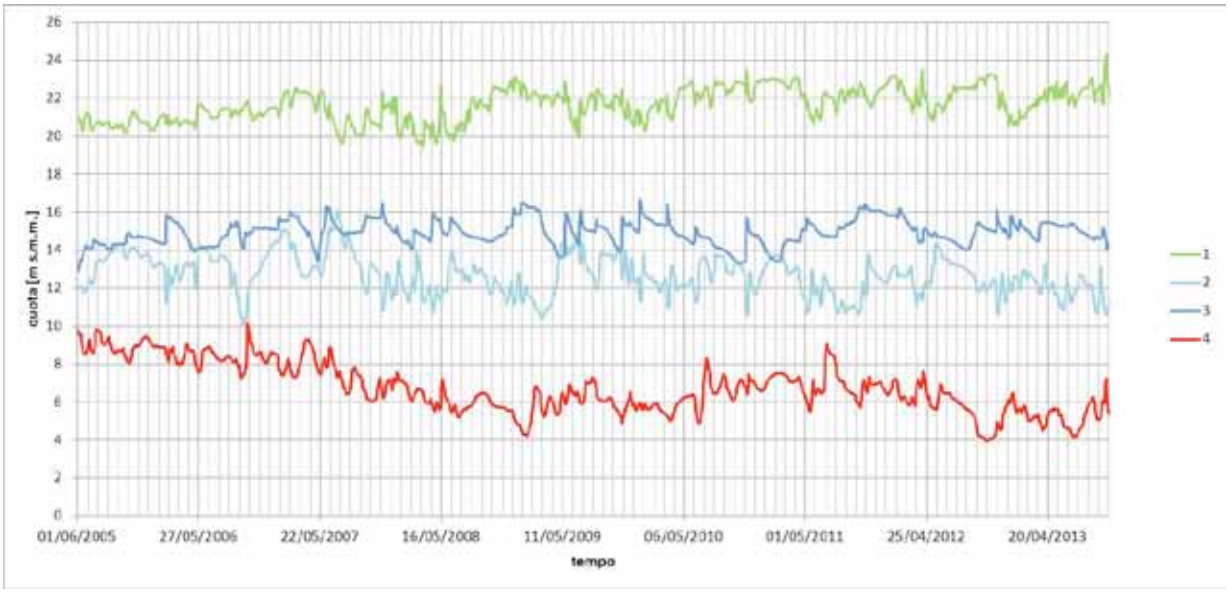


Figura 256 – Andamento nel tempo delle quote in quattro celle della maglia di calcolo: la cella n.1 si trova nel primo tratto a p.k. 380.5, la cella n.2 si trova nel terzo tratto a p.k. 437, la cella n.3 si trova nel quarto tratto a p.k. 457, la quarta cella si trova nel sesto tratto a p.k. 477.5.

Gli Allegati 9.1 e 9.2 mostrano le differenze batimetriche ottenute negli scenari di progetto rispetto allo stato attuale lungo l'intero tratto.

Il presente paragrafo riporta alcuni estratti cartografici della batimetria del corso d'acqua riferita ad un istante al termine del periodo di simulazione per i diversi scenari, a supporto dell'analisi comparativa delle sistemazioni in progetto: nel commentare tali figure si deve tener presente che quanto rappresentato non è uno stato di equilibrio ma una fotografia in un istante dell'evoluzione morfologica.

9.7.3.1 Scenario di regimazione

Con riferimento allo scenario di regimazione, si riportano di seguito alcune figure che mostrano la tendenza morfologica in due tratti iniziali, a monte ed in corrispondenza della prima traversa, a confronto con la tendenza nello stato attuale:

- Figura 257, Figura 258, Figura 259 riguardano il primo tratto simulato in prossimità di Cremona, da km 371 a km 383;
- Figura 260, Figura 261 e Figura 262 riguardano il tratto comprendente la prima traversa, da km 395 a km 406.

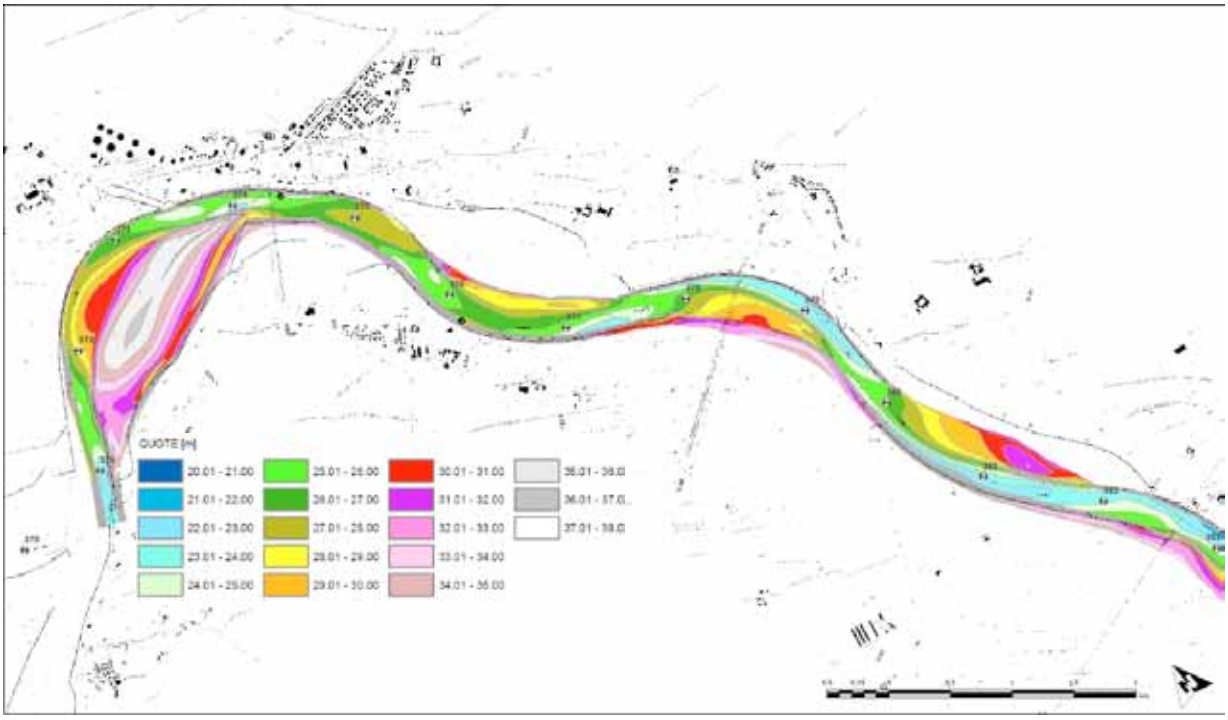


Figura 257 – Scenario stato attuale, simulazione medio periodo: batimetria finale nel tratto da km 371 a km 383.

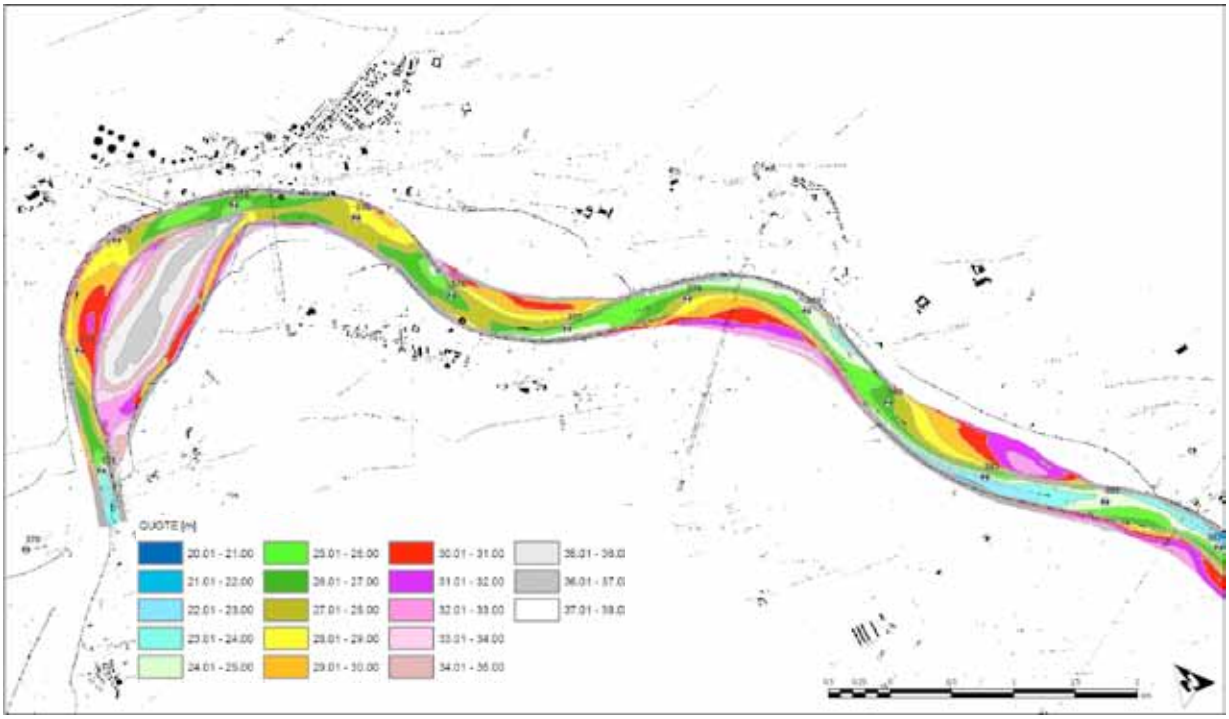


Figura 258 – Scenario regimazione, simulazione medio periodo: batimetria finale nel tratto da km 371 a km 383.

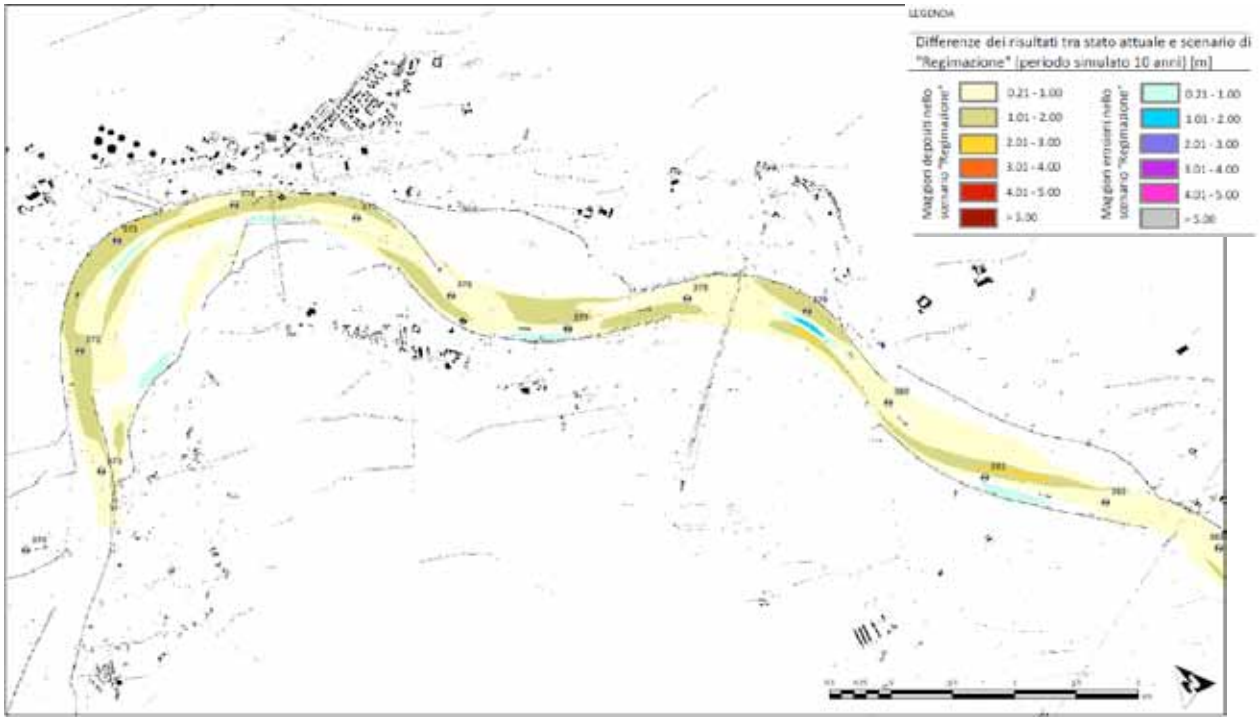


Figura 259 – Confronto tra le batimetrie finali (scenario di regimazione – scenario stato attuale) nel tratto da km 371 a km 383.

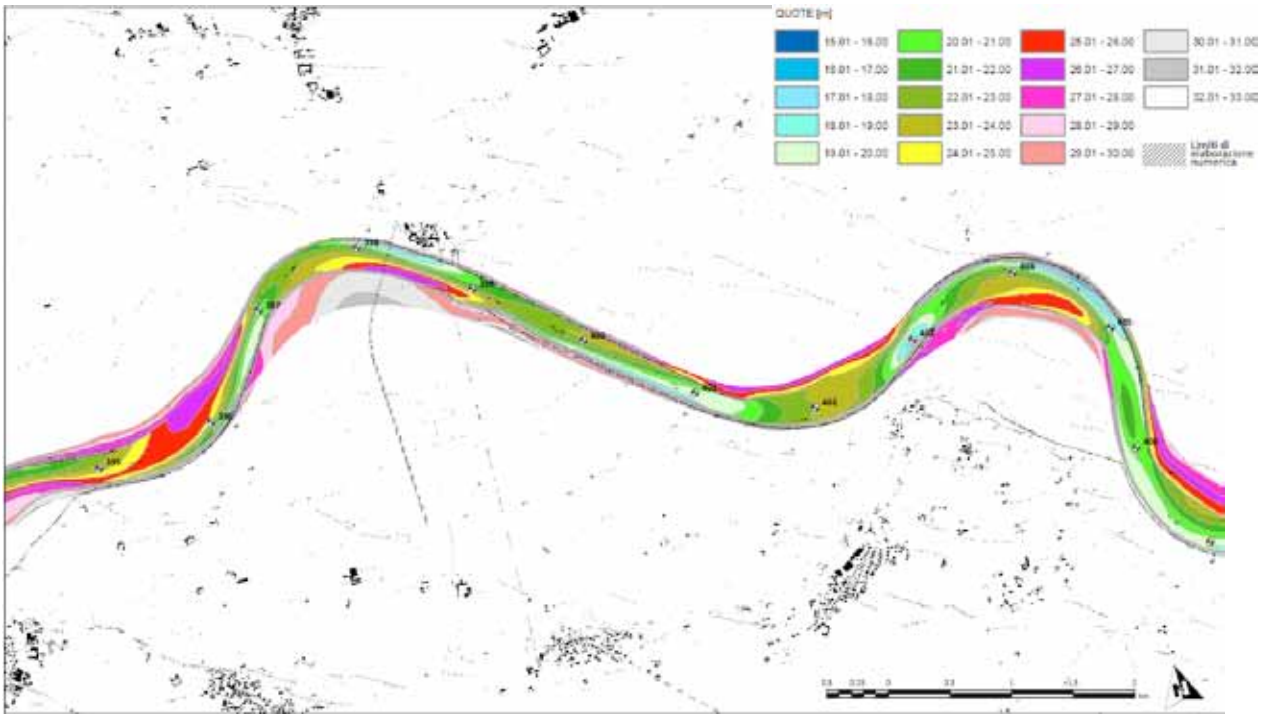


Figura 260 – Scenario stato attuale, simulazione medio periodo: batimetria finale nel tratto da km 395 a km 406.

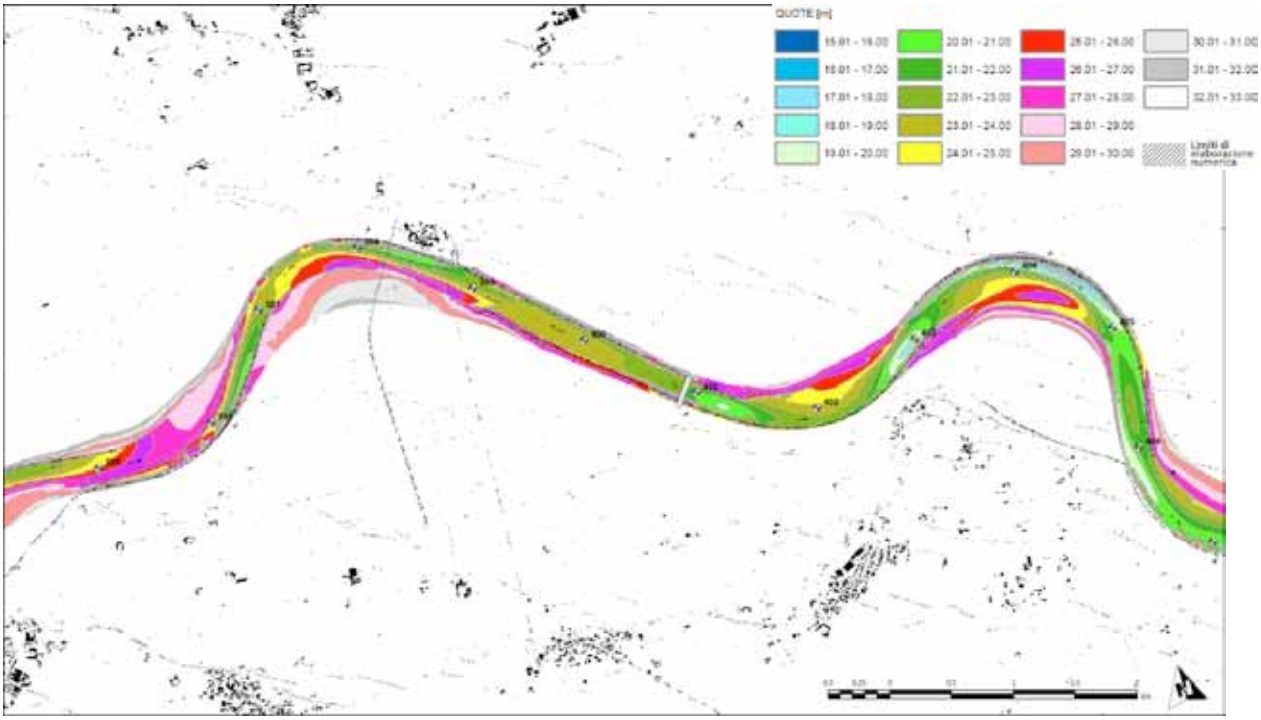


Figura 261 – Scenario regimazione, simulazione medio periodo: batimetria finale nel tratto da km 395 a km 406.

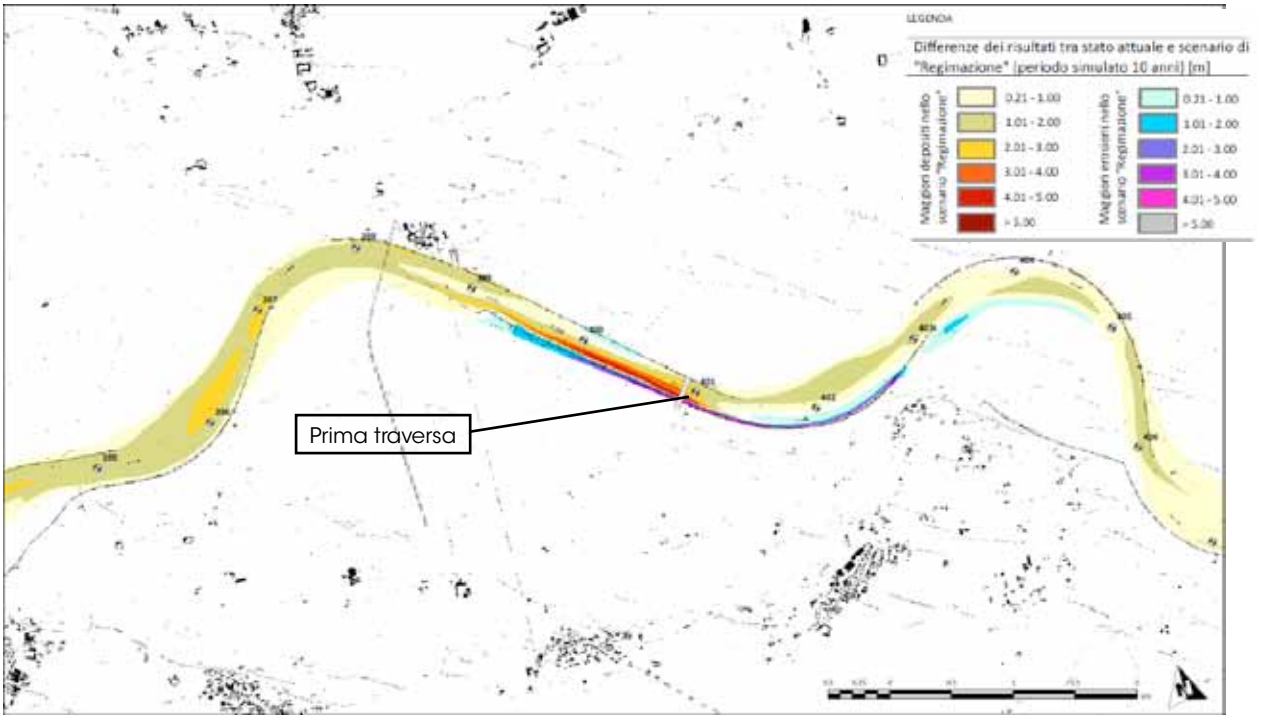


Figura 262 – Confronto tra le batimetrie finali (scenario di regimazione – scenario stato attuale) nel tratto da km 395 a km 406.

Le successive figure riportano il confronto tra le batimetrie finali (scenario di regimazione – scenario stato attuale) nei tratti che comprendono la seconda, la terza e la quarta traversa.

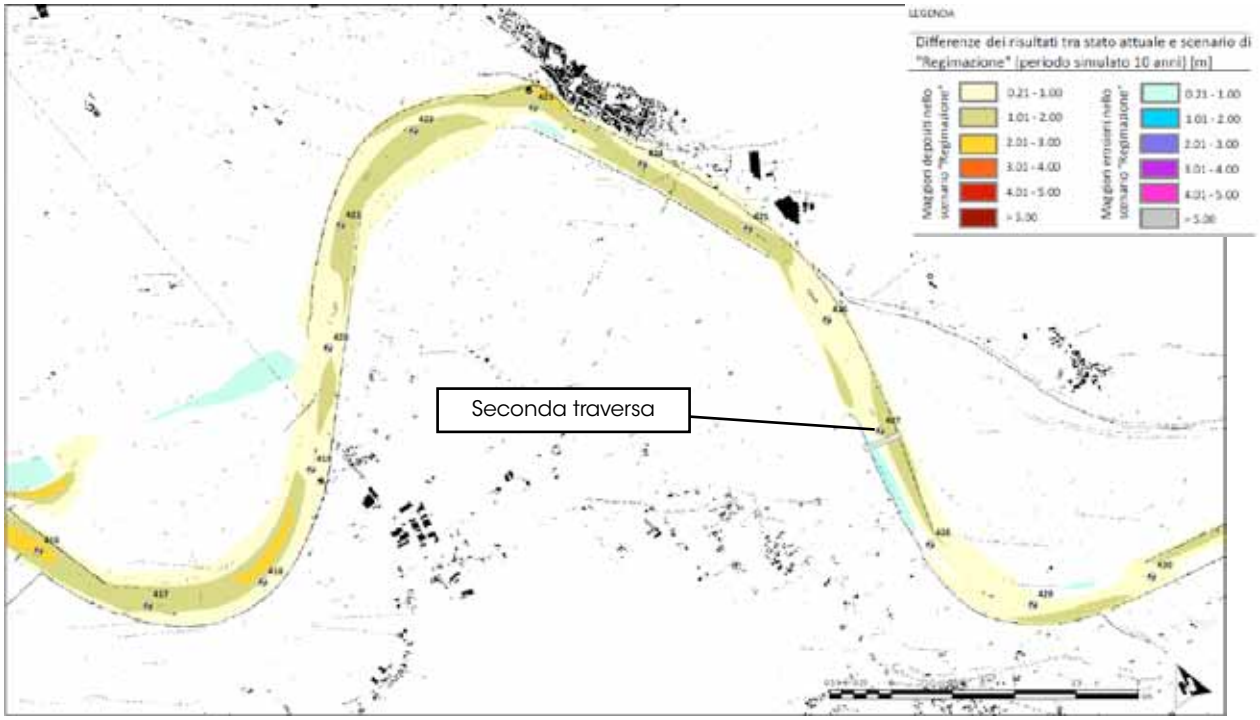


Figura 263 – Confronto tra le batimetrie finali (scenario di regimazione – scenario stato attuale) nel tratto che comprende la seconda traversa.

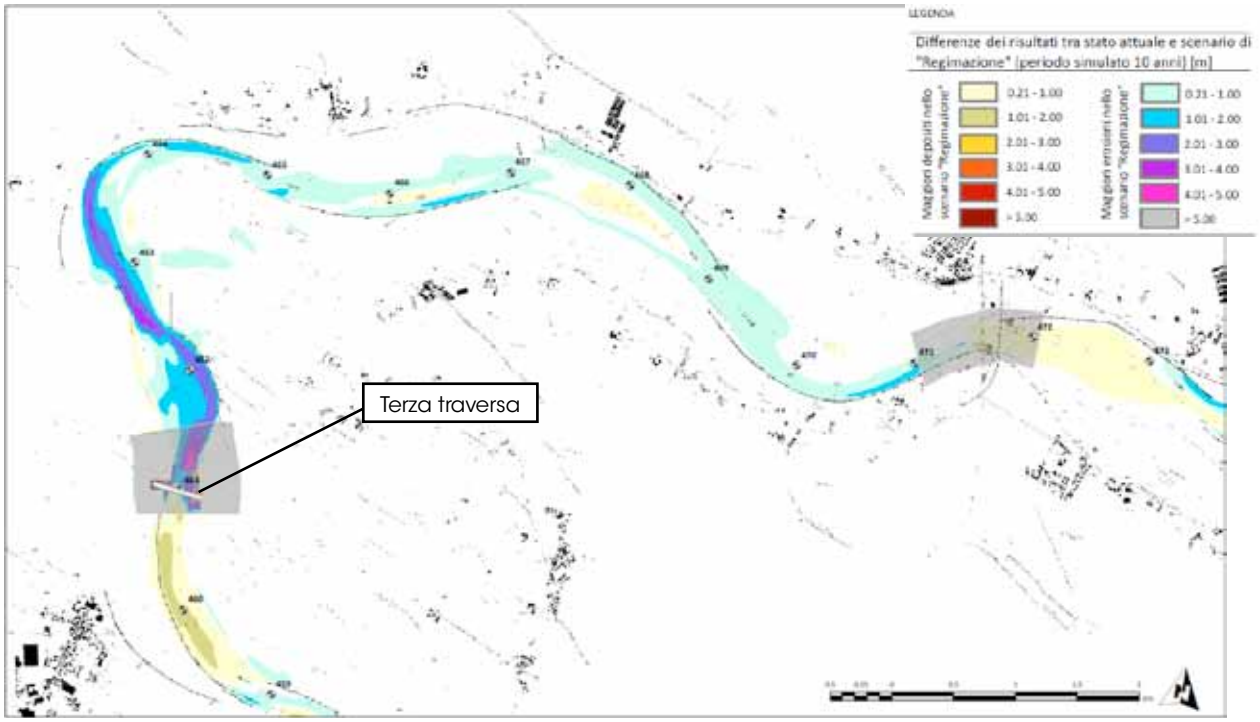


Figura 264 – Confronto tra le batimetrie finali (scenario di regimazione – scenario stato attuale) nel tratto che comprende la terza traversa.

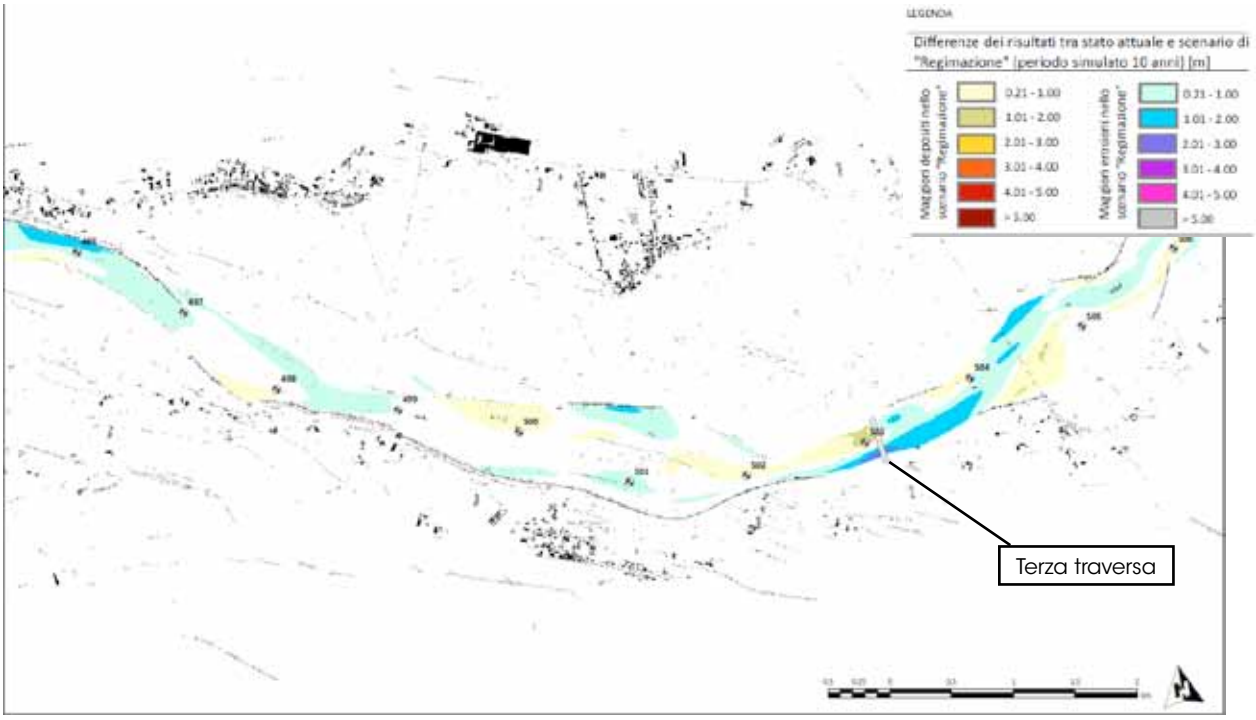


Figura 265 – Confronto tra le batimetrie finali (scenario di regimazione – scenario stato attuale) nel tratto che comprende la quarta traversa.

I risultati ottenuti in termini di evoluzione del fondo alveo confermano quanto osservato dall'analisi delle curve erosioni/depositi:

- la prima e la seconda traversa causano fenomeni deposizionali a monte, piuttosto distribuiti: rispetto alla simulazione dello stato attuale si evidenziano, oltre a zone neutre, zone con depositi generalmente dell'ordine di 1 o 2 m, con punte localizzate di 3 – 4 m; a valle delle traverse, oltre a zone in cui si riscontrano depositi dell'ordine di 1 – 2 m, si osservano in alcune zone localizzate in prossimità delle curve maggiore erosioni dell'ordine di 1 m;
- la terza traversa genera fenomeni deposizionali localmente a monte della stessa, dove la sezione d'alveo risulta più larga, e fenomeni erosivi a valle piuttosto distribuiti anche di 2-3 metri fino a foce Oglio;
- la quarta traversa genera effetti paragonabili alla terza, con depositi immediatamente a monte dell'ordine di 1-2 metri ed erosioni a valle locali, di 1-2 metri;
- la quinta traversa produce depositi a monte dell'ordine del metro, distribuiti, ed erosioni sempre distribuite a valle dell'ordine che raggiungono i 3 metri.

È comunque osservabile una sensibile influenza delle condizioni al contorno di ognuno dei dieci tratti di dominio di calcolo in cui è stato suddiviso l'intera asta del Po modellata. Ciò implica che i risultati devono in ogni caso essere considerati con molta cautela nei primi chilometri a valle di ogni condizione al contorno; di fatto questi tratti assumono una funzione di ri-avviamento delle dinamica sedimentologica la cui veridicità diventa accettabile più a valle.

Si ricorda inoltre che la lettura di queste mappe è riferita ad un particolare istante di calcolo, e che le stesse batimetrie risultano continuamente modificate. A titolo di esempio la seguente figura rappresenta la batimetria di calcolo ad intervallo di circa 2 anni nel tratto tra p.k. 496 e p.k. 508 nello scenario di regimazione.

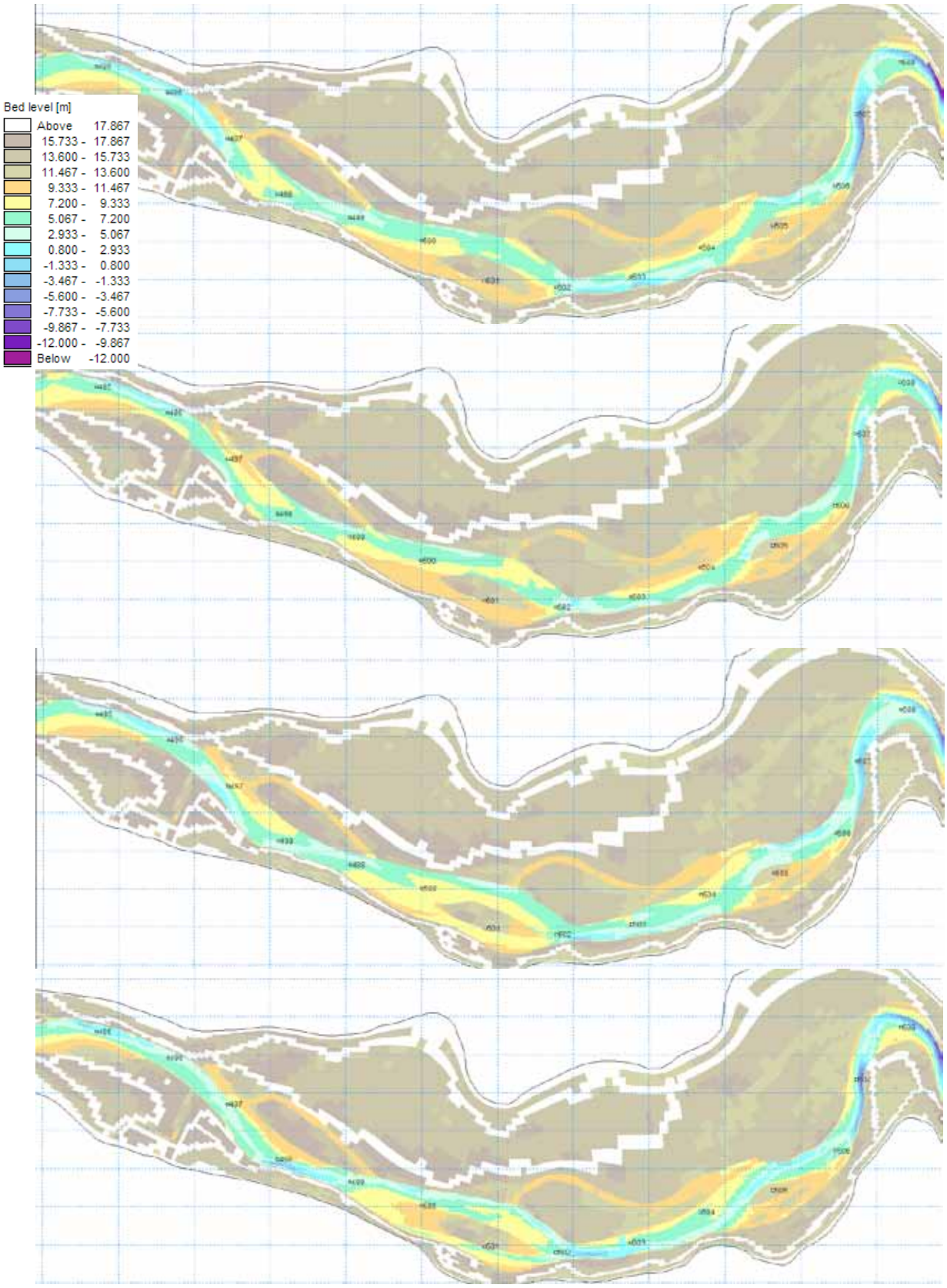


Figura 266 – Batimetria di calcolo a distanza di circa 2 anni nel tratto tra p.k. 496 e p.k. 508 nello scenario di regimazione.

Le batimetrie di calcolo finali ottenute dalla simulazione di periodo 10 anni sono state utilizzate come geometria di calcolo per verificare i tiranti idrici che si instaurano per portate di magra. Per l'analisi delle condizioni di navigabilità, si rimanda al capitolo successivo.

9.7.3.2 Scenario di sistemazione a corrente libera

Lo scenario progettuale di sistemazione a corrente libera è stato inizialmente simulato con una prima configurazione delle opere su un periodo di modellazione di due anni, allo scopo di verificare preliminarmente l'efficacia o l'eventuale necessità di correzioni della disposizione planimetrica e altimetrica dei pennelli e della altre opere di navigazione. Successivamente, la configurazione delle opere emersa dai suddetti riscontri preliminari è stata definitivamente simulata con la modellazione proiettata sull'intero periodo decennale 2005-2014.

Riscontri preliminari con modellazione a due anni

Come anticipato al paragrafo 9.7.1, la batimetria di calcolo iniziale dello scenario di sistemazione a corrente libera, da foce Mincio all'incile di Po di Goro, differisce in alcuni tratti rispetto a quella dello stato attuale, essendo stata modificata in maniera estesa, abbassando il fondo a quote compatibili con le opere in progetto. La Figura 267 riporta un esempio in un tratto dove si è modificato il DTM del 2005 per creare la batimetria di calcolo iniziale relativamente allo scenario di sistemazione a corrente libera: l'interpretazione dei risultati, con riferimento ai confronti relativi, ha quindi tenuto conto di questa modifica.

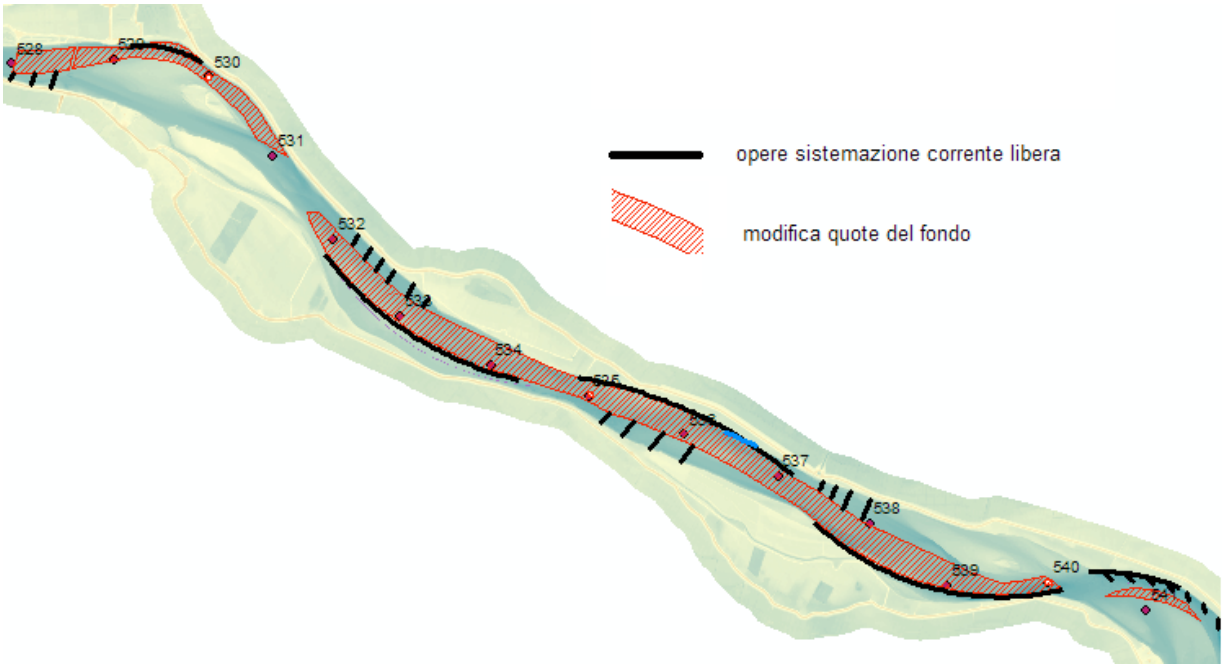


Figura 267 – Estratto delle aree in cui si è modificato il DTM del 2005 per creare la batimetria di calcolo iniziale relativamente allo scenario di sistemazione a corrente libera.

La Figura 268 mostra il confronto tra le batimetrie (simulazione su periodo di 2 anni) calcolate nello scenario "stato attuale" e nello scenario di "sistemazione a corrente libera" in tre zone comprese nel tratto da Cremona a foce Mincio (al km 384, al km 420 ed al km 456), dove sono stati progettati gli interventi da AIPo nel 2012 ("Progetto definitivo degli interventi relativi alla sistemazione a corrente libera del fiume Po nella tratta compresa tra Isola Serafini e foce Mincio per consentire il transito di una unità di navigazione della Va classe CEMT") e dove il fiume è già stato oggetto di sistemazione nel passato: i risultati del modello evidenziano modifiche locali indotte dalla presenza dei pennelli, che vanno a risolvere i bassi identificati dai rilievi batimetrici.

La Figura 269 mostra invece il confronto tra le batimetrie finali (simulazione su periodo di 2 anni) calcolate nello scenario "stato attuale" e nello scenario di "sistemazione a corrente libera" in due zone a valle di foce Mincio (Castelmassa e Ficarolo), dove sono presenti gli interventi di sistemazione previsti nell'ambito del presente studio. Questi interventi, congiuntamente alle modifiche batimetriche iniziali di impostazione del calcolo, apportano variazioni sostanziali e più estese al letto del fiume, creando in modo marcato il canale navigabile.

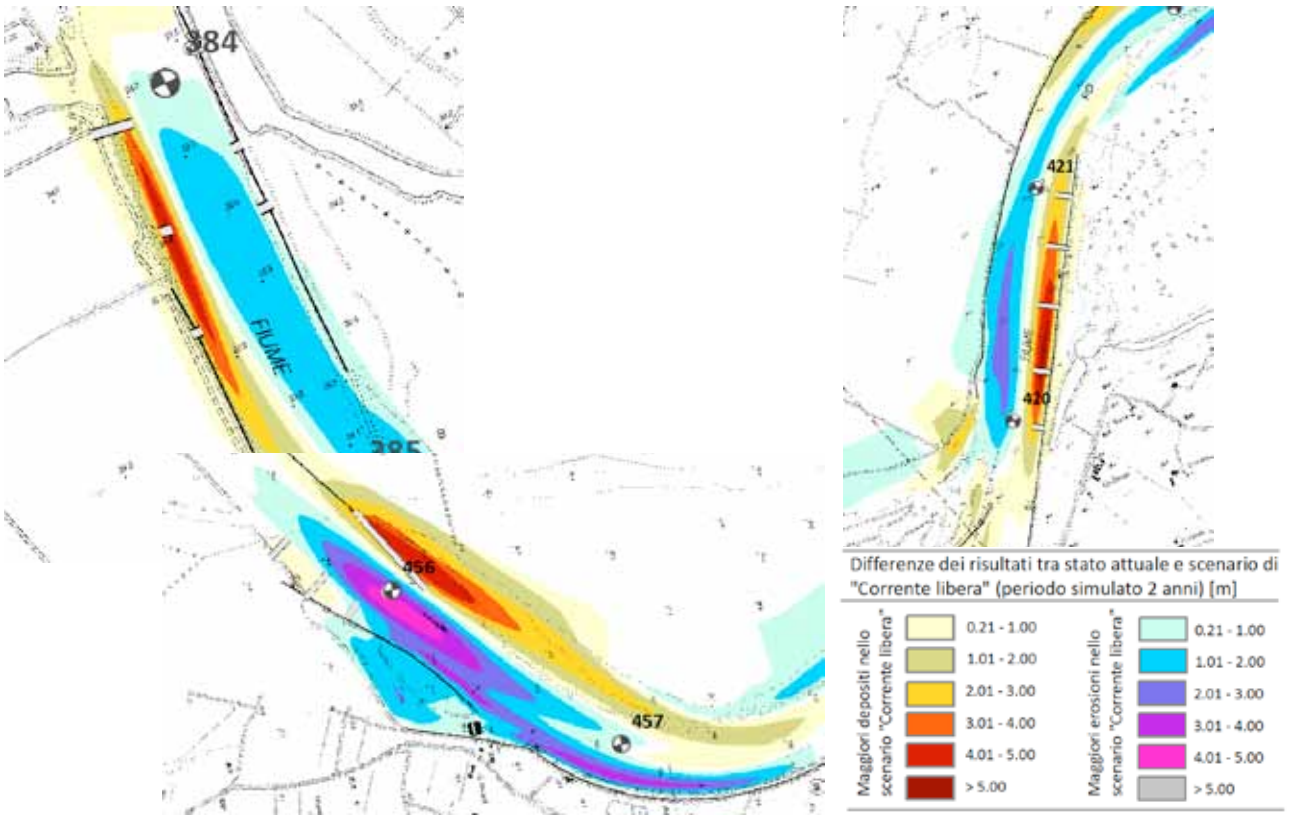


Figura 268 – Confronto tra le batimetrie finali (scenario di sistemazione a corrente libera – scenario stato attuale) in tre diversi tratti da Cremona a foce Mincio dove sono previste le sistemazioni dell'esistente progetto definitivo di AIPo.

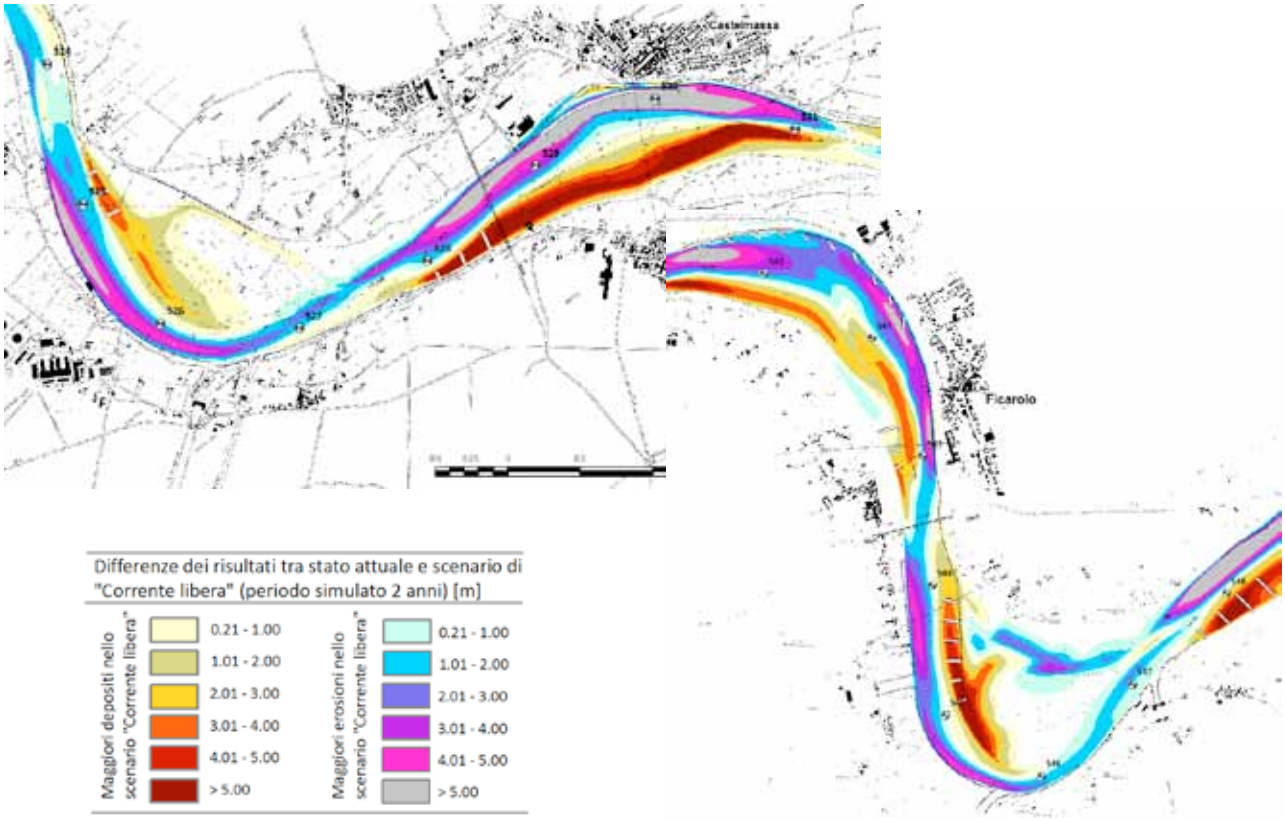


Figura 269 – Confronto tra le batimetrie finali (scenario di sistemazione a corrente libera – scenario stato attuale) nei tratti in prossimità di Castelmassa e di Ficarolo, con inserimento delle nuove opere di sistemazione a corrente libera (a valle di foce Mincio).

Come già anticipato, i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate su periodo di 2 anni (periodo di taratura) hanno dato indicazioni per apportare correzioni alla prima configurazione delle opere individuata e risolvere alcune situazioni locali più complesse: la Figura 270 mostra un esempio di queste correzioni in termini di modifica (allungate, modificata la curvatura, ecc.), eliminazione o aggiunta.

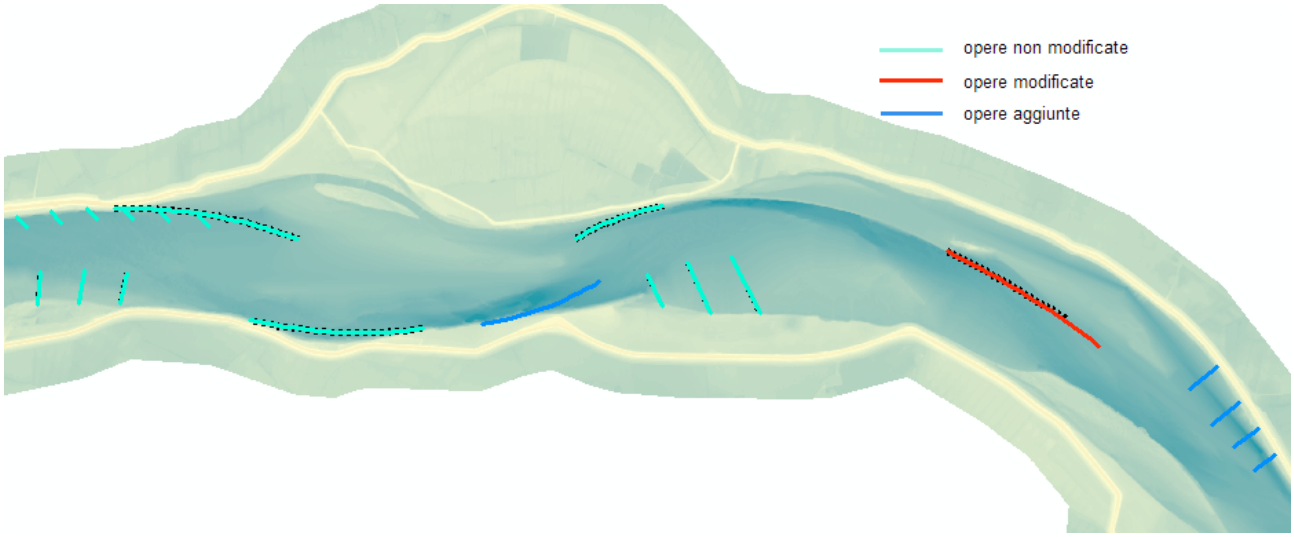


Figura 270 – Esempio di modifica introdotta nel disegno delle opere di sistemazione a corrente libera a seguito dei risultati della modellazione, effettuata su periodo di 2 anni.

Modellazione a dieci anni

Visti i risultati ottenuti dalle simulazioni su periodo di 2 anni, al fine di distinguere le cause dell'incisione in alveo e di verificare l'effetto delle sole opere sul medio periodo simulato, si è scelto di utilizzare quale batimetria iniziale di calcolo per le simulazioni di 10 anni la batimetria del DTM 2005, corretta solo puntualmente in situazioni specifiche dove le opere previste richiedono una modifica delle sponde, come ad esempio nei tratti dove viene ridefinita una curva.

I risultati ottenuti sul medio periodo mostrano una buona risposta in termini di modificazioni morfologiche e di formazione del canale navigabile da foce Mincio a Po di Goro indotte dalla sola presenza delle opere progettate.

La Figura 271 riporta a titolo di esempio il confronto tra le batimetrie finali ricavate dalle simulazioni su periodo di 10 anni (scenario di sistemazione a corrente libera – scenario stato attuale) nel tratto compreso tra p.k. 494 e p.k. 509, in prossimità di Ostiglia. Appare molto deciso sia il deposito nelle aree retrostanti i pennelli (depositi dell'ordine di 2-3 m, con punte di circa 5 m), sia l'abbassamento del fondo alveo (erosioni dell'ordine di 2-4 m, con punte anche maggiori di 5 m).

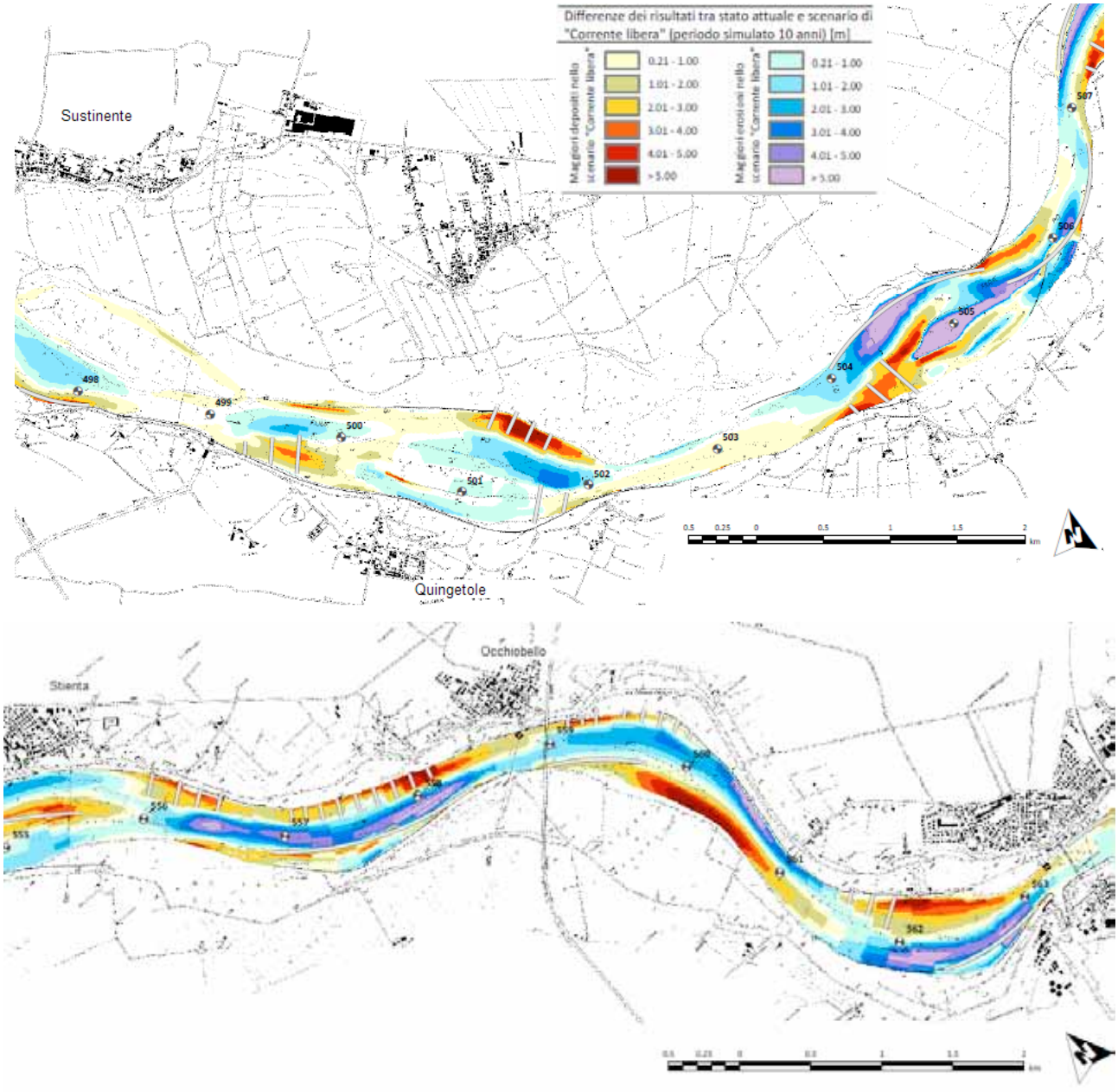


Figura 271 – Confronto tra le batimetrie finali ricavate dalle simulazioni su periodo di 10 anni (scenario di sistemazione a corrente libera – scenario stato attuale): in alto nel tratto compreso tra p.k. 494 e p.k. 509 (Ostiglia), in basso nel tratto tra p.k. 556 e p.k. 563 (tra Stienta e S. Maria Maddalena).

Come per lo scenario di regimazione, la batimetria di calcolo ottenuta dalle simulazioni di 10 anni è stata utilizzata per effettuare le verifiche sul raggiungimento dei tiranti necessari alla navigazione in corrispondenza delle portate di magra. Tali analisi e i conseguenti risultati sono riportati nel capitolo successivo.

I risultati mostrano che le opere di sistemazione a corrente libera, previste nel tratto compreso tra foce Mincio e l'incile del Po di Goro, solo in alcuni tratti limitati, ed in particolare alle p.k. 554, 561 e 587, non permettono di raggiungere le condizioni di navigabilità prefissate. Al fine di verificare se tali insufficienze siano stabili o temporanee è stata fatta un'analisi temporale delle sezioni trasversali. I dati sono stati ricavati con passo annuale rispetto alla serie storica dei 10 anni simulata (linee verticali di Figura 272) in corrispondenza delle sezioni indicate in Figura 273.

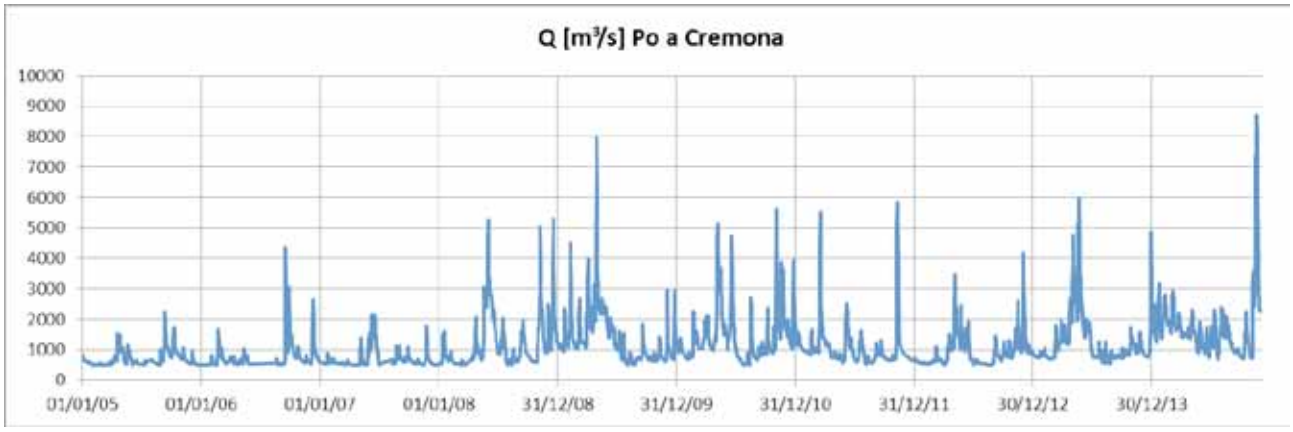


Figura 272 – Serie storica delle portate del fiume Po a Cremona. Sono indicati in colore diverso gli istanti di lettura riportati nelle curve delle figure seguenti.

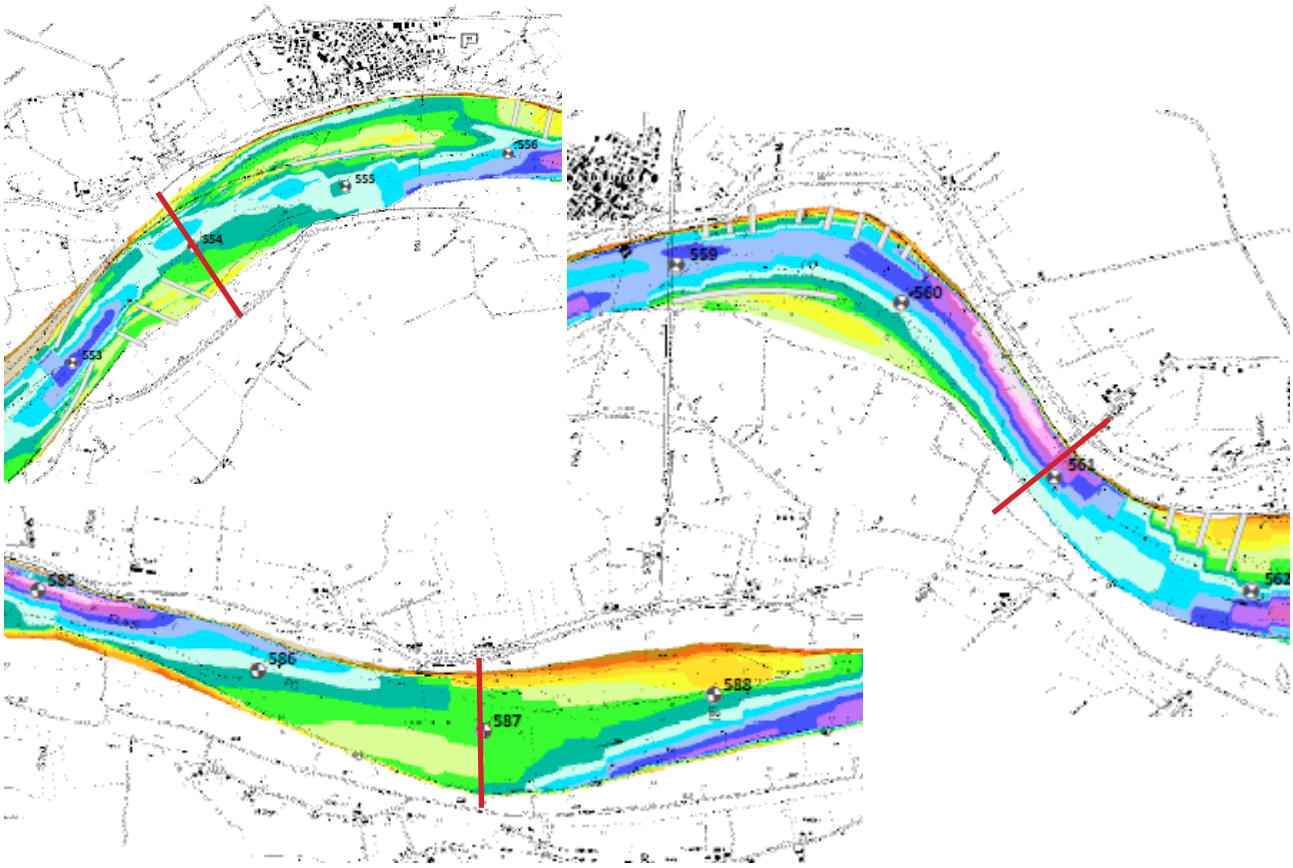


Figura 273 – In rosso le sezioni sottoposte a verifica temporale.

Sezione p.k. 554. L'effetto delle opere è quello di centralizzare il talweg, che varia con escursioni di circa 2 metri, fatta eccezione per l'evento di piena di novembre 2014 che comporta un notevole apporto di sedimento che alla fine della serie simulata risulta accumulato in questo tratto.

Da Figura 274 e Figura 275 si deduce che la batimetria di calcolo utilizzata per la verifica dei tiranti (sezione con linea rossa riferita alla data del 09/11/2014) si riferisce ad un istante caratterizzato dalle quote maggiori rispetto alla media del periodo (quote che si presentano anche a gennaio 2011, gennaio 2012).

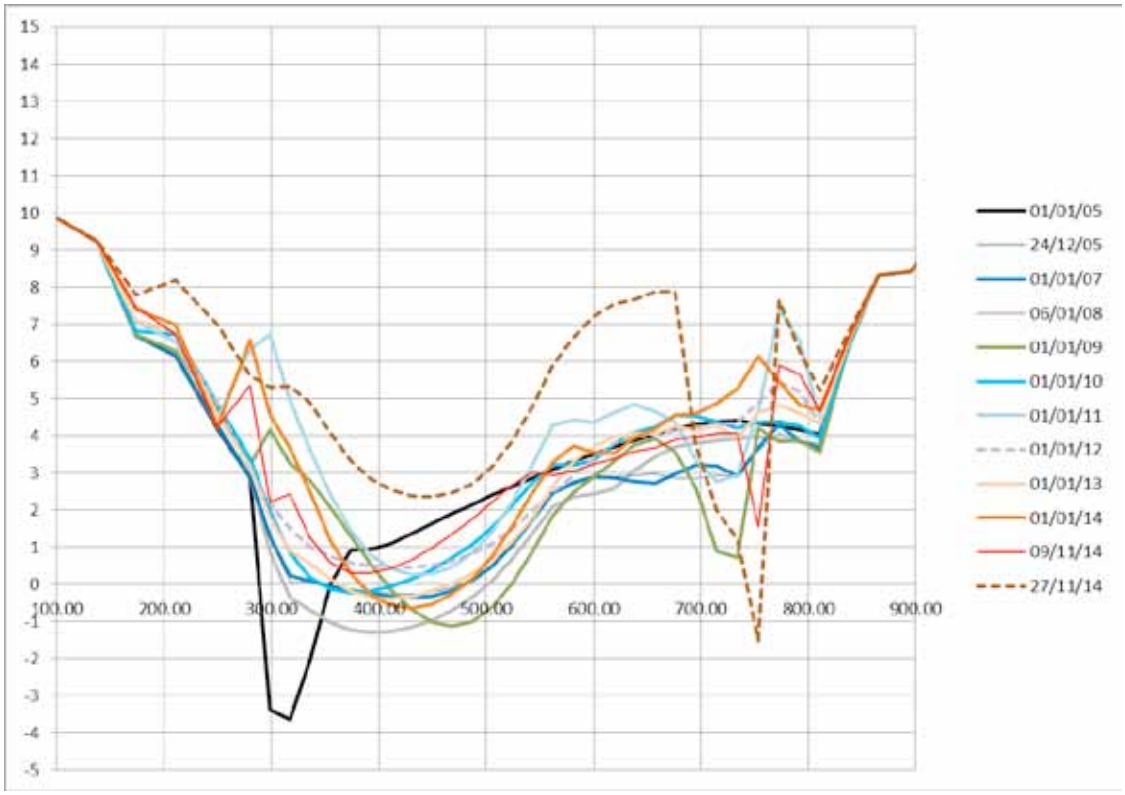


Figura 274 – Scenario corrente libera: sezione al km 554 in diversi momenti temporali.

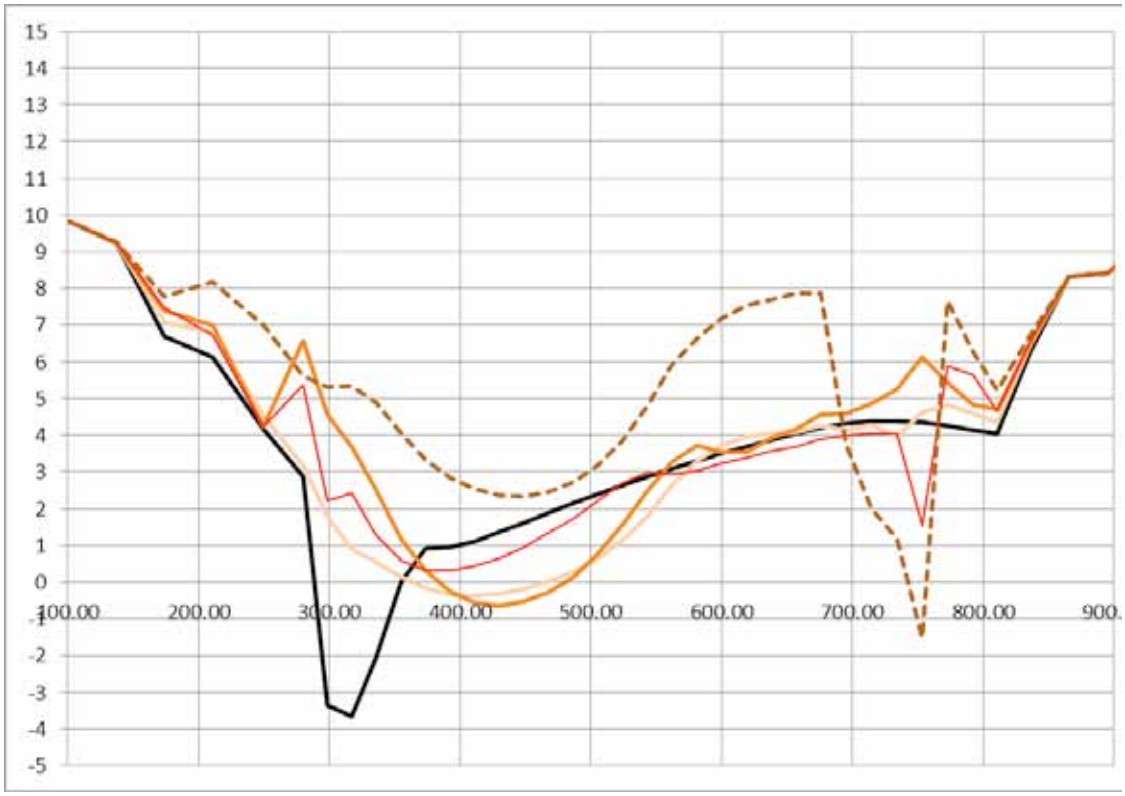


Figura 275 – Scenario corrente libera: sezione al km 554 in diversi istanti negli ultimi due anni di simulazione.

Sezione p.k. 561. In questo tratto si verifica una progressiva modifica della sezione, che tende a spostarsi in sinistra per effetto dei pennelli. Dai risultati, sembra che questo tratto risponda rapidamente all'impulso delle piene, anche perché la sezione è abbastanza stretta: il fondo risulta più profondo

negli istanti ricavati dopo eventi di morbida/piena (gennaio 2009, gennaio 2011, gennaio 2014, novembre 2014). Come si osserva in Figura 276 e in Figura 277, la batimetria di calcolo utilizzata per la verifica dei tiranti si riferisce ad un istante caratterizzato da quote medie rispetto al periodo (sezione con linea rossa riferita alla data del 09/11/2014).

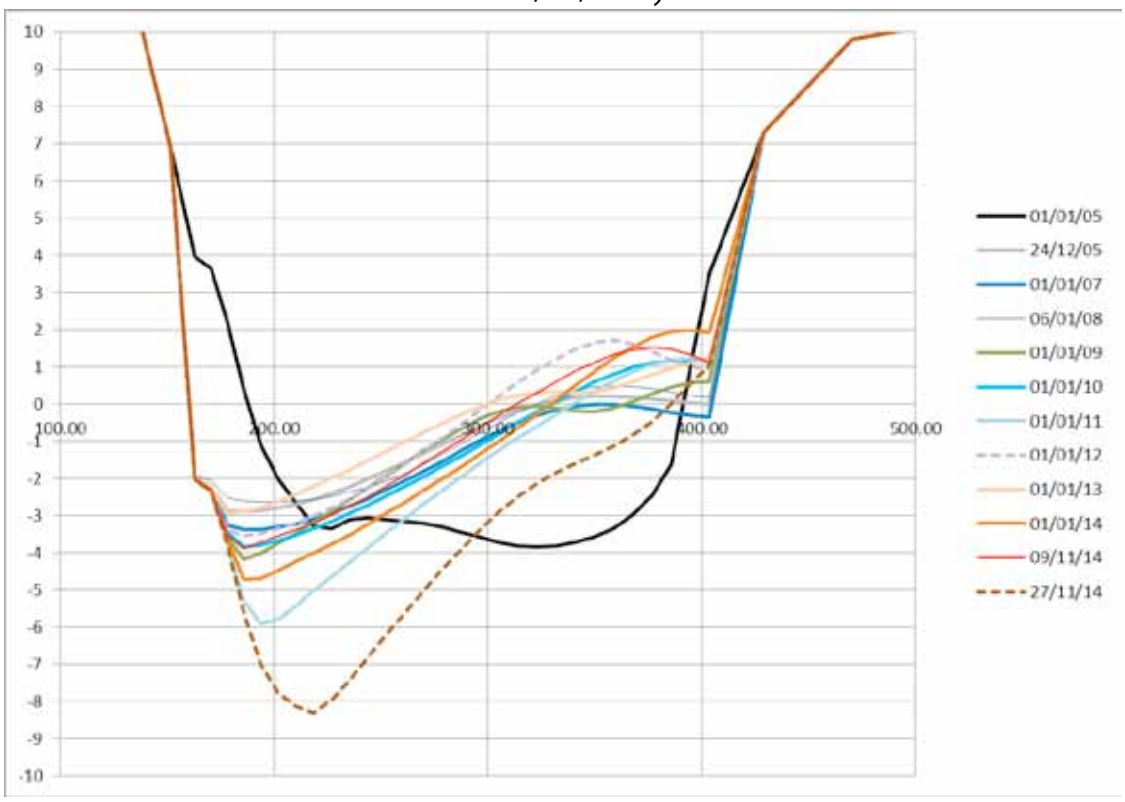


Figura 276 – Scenario corrente libera: sezione al km 561 in diversi momenti temporali.

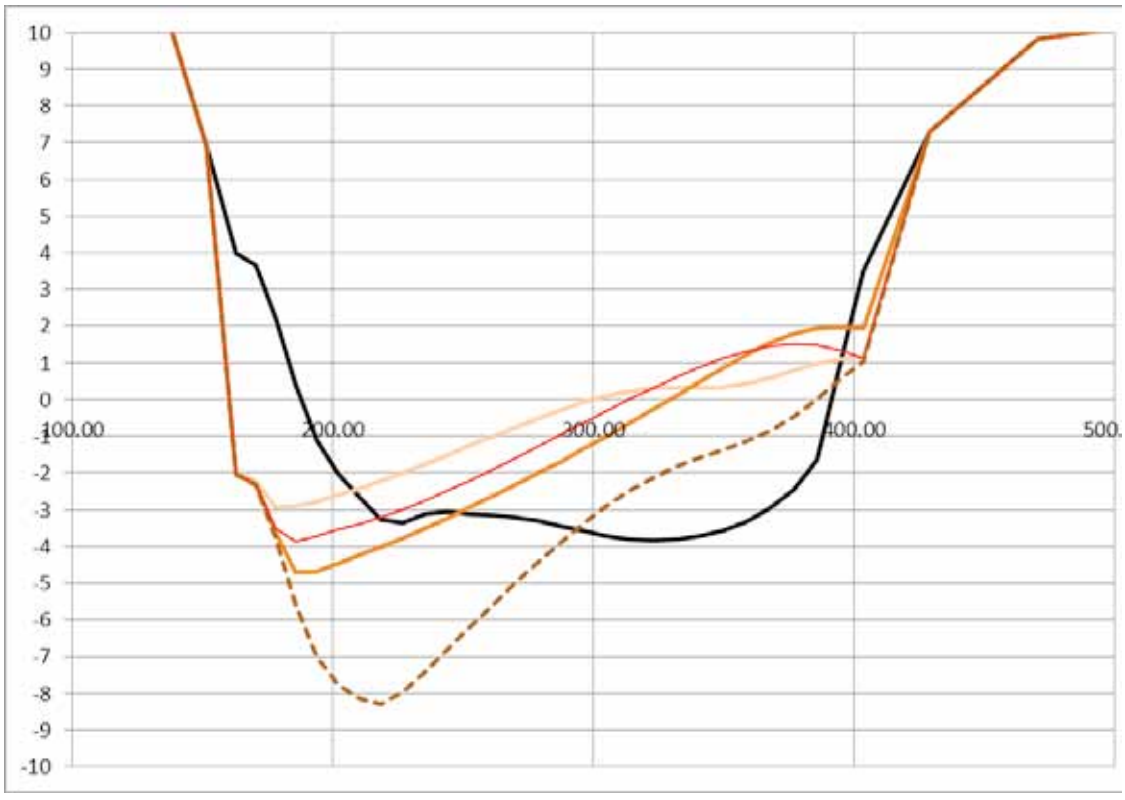


Figura 277 – Scenario corrente libera: sezione al km 561 in diversi istanti negli ultimi due anni di simulazione.

Sezione p.k. 587. In questo tratto non sono previste opere di sistemazione. La sezione risulta più larga rispetto ai tratti precedente e successivo ed il modello tende a depositare. La griglia di calcolo utilizzata per la verifica dei tiranti si riferisce ad un istante caratterizzato da quote simili alla media della seconda metà del periodo di 10 anni simulato.

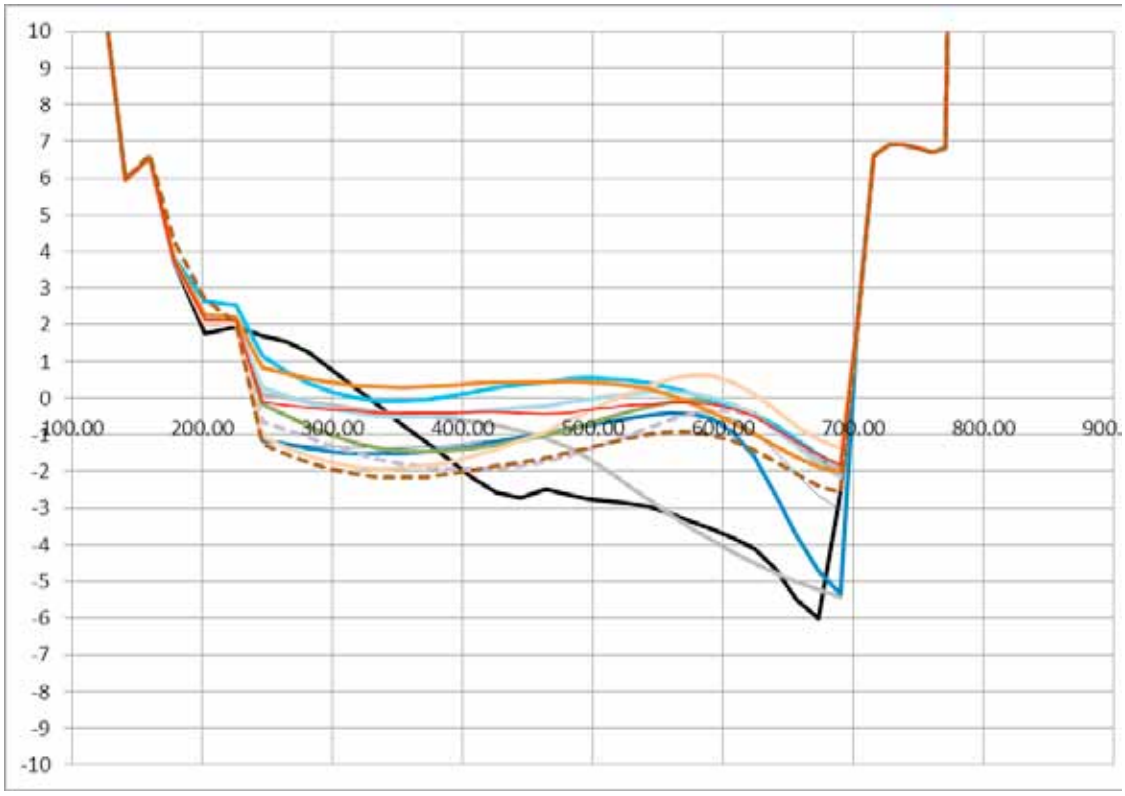


Figura 278 – Scenario corrente libera: sezione al km 587 in diversi momenti temporali.

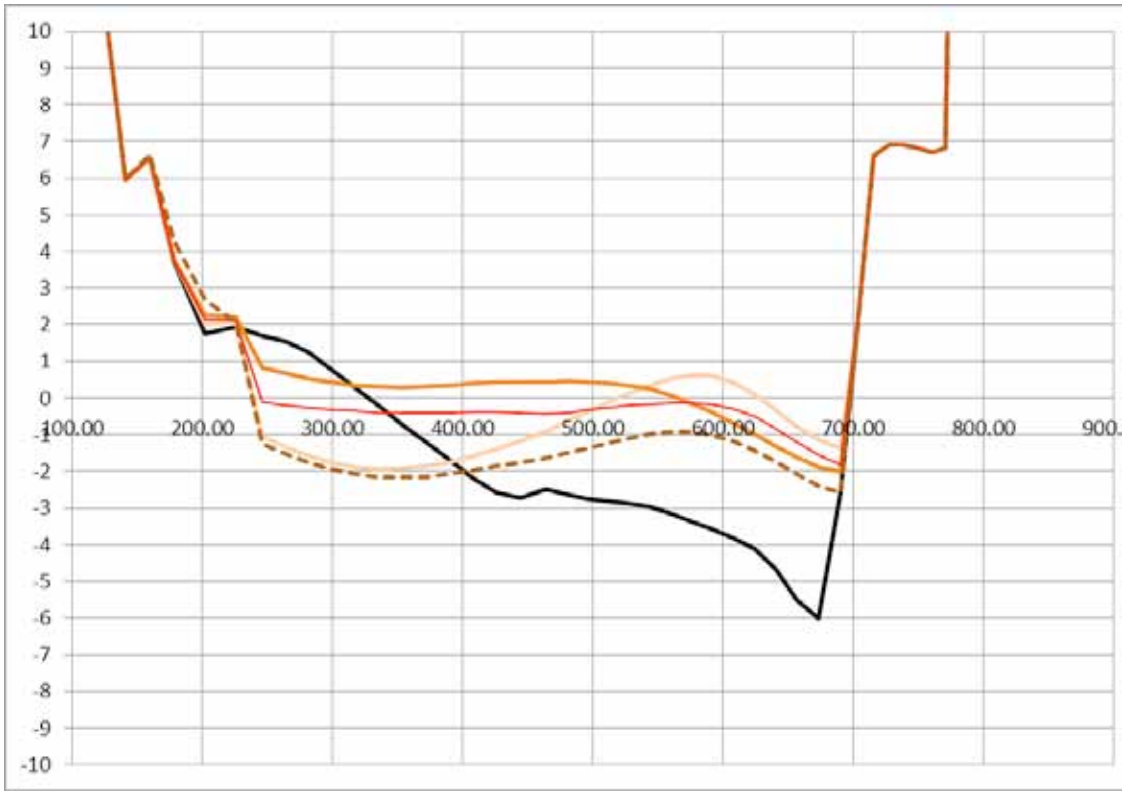


Figura 279 – Scenario corrente libera: sezione al km 587 in diversi istanti negli ultimi due anni di simulazione.

Osservando i risultati complessivi da foce Mincio al Po di Goro, emerge che il progetto di sistemazione a corrente libera consegue efficacemente l'obiettivo di formazione e mantenimento nel tempo del canale navigabile, ma evidentemente contribuendo anche all'inevitabile e consequenziale abbassamento del fondo alveo.

È pertanto possibile che in futuri approfondimenti progettuali la configurazione delle opere di sistemazione a corrente libera possa essere ulteriormente ottimizzata ricercando il migliore compromesso tra formazione del canale navigabile e contenimento dell'abbassamento del fondo alveo.

9.8 SIMULAZIONI DI DETTAGLIO DELLE TRAVERSE DI SOSTEGNO NEL PROGETTO DI REGIMAZIONE

Obiettivo delle simulazioni di dettaglio è quello di individuare il campo di moto che si instaura in corrispondenza delle traverse, indagando una lunghezza complessiva di qualche km a monte e a valle, e di fornire indicazioni per la progettazione dell'opera stessa.

Le simulazioni di dettaglio si riferiscono a due condizioni, in cui la portata liquida in ingresso è pari a 1'000 e a 2'000 m³/s; l'opera è inserita come uno sfioratore tale per cui a monte si instaurano i livelli di progetto.

Le analisi preliminari effettuate sulla prima configurazione della traversa 1, che prevedeva di realizzare la centrale idroelettrica accanto alla traversa ed alla conca di navigazione, hanno mostrato che l'eccessivo allargamento della sezione d'alveo comporta degli effetti peggiorativi sulla capacità di trasporto solido, giudicati non trascurabili. Si è passati quindi ad una configurazione più snella, che prevede di realizzare lo sbarramento e la conca, senza prevedere un allargamento significativo dell'alveo, e di considerare le turbine per la produzione di energia idroelettrica come eventuale elemento aggiuntivo, da ubicare lungo la stessa traversa.

La Figura 280 e la Figura 281 riportano il campo di moto che si realizza in corrispondenza del primo sbarramento per portata pari a 2'000 m³/s (centrale chiusa e traversa aperta) rispettivamente nella configurazione iniziale larga e in quella più stretta.

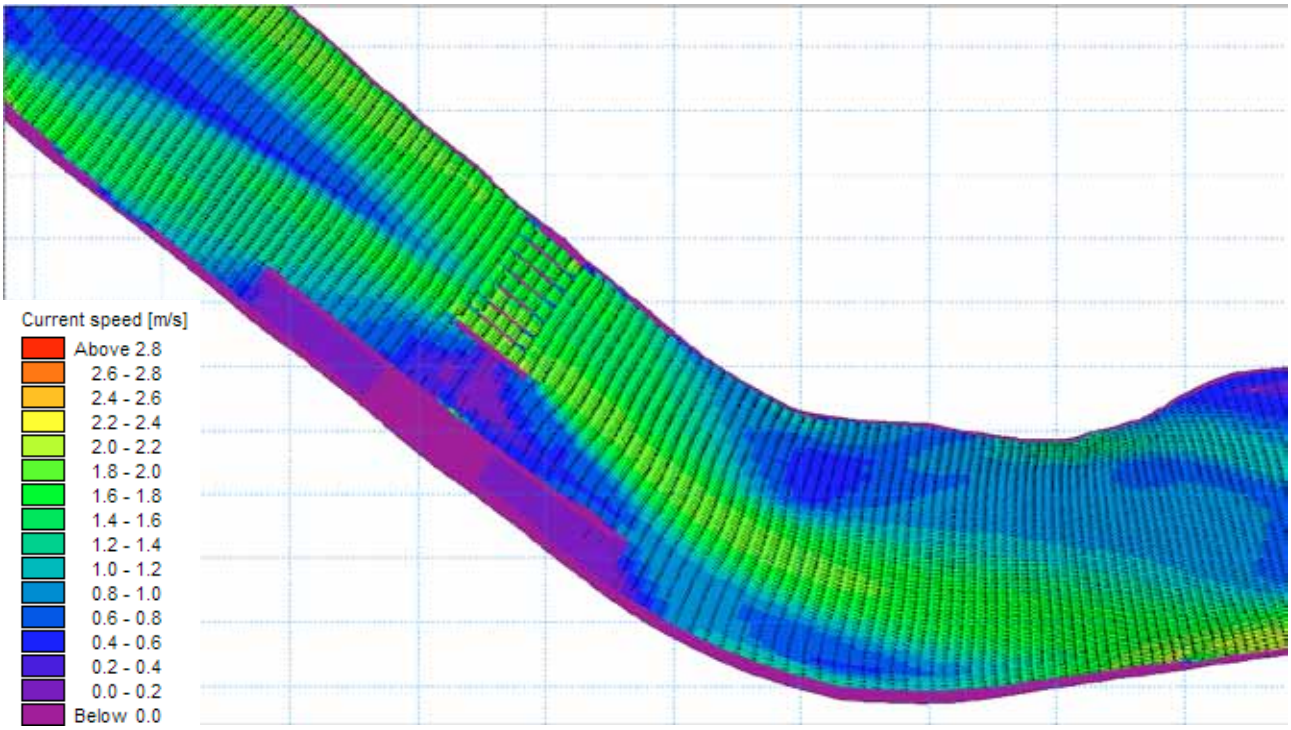


Figura 280 – Primo sbarramento: campo di moto che si verifica nel caso della prima configurazione (traversa+centrale+conca in parallelo) per Q=2'000 m³/s (quindi con traversa aperta e centrale chiusa).

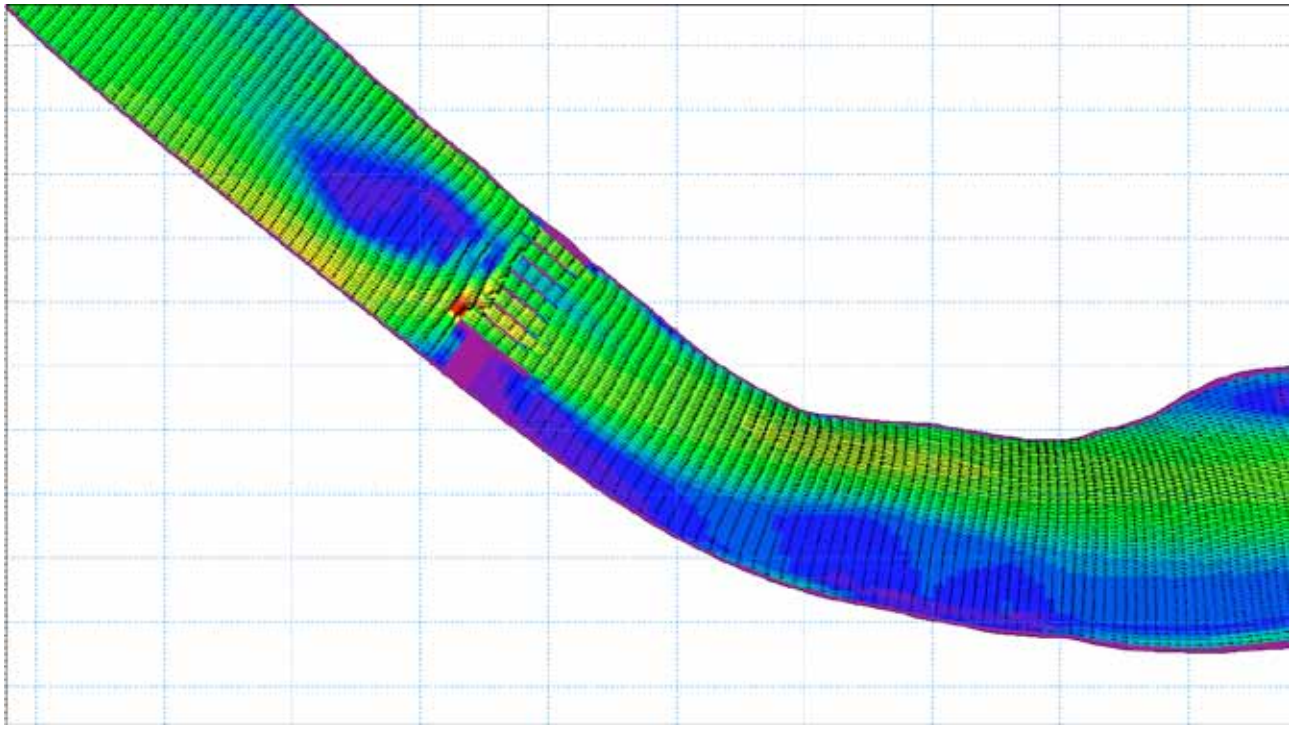


Figura 281 – Primo sbarramento: campo di moto che si verifica nel caso della prima configurazione (traversa+conca in parallelo) per Q=2'000 m³/s (quindi con traversa aperta).

La Figura 282 riporta il campo di moto che si genera, per portata pari a 2'000 m³/s, nella seconda configurazione della traversa, senza centrale, quindi senza allargamenti sensibili dell'alveo rispetto allo stato attuale, in diversi istanti di una simulazione a fondo mobile.

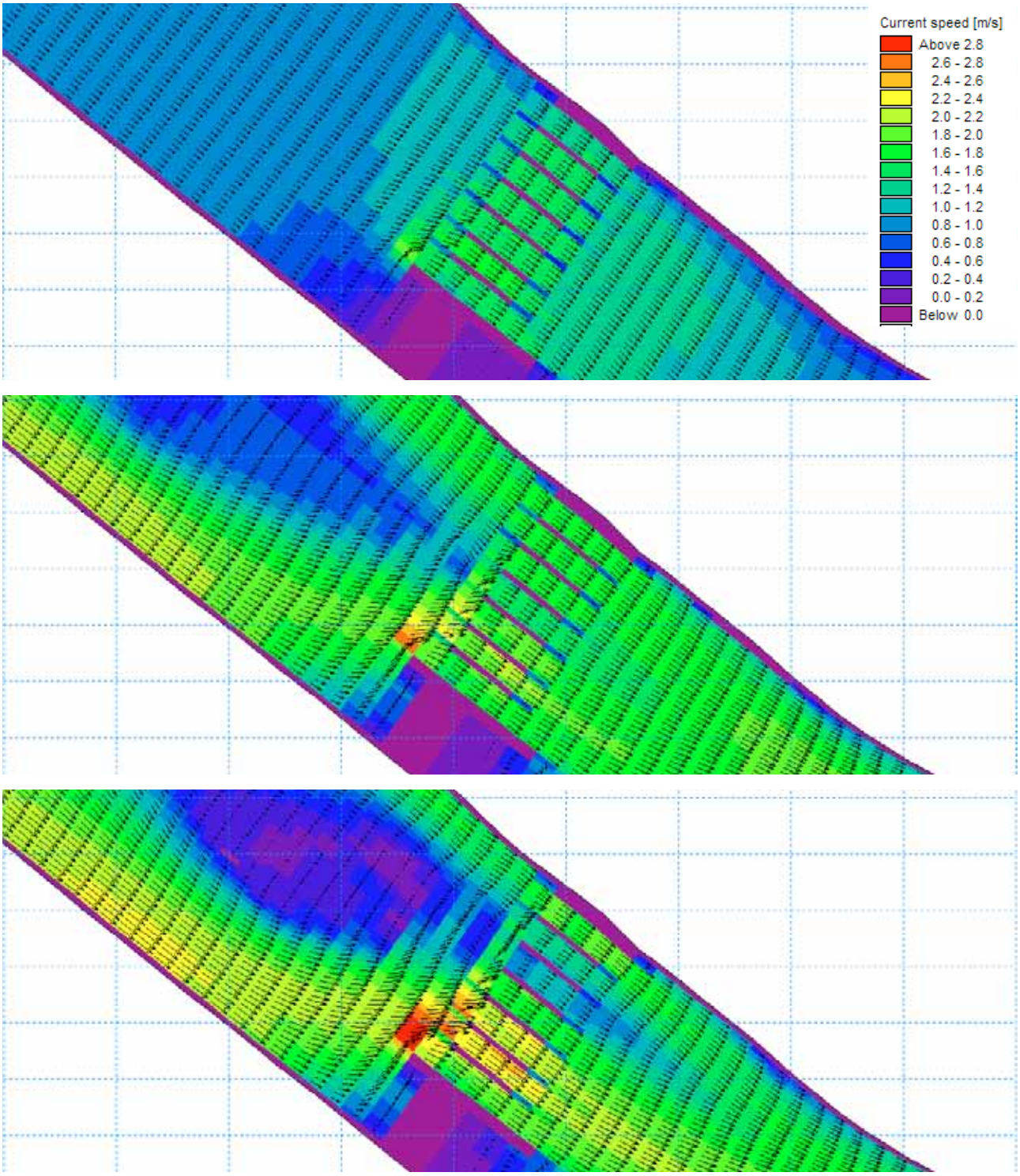


Figura 282 – Primo sbarramento: campo di moto per 2'000 m³/s in diversi istanti in una simulazione a fondo mobile per la configurazione non allargata prescelta della traversa (quindi con traversa aperta).

I risultati delle simulazioni mostrano che il materiale in arrivo da monte oltrepassa la traversa in maniera piuttosto ben distribuita attraverso le luci centrali.

Le figure seguenti riportano i risultati ottenuti in termini di campo di moto in corrispondenza degli sbarramenti successivi al primo negli scenari con traversa aperta (Q=2'000 m³/s).

Si osserva che:

lungo il quarto sbarramento, situato in un tratto meno rettilineo rispetto agli altri, con cambio di sezione, si determina un campo più disomogeneo di velocità;

il quinto sbarramento, essendo largo oltre 410 metri, determina velocità inferiori rispetto ai precedenti, caratterizzati da valori di larghezza di circa la metà.

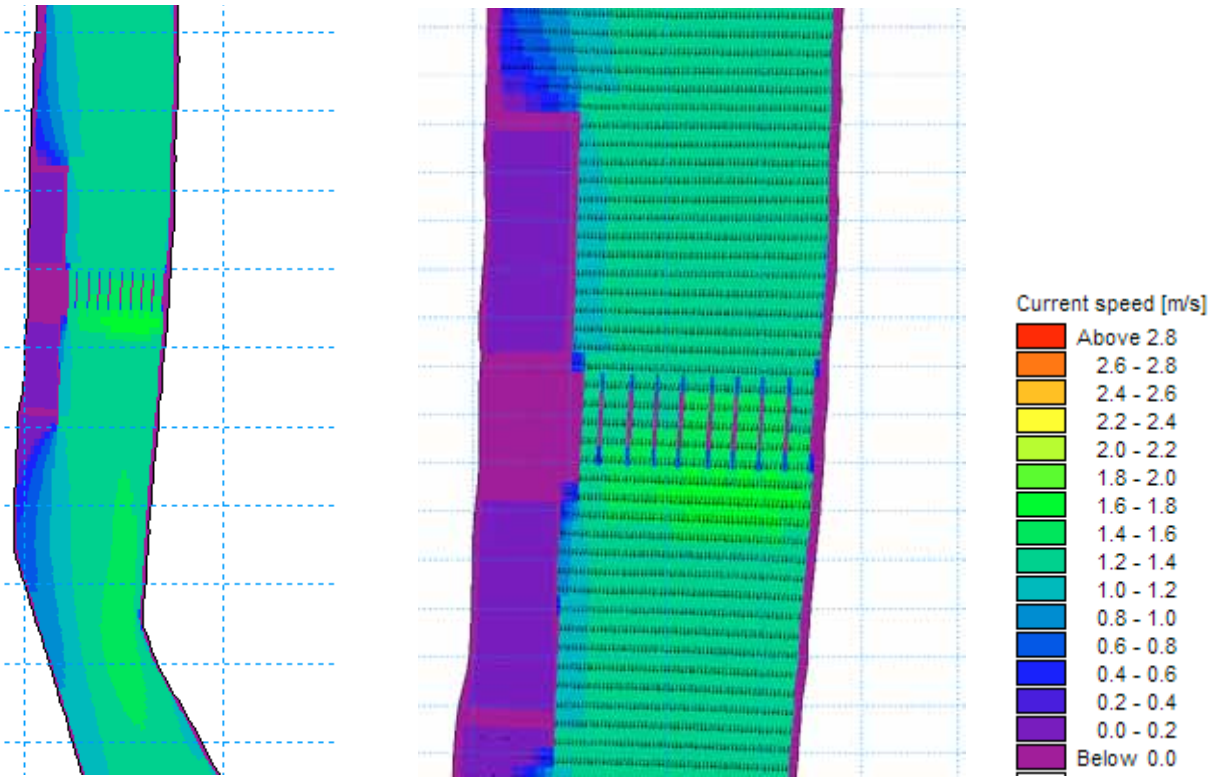


Figura 283 – Secondo sbarramento: campo di moto per 2'000 m³/s (traversa aperta).

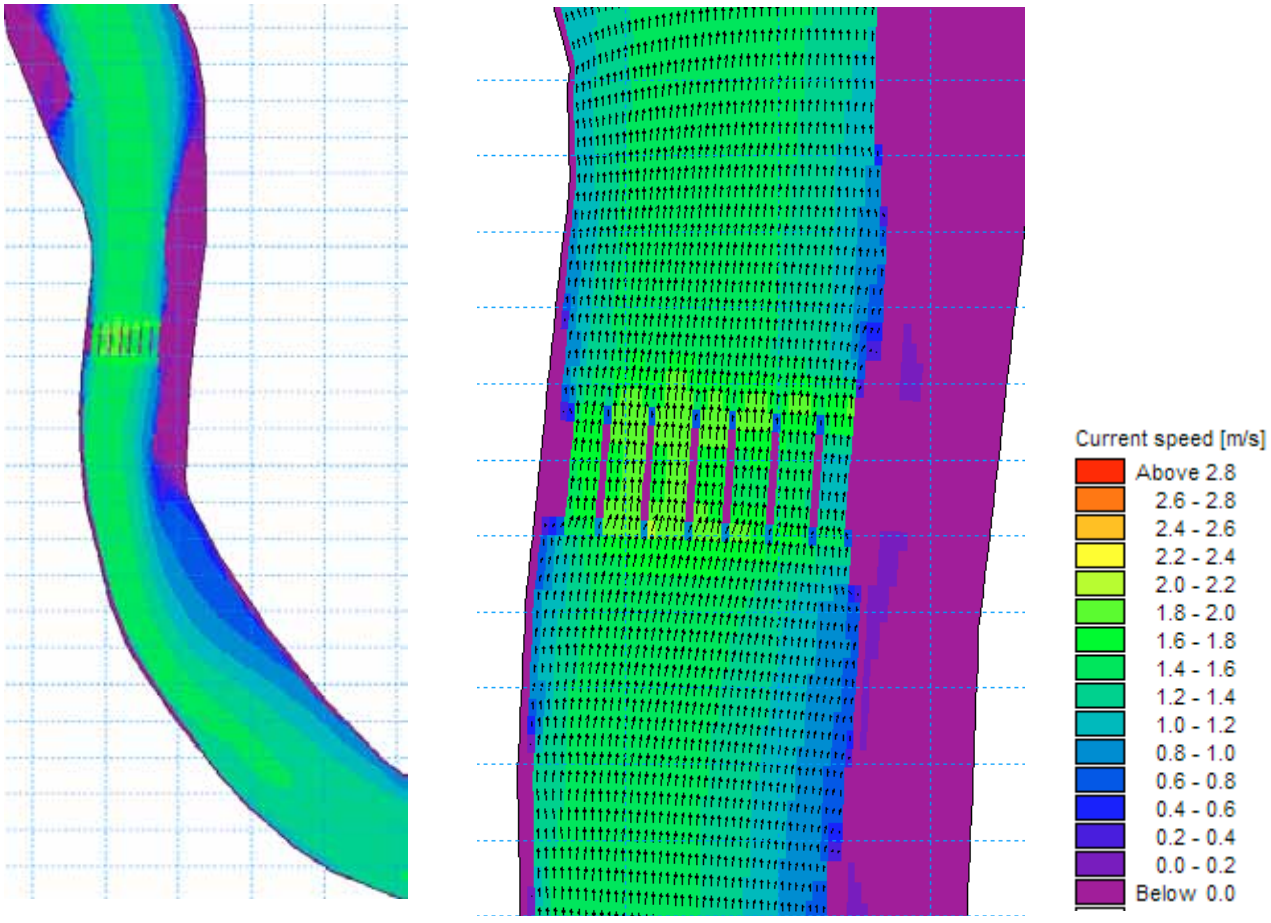


Figura 284 – Terzo sbarramento: campo di moto per 2'000 m³/s (traversa aperta).

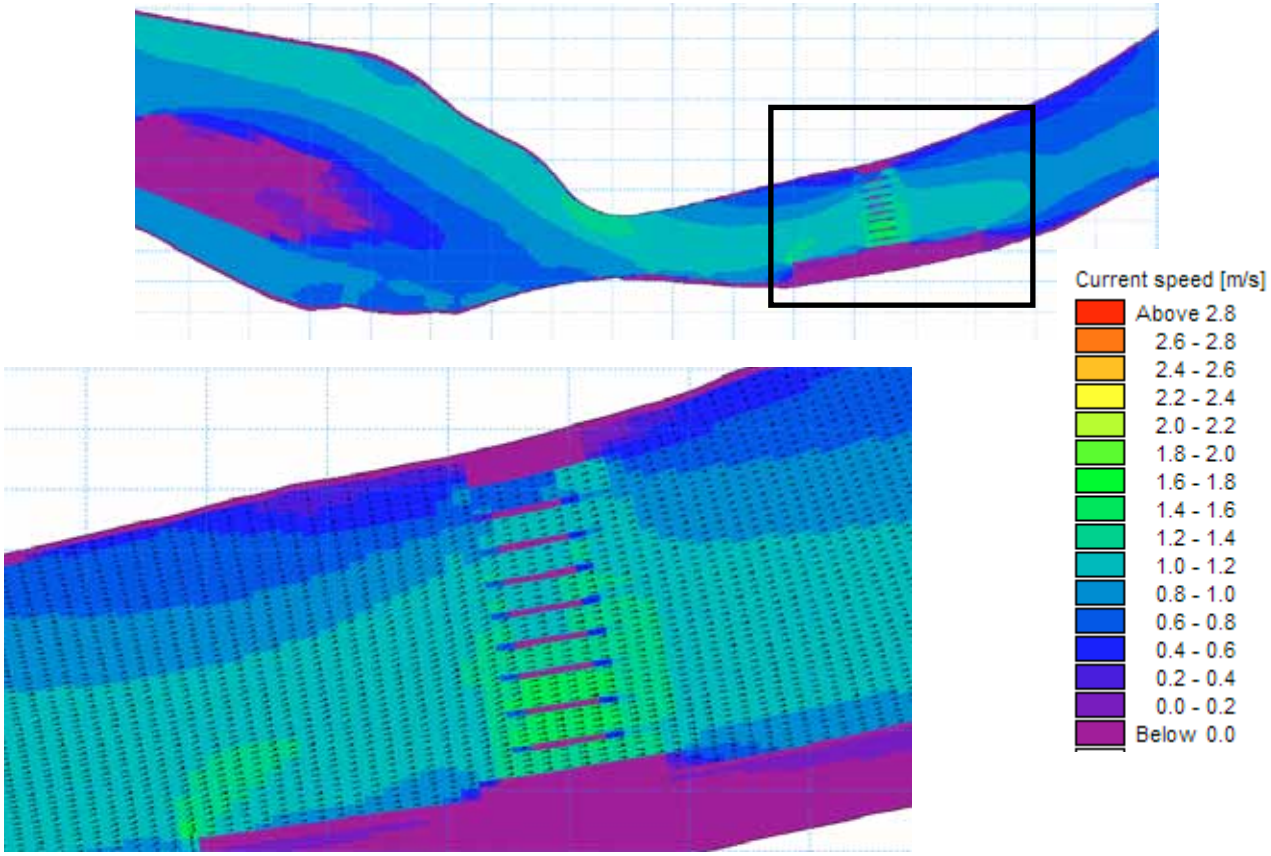


Figura 285 – Quarto sbarramento: campo di moto per 2'000 m³/s (traversa aperta).

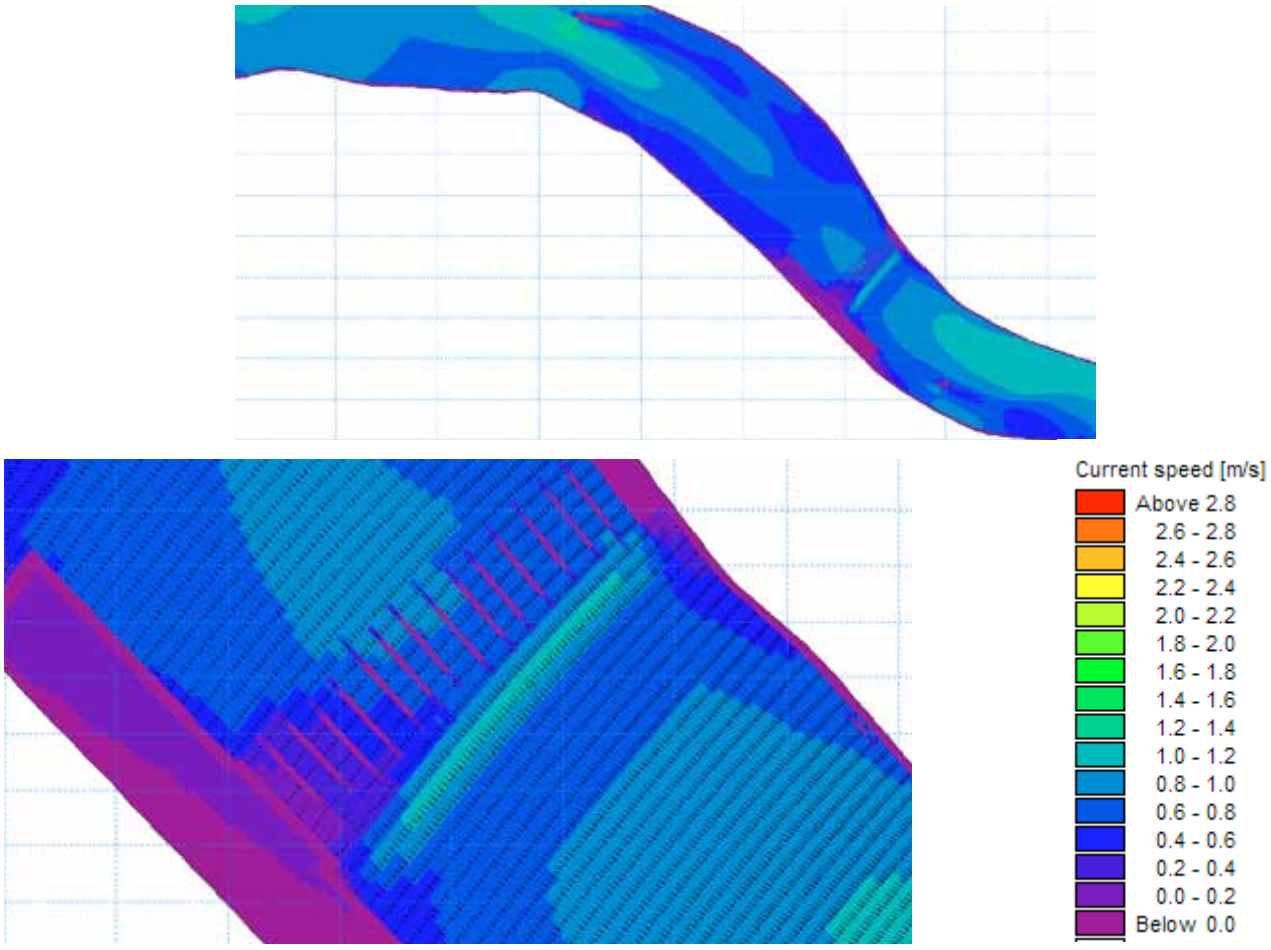


Figura 286 – Quinto sbarramento: campo di moto per 2'000 m³/s (traversa aperta).

Nelle situazioni con sbarramento chiuso, il campo di moto appare più regolare a monte della traversa e piuttosto ben distribuito lungo la sezione, con velocità che si assestano a monte su valori variabili tra 0.3 e 0.8 m/s, a seconda della larghezza dell'opera, a valle della quale si registrano velocità maggiori, di circa 1 m/s.

Le figure seguenti riportano il campo di moto in corrispondenza del secondo sbarramento con traversa chiusa (Q=1'000 m³/s) – si osservi che rispetto alle figure precedenti la legenda ha una scala di colori differente, per cogliere le differenze nel campo delle basse velocità.

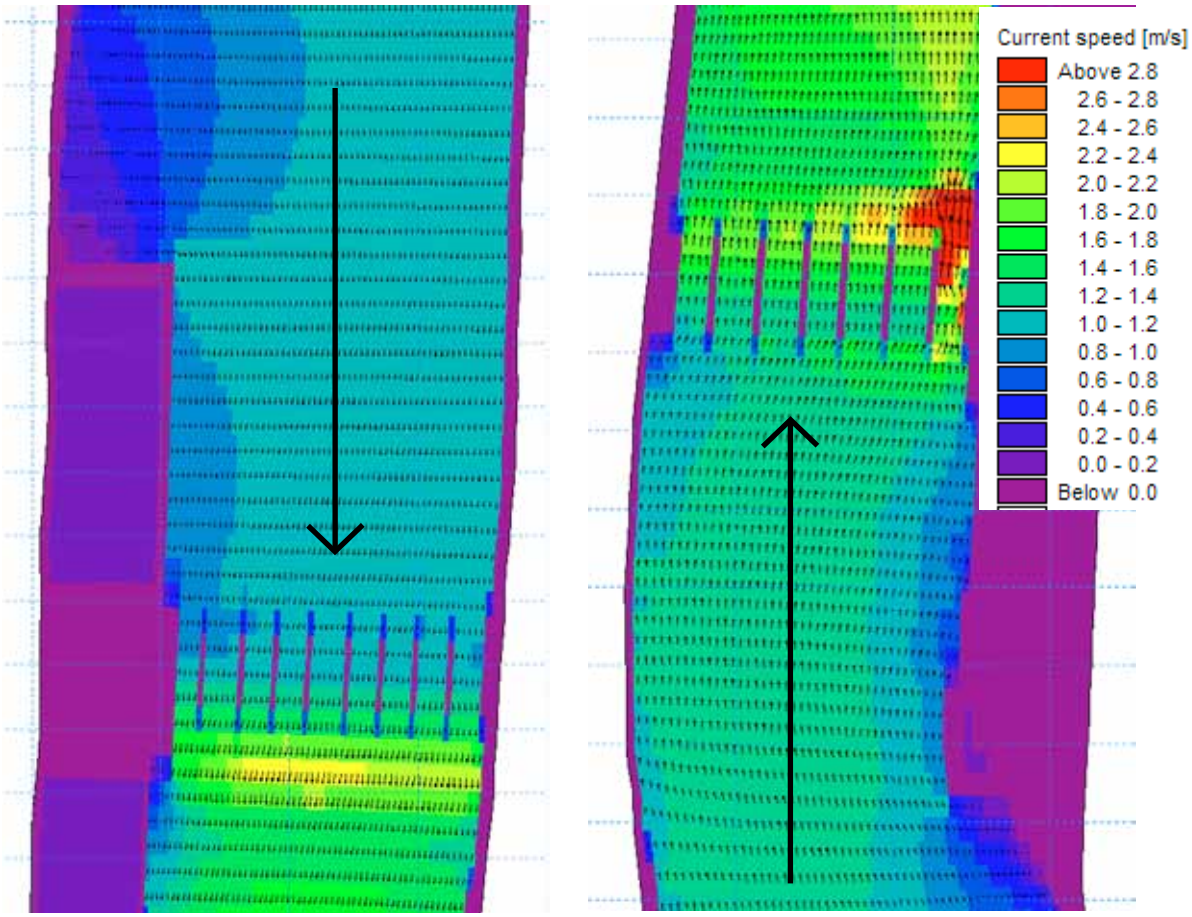


Figura 287 – Secondo sbarramento (a sinistra) e terzo sbarramento (a destra): campo di moto per 1'000 m³/s (traversa chiusa).

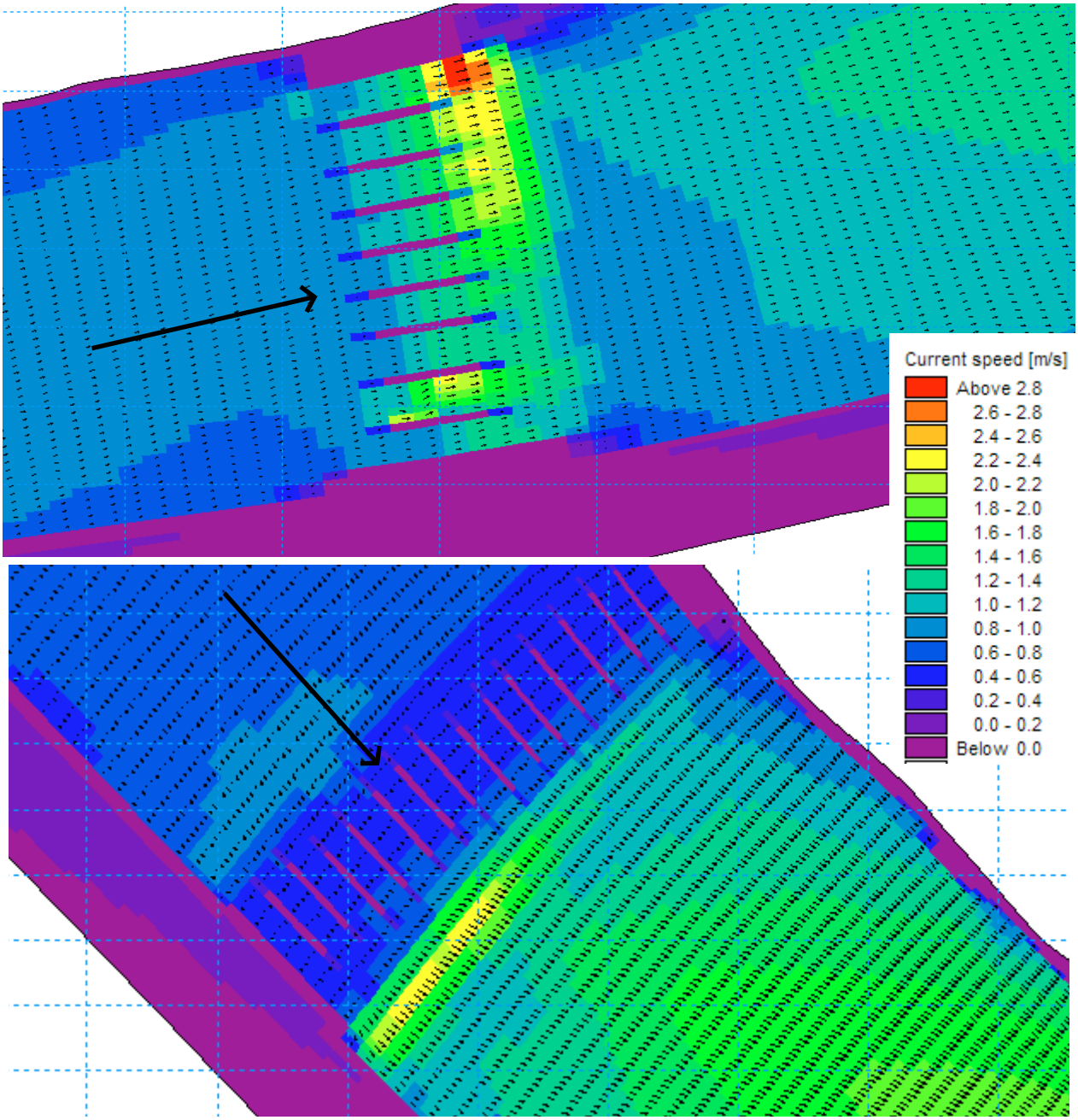


Figura 288 – Quarto sbarramento (in alto) e quinto sbarramento (in basso): campo di moto per 1'000 m³/s (traversa chiusa).

Il campo di moto che si determina in corrispondenza degli sbarramenti produce degli effetti sulla dinamica morfologica di cui tener conto nella progettazione delle opere. In particolare, in tutti i casi si dovrà tener conto del possibile deposito che si determina in prossimità della conca di navigazione. Le figure seguenti riportano alcune immagini ottenute in un istante di simulazione con traverse aperte e portata in ingresso pari a 2'000 m³/s che indicano le zone di deposito ed erosione rispetto ad una situazione iniziale (i valori positivi sono i depositi, i valori negativi le erosioni). I depositi a monte delle conche sono determinati dalle minori velocità che si determinano in tali zone, mentre i depositi a valle delle conche sono determinati dall'allargamento di sezione rispetto alla larghezza della traversa. Si osserva che la quarta traversa risulta avere la conca in curva e perciò in posizione più favorevole rispetto alle altre. I risultati ottenuti confermano inoltre la necessità di proteggere il fondo a valle dell'opera, onde evitare fenomeni erosivi localizzati. Nelle stesse figure è tratteggiata l'area da proteggere, la cui lunghezza, indicata pari a quella del mandracchio di valle della conca (circa 300 m), sarà da verificare con modello fisico.

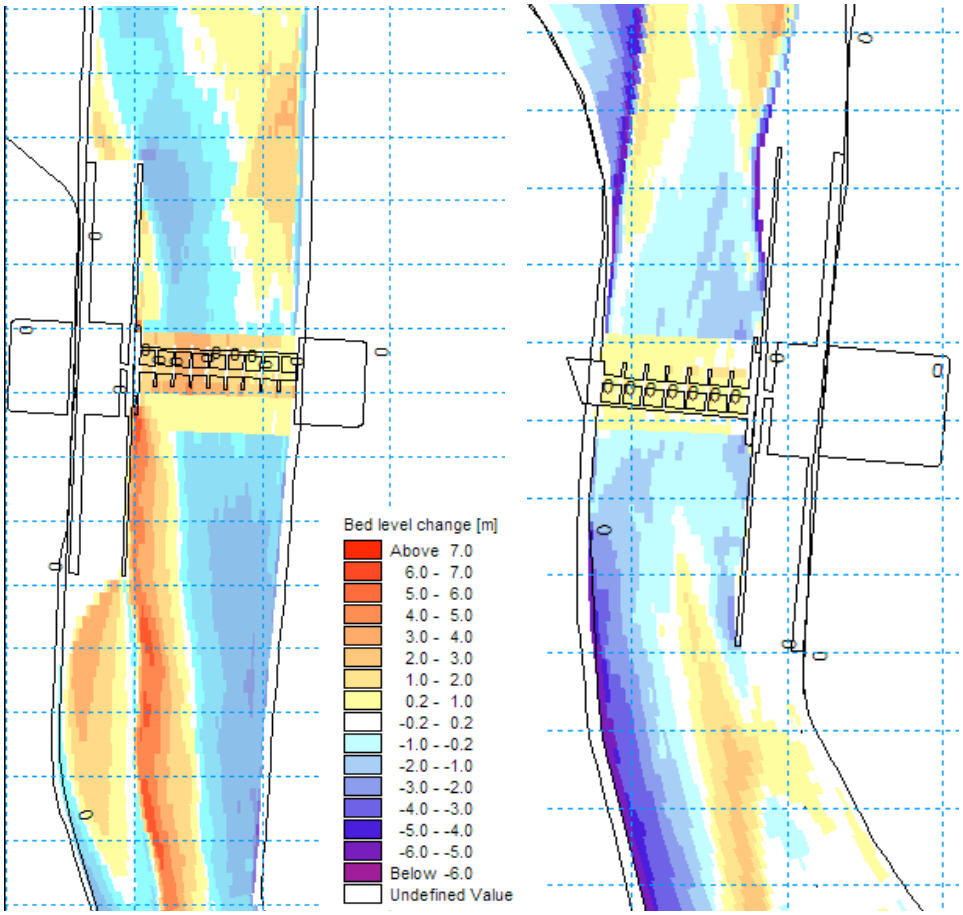


Figura 289 – Secondo sbarramento (a sinistra) e terzo sbarramento (a destra): modifiche del fondo per la simulazione con portata in ingresso di 2'000 m³/s (traversa aperta).

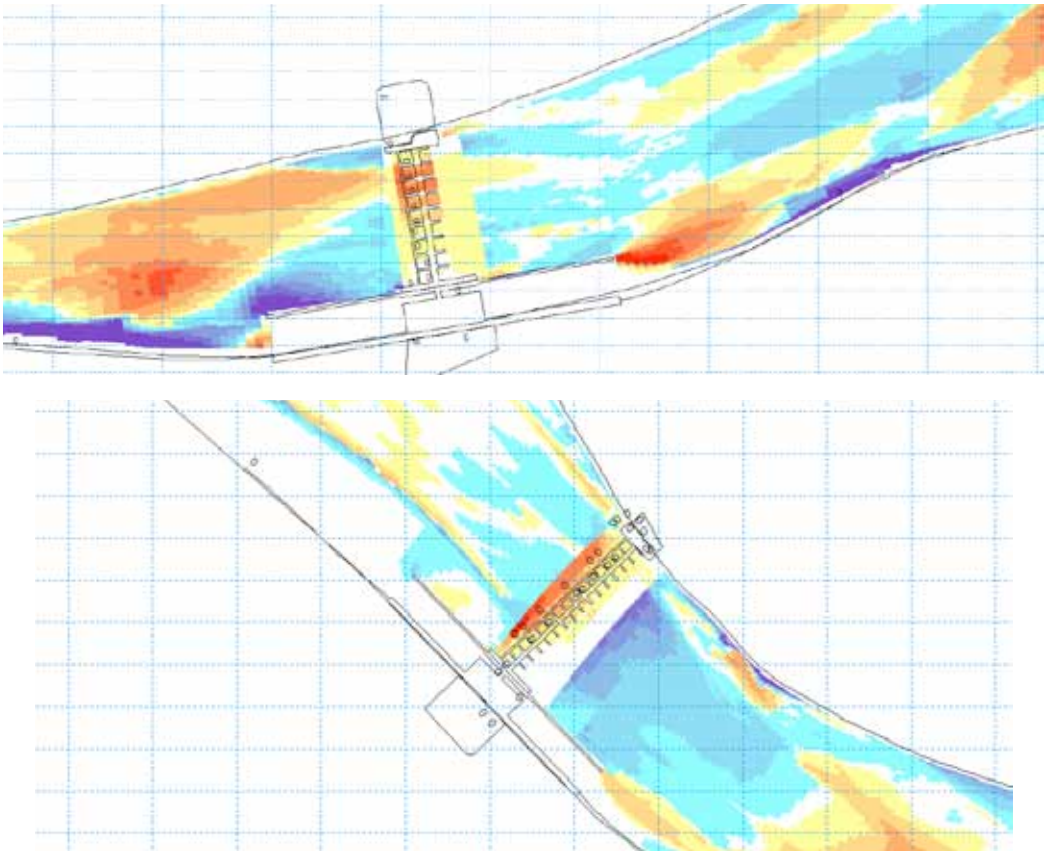


Figura 290 – Quarto sbarramento (in alto) e quinto sbarramento (in basso): modifiche del fondo per la simulazione con portata in ingresso di 2'000 m³/s (traversa aperta).

10 ANALISI CONDIZIONI DI NAVIGABILITÀ DEL FIUME PO

10.1 PREMESSA

L'obiettivo principale degli interventi posti alla base del presente studio è quello di migliorare le attuali condizioni di navigabilità del fiume Po, in modo tale da garantire un tirante sufficiente al passaggio delle imbarcazioni della classe Va CEMT.

Per poter determinare l'entità dei tiranti idrici e valutare le condizioni di navigabilità che si hanno in condizioni di magra, è stato implementato un modello idraulico bidimensionale a fondo fisso relativo all'alveo inciso del fiume Po compreso tra Cremona e l'incile del Po di Goro. In particolare, sono stati implementati tre modelli, ciascuno relativo ad uno specifico scenario: assetto attuale, regimazione, sistemazione a corrente libera. Ciascun modello è stato costruito utilizzando la rispettiva batimetria di calcolo finale ottenuta dalla simulazione di periodo 10 anni con il modello bidimensionale a fondo mobile descritto nel precedente capitolo 9.

Coerentemente con quanto già effettuato nell'ambito del precedente capitolo 6, le simulazioni sono state effettuate considerando i seguenti valori di portata di magra:

- portata caratterizzata da una durata media annua di 340 giorni/anno, variabile lungo l'asta del Po;
- portata di magra, costante per l'intero tratto, pari a 350 m3/s.

Per entrambe le simulazioni sono stati individuate le zone d'alveo in cui si ha un tirante pari o superiore a 2,2 m (fondale di 2,00 m, necessario al transito delle imbarcazioni di classe Va + 0,20 m di franco).

10.2 PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO

Il modello idraulico bidimensionale a fondo fisso è stato implementato mediante il programma di calcolo INFOWORKS 2D ICM di Innovyze, che permette di analizzare il campo di moto a partire da un D.T.M. (Digital Terrain Model), rappresentativo della geometria del dominio di calcolo, basandosi sulla risoluzione di tre equazioni non lineari alle differenze finite per la determinazione del campo di moto della corrente su di un piano bidimensionale (x, y). Due di queste sono le equazioni del moto nelle direzioni x e y; la terza equazione è data dalla legge di continuità che garantisce la conservazione della massa all'interno del dominio di calcolo.

In particolare, come già detto in premessa, il D.T.M. utilizzato è rappresentato dalla batimetria di calcolo finale ottenuta con il modello bidimensionale a fondo mobile (descritto nel precedente capitolo 8), relativo alla simulazione di periodo 10 anni.

Il tratto di fiume implementato con il modello sopra richiamato ha un'estensione longitudinale complessiva pari a circa 230 km.

La superficie delle singole maglie di calcolo che costituiscono il dominio del modello è compresa tra 100 e 500 mq. Complessivamente il modello bidimensionale implementato presenta un numero di elementi della maglia (triangoli) pari complessivamente a circa 850'000.

Il modello è stato utilizzato in regime di moto permanente e cioè imponendo in input nella sezione di monte un valore costante della portata e in corrispondenza della sezione finale un livello idrico costante.

Per ciascun tratto sono state considerate le seguenti condizioni al contorno:

- condizione di monte: portata costante corrispondente agli scenari definiti in precedenza: portata di durata media annua di 340 giorni/anno e portata pari a 350 m3/s;

- condizione di valle: quota idrica presso l'incile del Po di Goro pari a 0,0 m s.m..

Per definire le portate di riferimento in base a cui effettuare le analisi modellistiche, si è fatto riferimento alla scala di deflusso delle portate del Po in corrispondenza degli idrometri di Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro.

Di seguito si riportano i valori di portata caratterizzati da una durata media annua pari a 340 giorni/anno, desunte dagli Annali idrologici pubblicati dall'ARPA Emilia Romagna - Servizio Idrometeorologico - Area Idrologia:

- Cremona: 415 m3/s;
- Boretto: 430 m3/s;
- Borgoforte: 485 m3/s;
- Pontelagoscuro: 530 m3/s.

La portata valutata a Cremona è valida sino a monte delle confluenze dei torrenti Parma ed Enza, mentre la portata valutata nella stazione di Boretto (posta poco a valle della foce dei suddetti torrenti) è valida sino a monte di foce Oglio; dalla confluenza Oglio fino a foce Mincio è stata considerata la portata definita nella stazione di Borgoforte; infine, per l'intero tratto posto a valle di foce Mincio/Secchia, è stata considerata la portata ricavata nella stazione di Pontelagoscuro, in quanto gli unici apporti residui (confluenza Panaro e apporto della falda freatica) sono, in condizione di magra, molto limitati; inoltre lungo il tratto sono presenti delle derivazioni irrigue che sostanzialmente compensano tali apporti.

10.3 RISULTATI DEL MODELLO 2D A FONDO FISSO

Attraverso le analisi modellistiche sono state individuate, per l'intero tratto fluviale tra Cremona e l'incile del Po di Goro, le aree dell'alveo di magra caratterizzate da (v. Allegato n. 10):

- tirante idrico maggiore di 2,20 m (2,00 + 0,20 di franco) relativo ad una portata caratterizzata da una durata pari a 340 giorni, con riferimento alla batimetria relativa all'assetto attuale (dopo 10 anni di simulazione del modello bidimensionale a fondo mobile), cioè senza considerare l'effetto degli interventi previsti nel progetto di regimazione e di sistemazione a corrente libera (v. Allegato 10.1);
- tirante idrico maggiore di 2,20 m (2,00 + 0,20 di franco) relativo ad una portata caratterizzata da una durata pari a 340 giorni, con riferimento alla batimetria relativa all'assetto di progetto conseguente agli interventi di regimazione (dopo 10 anni di simulazione del modello bidimensionale a fondo mobile - v. Allegato 10.2);
- tirante idrico maggiore di 2,20 m (2,00 + 0,20 di franco) relativo ad una portata caratterizzata da una durata pari a 340 giorni, con riferimento alla batimetria relativa all'assetto di progetto conseguente agli interventi di sistemazione a corrente libera (dopo 2 anni di simulazione del modello bidimensionale a fondo mobile per il tratto da Cremona a foce Mincio e dopo 10 anni di simulazione del modello bidimensionale a fondo mobile per il tratto da foce Mincio fino all'incile del Po di Goro - v. Allegato 10.3);
- tirante idrico maggiore di 2,20 m (2,00 + 0,20 di franco) relativo ad una portata pari a 350 m^3/s, con riferimento alla batimetria relativa all'assetto attuale (dopo 10 anni di simulazione del modello bidimensionale a fondo mobile), cioè senza considerare l'effetto degli interventi previsti nel progetto di regimazione e di sistemazione a corrente libera (v. Allegato 10.4);
- tirante idrico maggiore di 2,20 m (2,00 + 0,20 di franco) relativo ad una portata pari a 350 m^3/s, con riferimento alla batimetria relativa all'assetto di progetto conseguente agli interventi di regimazione (dopo 10 anni di simulazione del modello bidimensionale a fondo mobile - v. Allegato 10.5);
- tirante idrico maggiore di 2,20 m (2,00 + 0,20 di franco) relativo ad una portata pari a 350 m^3/s, con riferimento alla batimetria relativa all'assetto di progetto conseguente agli interventi di sistemazione a corrente libera (dopo 2 anni di simulazione del modello bidimensionale a fondo mobile per il

tratto da Cremona a foce Mincio e dopo 10 anni di simulazione del modello bidimensionale a fondo mobile per il tratto da foce Mincio fino all'incile del Po di Goro - v. Allegato 10.6).

Di seguito si riporta, per le diverse configurazioni, una sintesi delle condizioni di navigabilità associate solo alla portata caratterizzata da una durata pari a 340 giorni. I risultati relativi alla portata di 350 m^3/s, seppur peggiori in termini di numero ed estensioni dei tratti con tiranti insufficienti, sono poco differenti in termini sostanziali.

10.3.1 Condizioni di navigabilità con riferimento all'assetto attuale

Rimandando ai citati allegati per i risultati di dettaglio, di seguito, per una più agevole e sintetica comprensione, vengono descritte le condizioni di navigabilità relative all'assetto attuale; in particolare vengono elencati i tratti critici, ossia quelli per cui, in corrispondenza del valore di portata di riferimento (portata con durata media annua di 340 giorni/anno), si hanno tiranti idrici minori di 2.2 m per una larghezza dell'alveo di magra tale da impedire il transito di imbarcazioni della classe Va CEMT.

Nello specifico, con riferimento all'assetto attuale, utilizzando come batimetria quella ottenuta con il modello bidimensionale dopo 10 anni di simulazione (anno 2014), i tratti che presentano problemi per la navigazione sono localizzati a:

- Cremona, dal km 375 al km 377;
- Zibello, dal km 393 al km 396;
- Roccabianca, nell'intorno del km 402;
- Torricella, nell'intorno del km 409;
- Coltaro, nell'intorno del km 414;
- Casalmaggiore, nell'intorno del km 426;
- Viadana, nell'intorno del km 433 e del km 438.5;
- Correggioverde, nell'intorno del km 445;
- Luzzara, nell'intorno del km 451;
- a monte di foce Oglio;
- Borgoforte, nell'intorno del km 470;
- Gorgo, nell'intorno del km 484 e tra il km 487 e il km 489;
- Ostiglia, nell'intorno del km 510;
- Carbonara di Po, dal km 518 al km 520;
- Castelnovo Bariano tra il km 525 e il km 526;
- Calto, tra il km 537 e il km 539;
- Stienta, tra il km 553 e il km 554;
- Pontelagoscuro, nell'intorno del km 562;
- Polesella, tra il km 580 e il km 581;
- Alberone, nei pressi del km 587.

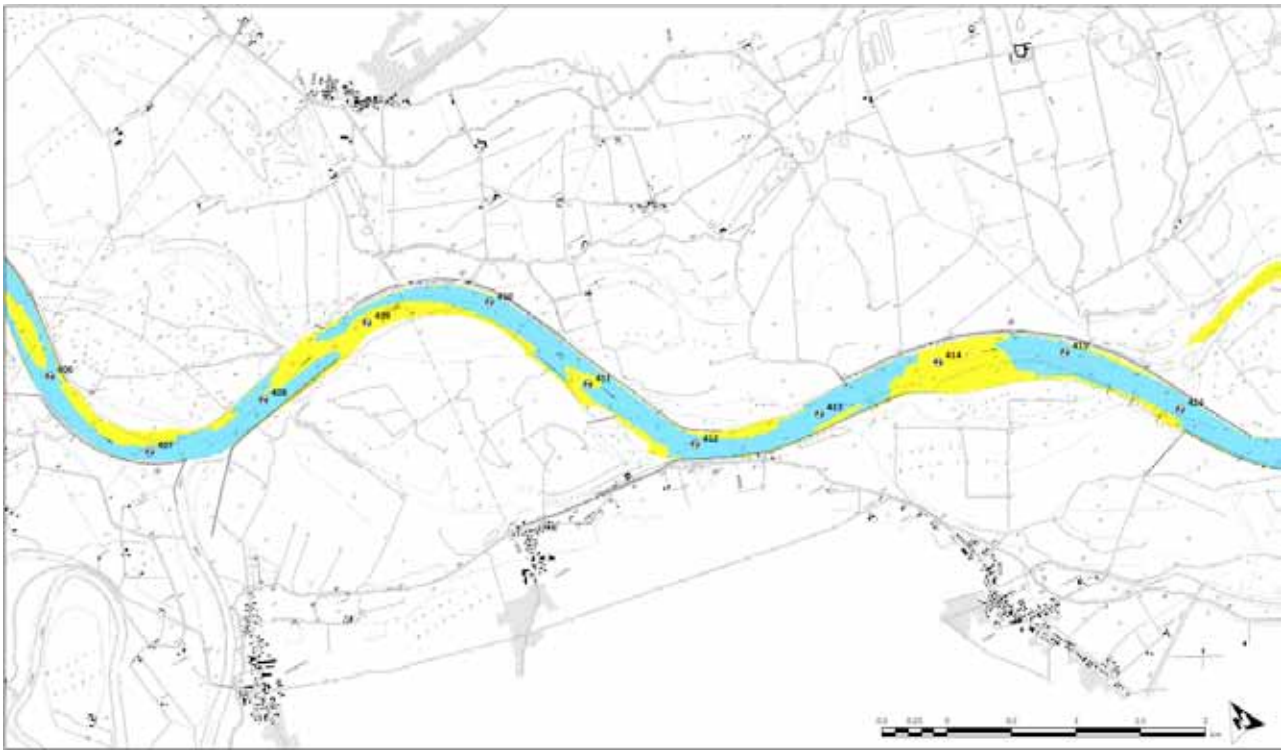


Figura 291 - Stralcio della cartografia riportata nell'Allegato 10.1 con rappresentati i tiranti in condizioni di magra (Q340gg) nei pressi di Torricella – assetto attuale (in giallo le zone con tiranti inferiori a 2.2 m; in azzurro le zone con tiranti maggiori di 2.2 m)

10.3.2 Condizioni di navigabilità con riferimento all'assetto di progetto con interventi di regimazione

Rimandando ai citati allegati per i risultati di dettaglio, di seguito, per una più agevole e sintetica comprensione, vengono descritte le condizioni di navigabilità relative all'assetto di progetto con interventi di regimazione (cap. 7); in particolare vengono elencati i tratti critici, ossia quelli per cui, in corrispondenza del valore di portata di riferimento (portata con durata media annua di 340 giorni/anno), si hanno tiranti idrici minori di 2.2 m per una larghezza dell'alveo di magra tale da impedire il transito di imbarcazioni della classe Va CEMT.

Nello specifico, con riferimento agli interventi di regimazione, utilizzando come batimetria quella ottenuta con il modello bidimensionale dopo 10 anni di simulazione (anno 2014), i tratti che presentano problemi per la navigazione sono localizzati a:

- Roccabianca, nell'intorno del km 402;
- Viadana, nell'intorno del km 433;
- a monte di foce Oglio;
- Ostiglia, nell'intorno del km 508;
- Occhiobello, tra il km 559 e il km 560;
- Pontelagoscuro, nell'intorno del km 562;
- Francolino, nell'intorno del km 568;
- Garofalo, nell'intorno del km 573;
- Polesella, tra il km 580 e il km 581;
- Crespino, nei pressi del km 591.

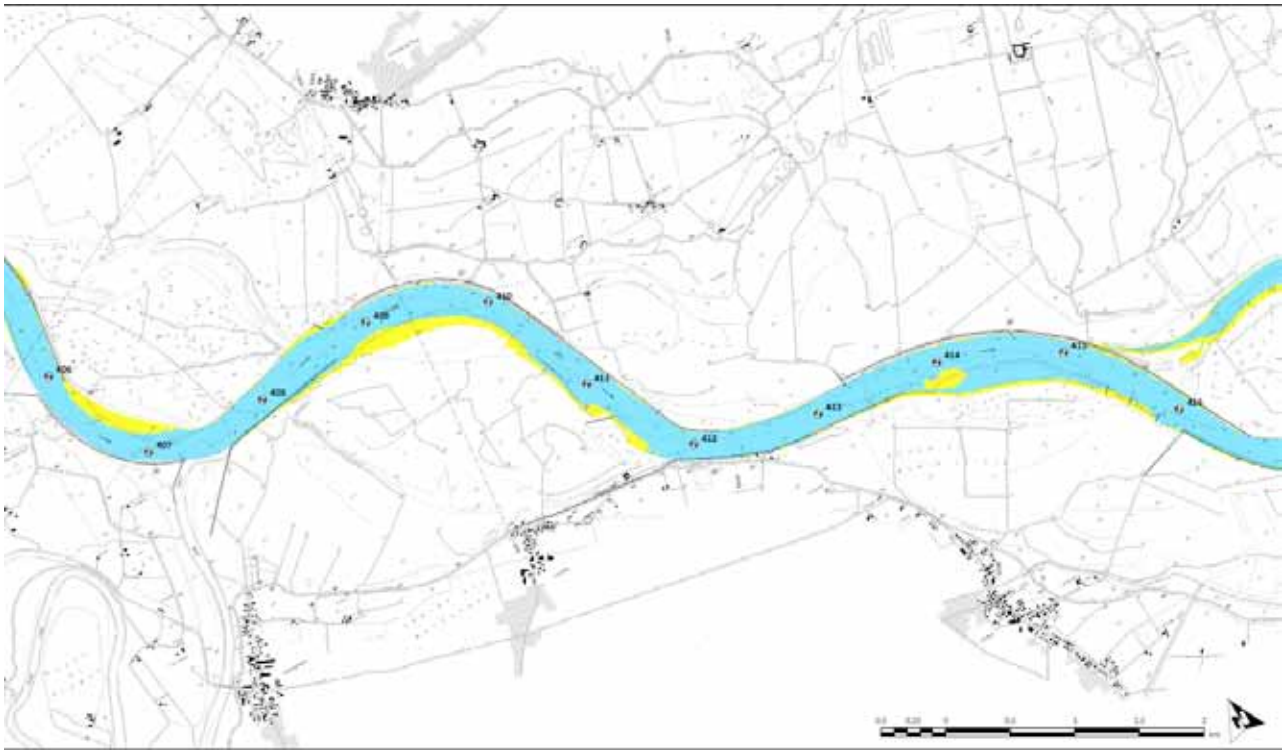


Figura 292 - Stralcio della cartografia riportata nell'Allegato 10.2 con rappresentati i tiranti in condizioni di magra (Q340gg) nei pressi di Torricella – interventi di regimazione (in giallo le zone con tiranti inferiori a 2.2 m; in azzurro le zone con tiranti maggiori di 2.2 m)

In generale i punti critici per la navigazione nell'assetto di progetto con gli interventi di regimazione sono molto contenuti, e sono posti solo immediatamente a valle di alcune delle traverse, ove l'effetto di rigurgito indotto dalla traversa di valle si è praticamente esaurito. A valle del tratto regimato, cioè a valle di Stienta, i punti critici sono essenzialmente gli stessi che si hanno con riferimento all'assetto attuale. E' importante evidenziare che nel tratto regimato si hanno lunghi tratti in cui i tiranti di navigazione sono ben superiori al valore di riferimento posto pari a 2.2 m; in particolare si hanno tiranti maggiori di 3.5 m per l'85% del tratto compreso tra Cremona e Stienta (quinta traversa).

I suddetti punti critici presenti nel tratto regimato possono essere eliminati inserendo nei tratti a valle delle traverse alcune opere di sistemazione a corrente libera, oppure prevedendo opportuni interventi di manutenzione periodica del fondo alveo, attraverso la movimentazione dei sedimenti mediante draghe. Per quanto riguarda, invece, il tratto a valle della quinta traversa, i punti critici possono essere risolti attraverso gli interventi di sistemazione a corrente libera previsti nel paragrafo 6.7.

10.3.3 Condizioni di navigabilità con riferimento all'assetto di progetto con interventi di sistemazione a corrente libera

Rimandando ai citati allegati per i risultati di dettaglio, di seguito, per una più agevole e sintetica comprensione, vengono descritte le condizioni di navigabilità relative all'assetto di progetto con interventi di sistemazione a corrente libera (per il tronco Cremona – foce Mincio gli interventi sono quelli previsti nel progetto di AIPo, mentre per il tronco foce Mincio – Po di Goro gli interventi previsti sono quelli riportati nel par. 6.7); in particolare vengono elencati i tratti critici, ossia quelli per cui, in corrispondenza del valore di portata di riferimento (portata con durata media annua di 340 giorni/anno), si hanno tiranti idrici minori di 2.2 m per una larghezza dell'alveo di magra tale da impedire il transito di imbarcazioni della classe Va CEMT.

Nello specifico, con riferimento agli interventi di sistemazione a corrente libera, utilizzando come batimetria quella ottenuta con il modello bidimensionale dopo 2 anni di simulazione per il tronco Cremona – foce Mincio e dopo 10 anni di simulazione per il tronco foce Mincio – Po di Goro, i tratti

che presentano problemi per la navigazione sono localizzati a:

- Cremona, dal km 376 al km 378;
- Isola Pescaroli, nell'intorno del km 397 e 399;
- Roccabianca, nell'intorno del km 402 e 403;
- Coltaro, tra il km 414 e 415;
- Casalmaggiore, nell'intorno del km 423, 424 e 426;
- Viadana, nell'intorno del km 433 e dal km 438 al km 440;
- Correggioverde, nell'intorno del km 445;
- Luzzara, nell'intorno del km 452 e 457;
- a monte di foce Oglio;
- Borgoforte, nell'intorno del km 466 e 468;
- Villa Saviola, tra il km 476 e il km 477;
- San Giacomo Po, nell'intorno del km 481;
- Gorgo, nell'intorno del km 484 e tra il km 487 e il km 489;
- Correggio Micheli, a monte del km 493;
- Sustinente, tra il km 497 e il km 498;
- Quingentole, nell'intorno del km 500;
- Gaiba, tra il km 548 e il km 549;
- Stienta, tra il km 554 e il km 555;
- Pontelagoscuro, a monte del km 562;
- Alberone, nei pressi del km 587.

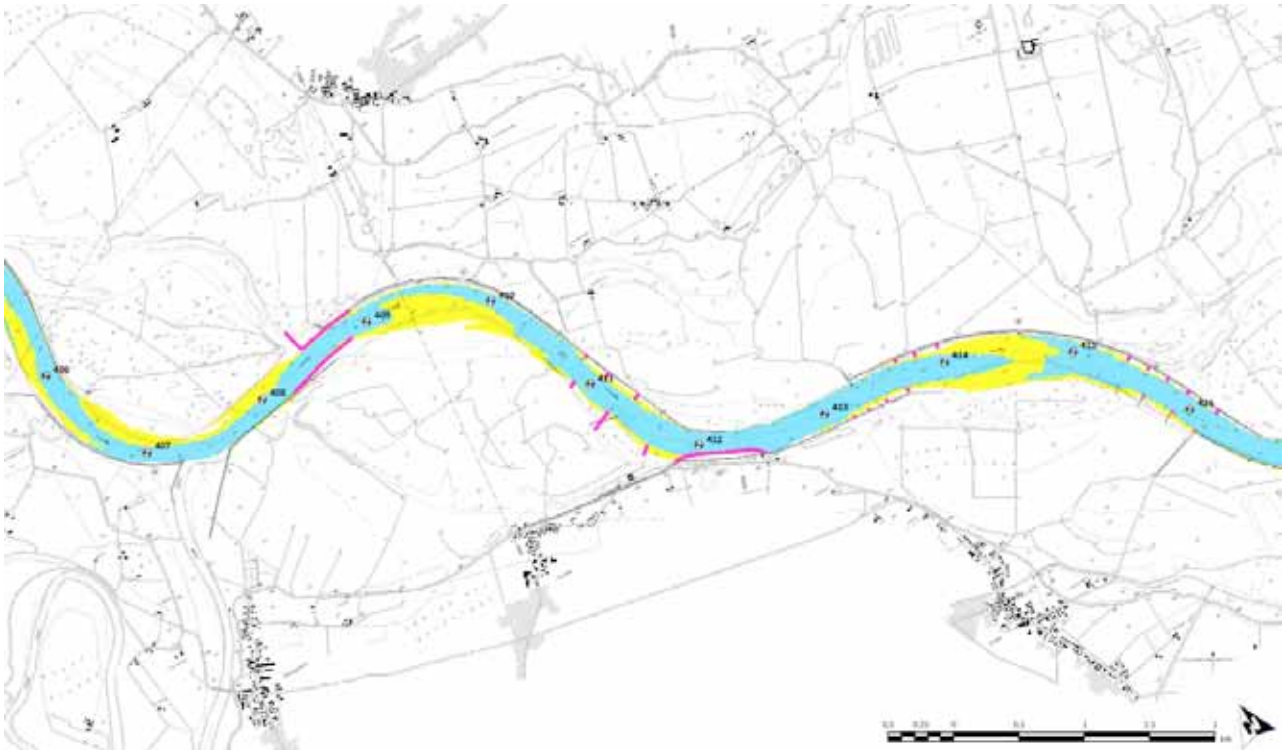


Figura 293 - Stralcio della cartografia riportata nell'Allegato 10.3 con rappresentati i tiranti in condizioni di magra (Q340gg) nei pressi di Torricella – interventi di sistemazione a corrente libera (in giallo le zone con tiranti inferiori a 2.2 m; in azzurro le zone con tiranti maggiori di 2.2 m)

L'entità dei punti critici per la navigazione nell'assetto di progetto con gli interventi di sistemazione a corrente libera si è ridotta rispetto all'assetto attuale, soprattutto nel tratto a valle di foce Mincio. Nel precedente paragrafo 9.7.3, al quale si rimanda per gli approfondimenti, sono state effettuate delle analisi per verificare se alcune delle insufficienze che permangono anche in seguito alla realizzazione degli interventi, in particolare nel tratto a valle di foce Mincio, siano stabili o temporanee.

I punti critici che sono rimasti possono essere risolti migliorando la configurazione delle opere previste, oppure prevedendo opportuni interventi di manutenzione periodica del fondo alveo, attraverso la movimentazione dei sedimenti mediante draghe.

Per fare un confronto tra le condizioni di navigabilità indotte dalle opere di sistemazione a corrente libera, si fa presente che mentre con le opere di regimazione i tiranti sono maggiori di 3.5 m per l'85% del tratto compreso tra Cremona e Stienta (quinta traversa), con gli interventi di sistemazione a corrente libera tale percentuale scende circa al 65%, con larghezze d'alveo caratterizzate da tiranti superiori a 3.5 m nettamente inferiori rispetto a quelle disponibili con le opere di regimazione.

10.3.4 Dinamica del talweg nelle sezioni con tiranti di navigazione critici

Le simulazioni effettuate hanno messo in evidenza alcune criticità che determinerebbero insufficienza dei tiranti, localizzate in precise zone lungo l'intero tratto studiato, ed in particolare situate:

per lo scenario di sistemazione a corrente libera alle p.k. 497.5, 555, 561.5, 587 (zone analizzate anche al capitolo precedente in termini di verifica delle sezioni con passo annuale);

per lo scenario di regimazione alle p.k. 433, 463.5, 508, ovvero presso le estremità di monte dei tratti rigurgitati dalle traverse 3, 4, 5.

In corrispondenza delle sezioni poste a tali progressive è stata fatta quindi un'analisi sull'andamento del talweg nel periodo decennale simulato, al fine di verificarne l'evoluzione anche rispetto all'istante considerato per le analisi a fondo fisso, descritte nel presente Capitolo, e utilizzato per la redazione delle mappe di cui agli allegati 9.1 e 9.2.

La Figura 294 e la Figura 295 riportano i risultati delle simulazioni del modello a fondo mobile nello scenario di sistemazione a corrente libera in termini di andamento temporale del talweg nei punti critici (km 497.5, 555, 561.5, 587) e curva di durata del talweg negli stessi punti, con indicazione dell'instante di mappatura utilizzato per le verifiche con modello a fondo fisso.

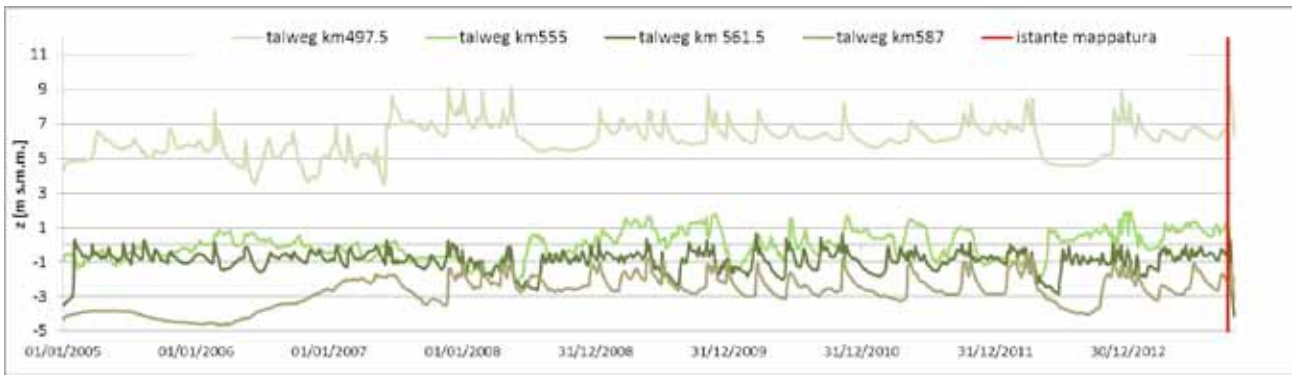


Figura 294 – Risultati simulazioni modello a fondo mobile, scenario sistemazione a corrente libera: andamento del talweg nei punti critici (km 497.5, 555, 561.5, 587) e indicazione dell'instante di mappatura utilizzato per le verifiche con modello a fondo fisso.

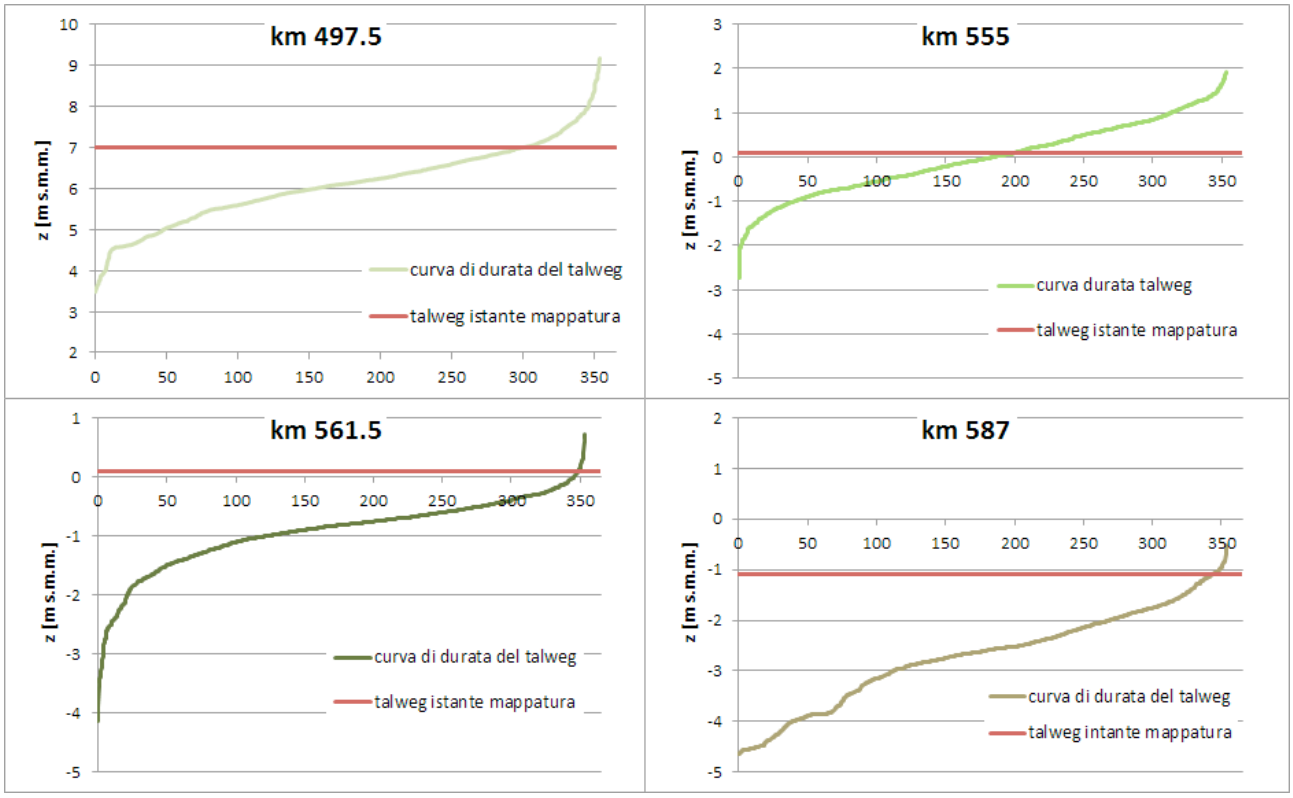


Figura 295 – Risultati simulazioni modello a fondo mobile, scenario sistemazione a corrente libera: curva di durata del talweg nei punti critici (km 497.5, 555, 561.5, 587) e indicazione della quota del talweg all'instante di mappatura utilizzato per le verifiche con modello a fondo fisso.

Dalle curve di Figura 294 e Figura 295 si può osservare che:

- in tutti i punti esaminati il modello mostra una tendenza al deposito, soprattutto alle p.k. 497.5 e 587, dove l'allargamento delle sezioni è più consistente e meno contrastato dalle opere di sistemazione;
- la quota del talweg all'istante di mappatura (istante in cui sono stati estrapolate le batimetrie utilizzate per le simulazioni a fondo fisso) al km 497.5 è maggiore rispetto all'intera serie decennale, ma tuttavia appare piuttosto stabile rispetto all'ultimo quinquennio;
- al km 555 la quota del talweg all'istante di mappatura è leggermente più alta rispetto alla serie decennale, ma si osserva che l'evento di piena a fine serie (piena verificatasi nel novembre 2014) riporta ad una situazione ancora più favorevole che ad inizio simulazione;
- al km 561.5 la quota del talweg all'istante di mappatura è maggiore rispetto all'intera serie decennale, ma appare piuttosto stabile nell'ultimo biennio;
- al km 587 la quota del talweg all'istante di mappatura è maggiore rispetto all'intera serie decennale: si osserva, dall'analisi dell'andamento del talweg nei primi anni simulati, come in questa sezione, dove si ha un allargamento dell'alveo rispetto ai tratti immediatamente a monte e a valle, il modello tenda al deposito;
- in tutti i casi si osserva l'effetto della piena di fine serie (novembre 2014) che tende ad abbassare il fondo in maniera consistente, e soprattutto al km 555 e al km 561.5.

La stessa analisi relativa all'andamento del talweg nel periodo decennale simulato è riportata in Figura 296 e Figura 297 per quanto riguarda i punti critici relativi allo scenario di regimazione, situati alle estremità di monte dei tratti rigurgitati dalle traverse 3, 4, 5.



Figura 296 – Risultati simulazioni modello a fondo mobile, scenario regimazione: andamento del talweg nei punti critici (km 433, 463.5, 508) e indicazione dell'instante di mappatura utilizzato per le verifiche con modello a fondo fisso.

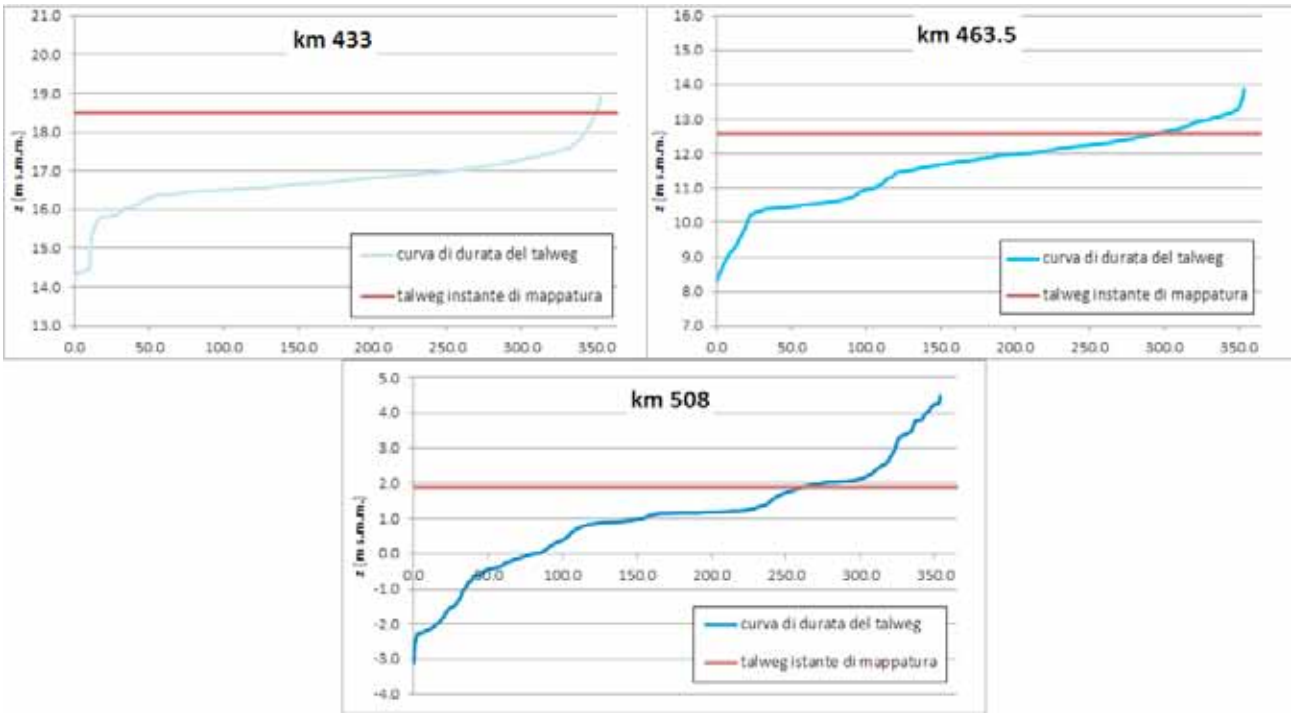


Figura 297 – Risultati simulazioni modello a fondo mobile, scenario regimazione: curva di durata del talweg nei punti critici (km 433, 463.5, 508) e indicazione della quota del talweg all'instante di mappatura utilizzato per le verifiche con modello a fondo fisso.

Dalle curve di Figura 296 e Figura 297 si può osservare che:

- nei tre punti esaminati il modello mostra una tendenza al deposito che pare quasi esaurirsi nei primi tre anni;
- all'istante di mappatura (istante in cui sono stati estrapolate le batimetrie utilizzate per le simulazioni a fondo fisso) il talweg a p.k. 433 e a p.k. 463.5 si trova ad una quota superiore alla quota media del decennio ma piuttosto stabile facendo riferimento agli ultimi anni di simulazione;
- a p.k.508 si osservano maggiori escursioni del talweg, dovute all'effetto della posizione in curva, che comporta maggiori erosioni in occasione delle piene;

l'effetto della piena di fine serie (novembre 2014) tende ad abbassare il fondo in maniera apprezzabile a p.k.508.

L'analisi qui descritta mette in evidenza che le criticità che emergono dall'applicazione dei modelli sono parte della dinamica evolutiva del corso d'acqua e appaiono del tutto correggibili con interventi di manutenzione o integrando le opere di sistemazione previste dal presente studio.

10.3.5 Conclusioni

Dall'analisi dei risultati delle analisi modellistiche, effettuate mediante modello bidimensionale a fondo fisso con l'utilizzo delle batimetrie ricavate dal modello bidimensionale a fondo mobile, si evince che gli interventi di regimazione inducono migliori condizioni di navigabilità rispetto agli interventi di sistemazione a corrente libera.

L'assetto di progetto con le opere di regimazione consente di rendere il fiume Po navigabile per navigli di Classe Va CEMT per 365 giorni all'anno per il tratto Cremona – Stienta, mentre a valle dell'ultima traversa il fiume, da sistemare mediante interventi a corrente libera le condizioni di navigabilità sono garantite per una durata media annua di 340 giorni.

L'assetto di progetto che prevede la sistemazione a corrente libera dell'intero tratto di Po compreso tra Cremona e l'incile del Po di Goro consente di raggiungere condizioni di navigabilità per la Classe Va CEMT per una durata media annua di 340 giorni.

Di seguito si riporta, nella Tabella 101, una sintesi dei risultati ottenuti che mette in evidenza, lungo la progressiva, le condizioni di navigabilità per i tre scenari considerati (attuale, regimazione, corrente libera); in particolare:

in colore verde sono indicati i tratti caratterizzati da tiranti maggiori di 2,2 m per una larghezza d'alveo adeguata al transito di più navigli (maggiore di 100 m);

in colore giallo sono indicati i tratti caratterizzati da tiranti maggiori di 2,2 m ma con presenza di zone in cui la larghezza d'alveo non è del tutto adeguata al transito di più navigli (minore 100 m);

in colore rosso, infine, sono indicati i tratti caratterizzati da zone con tiranti minori di 2,2 m per tutta la larghezza dell'alveo navigabile.

Sempre nella Tabella 101, in colore blu sono indicate le posizioni delle traverse di regimazione.

progressiva	attuale	regimazione	corrente libera	progressiva	attuale	regimazione	corrente libera
380				495			
385				500			
390				505			
395				510			
400				515			
405				520			
410				525			
415				530			
420				535			
425				540			
430				545			
435				550			
440				555			
445				560			
450				565			
455				570			
460				575			
465				580			
470				585			
475				590			
480				595			
485				600			
490				603			

Tabella 101 – Sintesi delle condizioni di navigabilità per i tre scenari considerati: attuale, regimazione, corrente libera

Dalla tabella si evince in sintesi che:

lo scenario progettuale di sistemazione a corrente libera presenta due diversi comportamenti rispettivamente nel tratto da Cremona a foce Mincio (già quasi completamente dotato delle opere a corrente libera da tempo realizzate) e nel tratto da foce Mincio al Po di Goro (ove sono previste le opere in progetto descritte nel presente studio). Nel primo tratto si evidenziano ancora i punti critici prima elencati, mentre nel secondo tratto le opere in progetto appaiono estesamente risolutive, salvo pochi punti critici.

lo scenario progettuale della regimazione conduce a risolvere quasi integralmente, salvo nei tre tratti ove si esaurisce il profilo di rigurgito creato dalle traverse 3, 4 , 5, i punti critici per la navigazione lungo tutto il tratto regimato fino alla traversa 5; nel tratto a valle della traversa 5 fino al Po di Goro, ove non sono previste traverse di sostegno, resterebbero le medesime criticità dello stato attuale ove non intervenisse, come è invece previsto, la sistemazione a corrente libera.

Le analisi condotte hanno peraltro messo in evidenza che i suddetti punti critici possono essere risolti attraverso la configurazione di ulteriori interventi di sistemazione a corrente libera, o attraverso l'adeguamento degli interventi già previsti, oppure attraverso interventi di manutenzione mediante movimentazione dei sedimenti con draghe.

11 SPECIFICHE MODELLI FISICI DEL FIUME PO IN RELAZIONE AI DI REGIMAZIONE E DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA

11.1 PREMESSA

Nel presente capitolo sono descritte le specifiche relative alla realizzazione di modelli fisici a supporto dell'analisi del comportamento morfologico del corso d'acqua e della sicurezza idraulica conseguenti la realizzazione delle opere previste.

Complessivamente lo studio fin qui condotto ha riguardato i due approcci: la regimazione e la sistemazione a corrente libera ai fini della navigabilità del Po. In entrambi i casi la necessità di analisi modellistiche (su modello fisico) appaiono indifferibili per la corretta valutazione dei diversi aspetti conseguenti la realizzazione delle opere, e quindi a supporto della progettazione degli interventi, qualunque essi siano.

Nel caso della sistemazione a corrente libera, mediante realizzazione di opere di contenimento dell'alveo di magra (e.g. pennelli), i principali aspetti da indagare sono:

- geometria dei pennelli in riferimento agli effetti sul campo di moto e sulla corretta funzionalità delle opere in riferimento ai parametri di navigazione richiesti (sezione bagnata, tirante, caratteristiche del campo idrodinamico) in occasione delle portate di magra di riferimento;
- la stabilità delle opere particolarmente nei riguardi degli episodi di piena;
- effetti sulle piene indotti dalla presenza delle opere;
- valutazione degli effetti di scavo localizzato (e.g. testa dei pennelli) e dimensionamento delle protezioni;
- valutazione della dinamica attesa per l'interrimento a tergo delle opere;
- configurazione a regime del tratto oggetto di sistemazione con particolare riferimento ai bilanci sedimentari ed alle dinamiche evolutive del corso d'acqua;

Nel caso delle opere di regimazione previste (i.e. traverse) i principali aspetti che dovranno essere studiati mediante la modellazione fisica riguardano:

- effetti delle opere sul campo idrodinamico in occasione delle piene eccezionali a garanzia della sicurezza idraulica;
- valutazione del corretto dimensionamento della vasca di dissipazione a valle della traversa
- valutazione degli effetti di scavo localizzato e dimensionamento delle protezioni;
- effetti delle opere in considerazione della regola di gestione degli sbarramenti sulla morfologia d'alveo e valutazione della configurazione d'alveo attesa a regime;
- geometria del mandracchio in riferimento ai fenomeni di trasporto solido in prossimità dell'imbocco dell'opera.

Nell'ambito della sistemazione a corrente libera, lo studio ha considerato quanto proposto nel progetto "Adeguamento delle condizioni di navigabilità dell'alveo di magra del fiume Po per navi di V classe – Revere-Ferrara" predisposto da AIPo per la sistemazione di alcuni tratti critici a valle di foce Mincio fino all'incile del Po di Goro (progr. Km 495-595 per una lunghezza complessiva di circa 100 km). I criteri di individuazione degli interventi sono ispirati:

- al mantenimento di un tirante minimo di 2,00+0,20=2,20 m per una durata media di 340 giorni/anno;
- a garantire il tirante minimo di 2,00 m con una portata a Pontelagoscuro pari a 350 m3/s;

- a garantire un tirante di 2,80 m per una durata di 340 giorni/anno (portate variabili lungo il corso d'acqua).

Complessivamente nel presente studio sono stati individuati 33,5 km di opere longitudinali di difesa spondale, 23 km circa di pennelli trasversali e 2,5 km di opere esistenti da demolire per un totale di circa 59 km tra nuove opere ed interventi di demolizione.

Confrontando tale previsione per il tratto a valle di foce Mincio con quelle realizzate o previste dal progetto definitivo di AIPo per la sistemazione del tronco Cremona-Foce Mincio (lungo circa 125 km), emerge una sostanziale equivalenza in termini di incidenza media delle opere sui due tratti.

Le ipotesi di sistemazione a corrente libera sono state suffragate da modellazioni matematiche bidimensionali sui tre tratti Mincio-Sermide, Sermide-Pontelagoscuro, Pontelagoscuro Po di Goro al fine di verificare gli obiettivi suddetti. Le condizioni al contorno di monte e di vale nei tratti riguardano rispettivamente valori di portata e di livello. Le prime sono fissate in ragione di durate pari a 340 gg/anno e 300 gg/anno nonché del valore di portata minima a Pontelagoscuro pari a 350 m3/s; i secondi sono dedotti dalle scale di deflusso a Sermide e Pontelagoscuro, mentre all'incile del Po di Goro si assume convenzionalmente il valore 0,0 m s.m.

Nella Tabella 102 sono riportate le condizioni al contorno definite come sopra, mentre per i dettagli delle simulazioni si rimanda al capitolo ad essi dedicato nell'ambito della presente relazione.

Tratto	*Durata 340 gg/anno*	*Durata 300 gg/anno*	*Portata min. obiettivo*
Mincio-Sermide	530 m3/s 5.91 m s.m.	725 m3/s 6.39 m s.m.	350 m3/s 5.41 m s.m.
Sermide-Pontelagoscuro	530 m3/s 1.92 m s.m.	725 m3/s 2.37 m s.m.	350 m3/s 1.41 m s.m.
Pontelagoscuro-Po di Goro	530 m3/s 0.00 m s.m.	725 m3/s 0.00 m s.m.	350 m3/s 0.00 m s.m.

Tabella 102 - Condizioni al contorno per le simulazioni 2-D di verifica dell'assetto di sistemazione a corrente libera

Il presente studio, nell'ambito della regimazione del corso d'acqua, ha considerato complessivamente cinque sbarramenti precedentemente descritti (ottimizzando sia la loro localizzazione che i criteri di regolazione già previsti nello studio di fattibilità redatto nel 2009). In particolare è stata fissata una regola di gestione che prevede il sostegno dei livelli idrici (mediante sbarramento trasversale dell'alveo attivo con paratoie mobili) fino a portate di 1200 m3/s, consentendo invece il transito delle portate in condizioni di trasparenza idraulica (i.e. paratoie completamente sollevate) per portate superiori a tale limite.

Nella Tabella 103 si riportano i dati caratteristici per gli sbarramenti mobili considerati nell'assetto proposto nel presente studio.

Descrizione	*Traversa 1*	*Traversa 2*	*Traversa 3*	*Traversa 4*	*Traversa 5*
Quota di ritenuta (m s.m.)	30,0	24,2	19,0	14,2	7,5
Quota della piena PAI (m s.m.)	34,9	31,5	27,3	22,4	15,7
Quota di magra (Q=500 m3/s) (m s.m.)	24,8	19,7	14,7	9,2	2,6
Quota della soglia della traversa (m s.m.)	19,0	15,0	9,0	3,0	0
Quota della vasca di dissipazione (m s.m.)	15,2	11,2	5,2	-0,8	-3,8
Quota della sommità delle paratoie (m s.m.)	31,0	25,2	20,0	15,2	8,5
Quota del piazzale di servizio (m s.m.)	35,9	32,5	28,3	23,4	16,7
Quota di coronamento della traversa (m s.m.)	40,5	37,0	33,0	28,0	21,5
Lunghezza traversa (m)	203	260	203	260	345
N. luci	7	9	7	9	12
Quota della soglia della conca a monte (m s.m.)	26,0	20,0	15,0	10,0	3,5
Quota della soglia della conca a valle (m s.m.)	20,0	15,0	10,0	5,0	-1,5

Tabella 103 - Dati caratteristici degli sbarramenti mobili

L'assetto proposto è stato verificato in condizioni di massima piena di riferimento (i.e. PAI-Tr200) mediante

modellazione 2-D a fondo fisso in moto stazionario anche al fine di verificare le condizioni di sicurezza idraulica. A tal fine sono stati considerati 5 tratti in corrispondenza dei quali le condizioni al contorno di monte e di valle sono state fissate rispettivamente in ragione della citata portata di riferimento e della scala di deflusso ricostruita sulla sezione di valle del tratto. Per i dettagli si rimanda al capitolo 7.

Si è ritenuto significativo e coerente con lo spirito dello studio nel suo complesso, delineare le specifiche della modellazione fisica considerando le peculiarità caratteristiche del sistema oggetto di indagine, piuttosto che definire compiutamente il progetto dei modelli fisici in corrispondenza di ciascuna opera considerata.

Ciò non ostante, a favore di chiarezza, si è preso in esame nello specifico il tronco fluviale in corrispondenza della risvolta Revere-Ostiglia ritenuto significativamente rappresentativo degli interventi di sistemazione a corrente libera; in riferimento all'ipotesi di regimazione è stato considerato il tratto in corrispondenza della prima traversa presso Roccabianca-Motta Baluffi, al fine di contestualizzare il metodo proposto nel caso di una delle opere di sistemazione a corrente libera e nel caso di una opera di regimazione, che evidenziano problematiche significative nei riguardi della modellazione fisica.

11.2 PROBLEMATICHE E CARATTERISTICHE GENERALI DELLE SPECIFICHE PER LA MODELLAZIONE FISICA NEL CONTESTO

Le opere qui considerate (regimazione e sistemazione a corrente libera nel loro complesso) si estendono dalla progressiva 401 km circa (traversa n.1 di Roccabianca-Motta Baluffi) fino all'incile del Po di Goro. La presenza degli argini golenali e la distanza reciproca degli argini maestri è molto variabile lungo l'asta, così come le caratteristiche sedimentologiche dell'alveo inciso, restituendo quindi condizioni anche significativamente differenziate sotto il profilo degli effetti sulla modellazione fisica.

Per le portate più elevate (tra queste la portata di riferimento PAI Tr200 per le verifiche di sicurezza idraulica) i volumi d'acqua impegnano l'alveo attivo e gli alvei golenali, estendendosi fino al limite degli argini maestri. In tali situazioni è opportuno distinguere nel modello fisico l'alveo attivo (a fondo mobile) rispetto alle aree golenali (a fondo fisso). Il primo, sede dei fenomeni di trasporto solido, si modella in relazione all'assetto idrodinamico imposto restituendo una resistenza al moto complessiva somma della resistenza dei grani e della resistenza offerta dalle forme di fondo (oltre a quella associata a singolarità geometriche e curvature del campo di moto). Viceversa le aree golenali dovranno essere rese artificialmente scabre con l'impiego di elementi protrusi la cui dimensione, disposizione e densità dovrà essere oggetto di taratura nella fase preliminare delle prove.

La necessità di limitare gli ingombri fisici del modello, e la necessità di rappresentare correttamente i fenomeni sedimentari, può comportare in alcuni casi il ricorso a scale geometriche distorte (una modesta distorsione delle scale orizzontali e verticali non inficia i risultati Huges, 1993). D'altra parte i modelli dovranno ispirarsi da una parte al criterio di similitudine di Froude (per le ondulazioni di superficie), e dall'altra al criterio di similitudine morfodinamico (per i fenomeni di trasporto solido). L'insieme di queste evenienze tipicamente conduce all'impiego di modelli fisici basculati caratterizzati da pendenze motrici differenti nel prototipo e nel modello.

La necessità di valutare gli effetti delle opere sui bilanci sedimentari e sulla morfodinamica d'alveo, costringe alla modellazione di una serie di portate significative estesa ad un periodo temporale rappresentativo. Sotto questo profilo si impone una attenzione particolare nei riguardi della comparazione tra i flussi sedimentari nel prototipo e nel modello. Le differenti portate dei solidi in sospensione che tipicamente si verificano nel prototipo e nel modello, indicheranno il coefficiente correttivo da applicare al fattore di scala cinematico per la definizione della durata delle prove.

In ogni caso la modellazione fisica dovrà essere preceduta da misure di campo (da effettuarsi preferibilmente in condizioni prossime alla portata di alveo attivo pieno) e da una modellazione numerica 2-D.

In particolare la campagna di misure di campo dovrà essere finalizzata a:

- Caratterizzazione litologica dei sedimenti costituenti il materasso alluvionale riferita a profondità coerenti con i processi erosivi e morfologici previsti;

- caratterizzazione geometrico-batimetrica del prototipo;
- caratterizzazione delle ondulazioni di fondo;
- misura del trasporto solido in sospensione;
- misura del campo di velocità su sezioni rappresentative del tratto di indagine.

Tali misure saranno a supporto della costruzione e della taratura del modello fisico.

La modellazione idrodinamica 2-D di tipo numerico (opportunamente tarata sul prototipo) fornirà indicazioni utili alla identificazione preliminare delle principali caratteristiche del campo di moto nel tronco oggetto di modellazione ed a trarre gli elementi necessari alla definizione del modello fisico.

11.3 LE PROVE PRELIMINARI E LE MISURE

11.3.1 Prove preliminari

Preliminarmente alla effettuazione delle prove sul modello, è necessario condurre test sperimentali finalizzati a caratterizzare compiutamente il regime di mobilità dei sedimenti utilizzati nel modello a confronto con quello del prototipo, in riferimento alle diverse intensità di corrente che saranno testate sul modello, anche per ottenere utili indicazioni circa il comportamento morfodinamico del modello in termini di trasporto solido, sviluppo delle forme di fondo (che hanno anche effetto sulle resistenze al moto complessive).

Analogamente occorrerà predisporre i dispositivi all'imbocco ed allo sbocco del modello e misurare preliminarmente i loro effetti sulla generazione del campo di moto idrodinamico (distribuzione delle portate in ingresso) e sulla piezometrica imposta a valle.

Prima della effettuazione dei test programmati sul modello, occorre misurare l'effettivo trasporto solido sul modello e confrontarlo con quello campionato e/o ricostruito sul prototipo al fine di valutare il coefficiente correttivo del fattore di scala cinematico da utilizzarsi nella definizione della durata delle prove.

11.3.2 Misure di livello

Durante le prove dovranno essere effettuate misure di livello idrico (tipicamente con sonde ad ultrasuoni) alla sezione di valle, al fine di impostare correttamente la condizione al contorno. Inoltre saranno controllati i livelli anche su sezioni caratteristiche lungo il modello al fine di misurare la effettiva pendenza motrice durante le prove. Le misure di livello dovranno anche restituire gli eventuali effetti di sovralzo indotti dalle opere.

11.3.3 Misure di portata liquida e di concentrazione dei sedimenti trasportati

Il sistema sarà dotato di impianto con ricircolo di acqua e sedimenti. Lungo le tubazioni di mandata dovranno essere installati misuratori di portata (tipicamente misuratori magnetici di portata) al fine di controllare la portata liquida immessa nel sistema.

Lungo le tubazioni di mandata dovranno essere alloggiati opportune sezioni di controllo e spillamento per la misura della concentrazione dei solidi trasportati, al fine di misurare l'evoluzione temporale del trasporto solido durante le prove.

La misura della concentrazione del solido trasportato sarà confrontata con quella del prototipo. In presenza di (inevitabili) scarti tra la concentrazione del prototipo e quella del modello, dovrà essere valutato un opportuno coefficiente di correzione al fattore di scala cinematico, da applicare alle diverse condizioni idrauliche di prova al fine di garantire la corretta riproduzione in termine di volumi solidi complessivi durante le prove.

A monte dovrà essere garantita una distribuzione delle portate liquide e solide congruente con quella del prototipo, applicando sulla sezione di monte del modello un opportuno sistema di distribuzione.

11.3.4 Misure di velocità

Dovranno essere misurati i campi di velocità in punti caratteristici e rappresentativi del modello (e.g. in prossimità dell'imbocco alle aree di stazionamento ed approccio alla conca). A tal fine potranno essere utilmente impiegate, ad esempio, microsonde acustiche capaci di restituire il

campo vettoriale tridimensionale delle velocità.

L'utilizzo delle microsonde permette di risalire al campo vettoriale delle velocità medie ed al tempo stesso fornisce l'ampiezza delle oscillazioni di velocità attorno al valor medio sono indicativi dello stato di turbolenza. Pertanto è possibile ricavare il tensore di Reynolds e i relativi autovalori ed autovettori che identificano il modulo e il verso delle tensioni principali di Reynolds, ossia l'intensità e le direzioni caratteristiche della turbolenza che potranno essere utilizzate per risalire al campo vettoriale delle tensioni responsabili anche della movimentazione del fondo.

11.3.5 Rilievo batimetrico

La configurazione del fondo dovrà essere misurata ad inizio e fine di ciascuna prova. Tipicamente potranno essere utilizzati misuratori laser montati su un sistema mobile in grado di traslare lungo il modello catturando le quote nei punti significativi. I risultati potranno indicare le zone di sedimentazione ed erosione in riferimento alla funzionalità e stabilità delle opere.

11.4 TRAVERSA 1. ROCCABIANCA - MOTTA BALUFFI

11.4.1 Il contesto e l'opera

L'opera (progr. km 401.000) si colloca poco a monte della confluenza del Taro. In questo tratto l'alveo è monocursale sinuoso, incassato in depositi prevalentemente sabbiosi da fini a molto fini, limosi, costituenti le sponde incise. Le barre sono costituite prevalentemente da sabbie. Si riscontra un generale stato di erosione in alveo e la presenza di un "substrato" sabbioso – ghiaioso nell'alveo di magra sommerso. Nonostante la litologia prevalente nelle forme di fondo sia data da sabbie, le barre sono caratterizzate da altezza relativamente elevata e fronti inclinati.

La traversa si imposta in prossimità dell'estremo di valle (circa in corrispondenza della sez.30A) di un lungo tratto rettilineo di circa 4.4 km, che ha origine in corrispondenza del ponte G. Verdi della SP33, caratterizzato da una larghezza dell'alveo attivo pari a circa 350 m. Il corso d'acqua procede a valle del tratto rettilineo con una doppia curva. In uscita dal tratto rettilineo è presente una doppia protezione di sponda lineare (in dx e poi in sx) che consolida il tracciato planimetrico del corso d'acqua. La fascia ricompresa tra gli argini maestri nel prototipo ha una larghezza variabile tra 4.5 e 6.0 km circa. Nel tratto sono presenti anche argini golenali che individuano importanti aree golenali.

In Figura 298 e Figura 299 è riportata la corografia del corso d'acqua e l'ubicazione planimetrica delle sezioni trasversali.

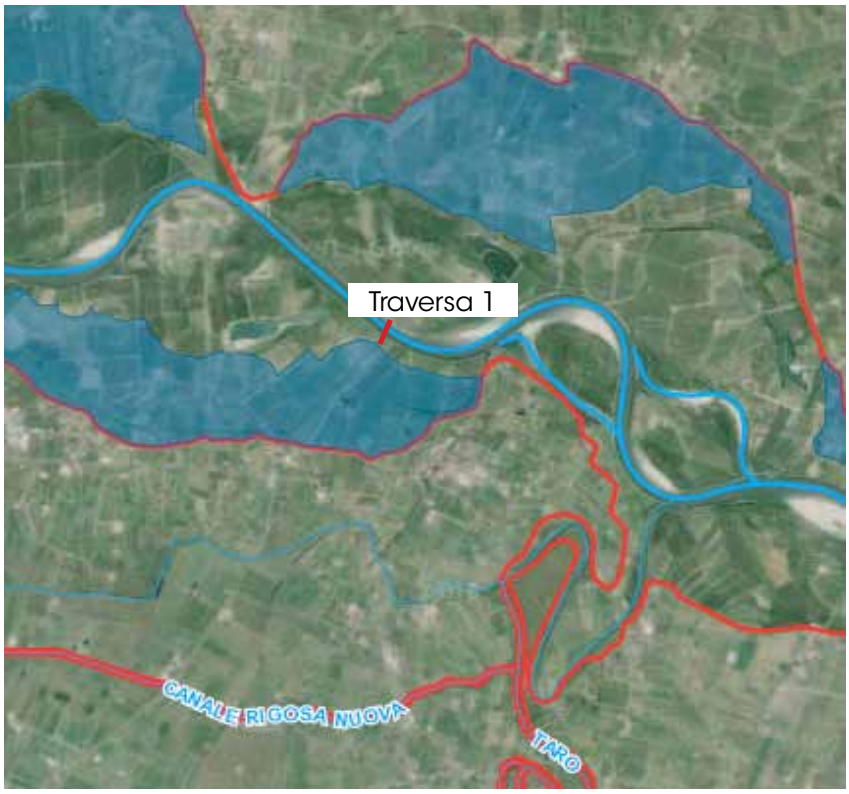


Figura 298 - Corografia del tratto di Po in corrispondenza della traversa 1-Roccabianca. Evidenziate le linee di arginatura maestre e le aree golenali

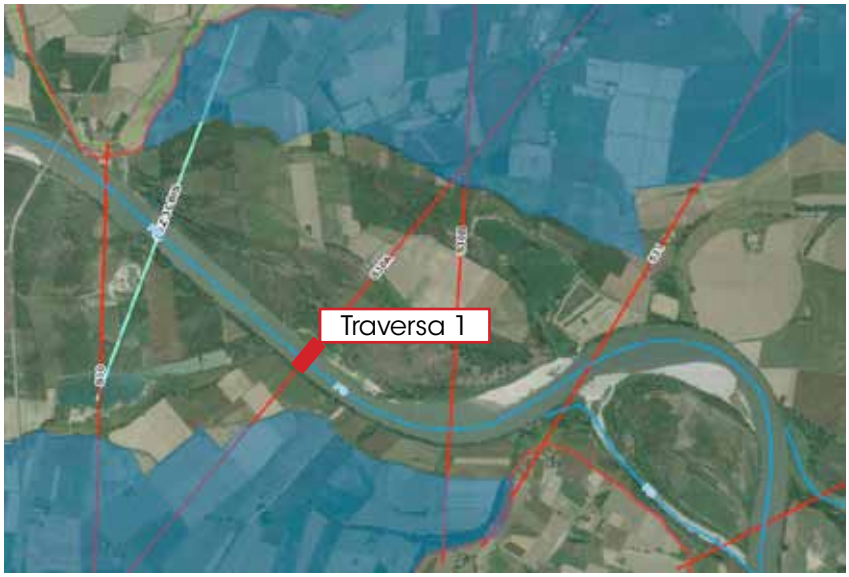


Figura 299 - Planimetria del Po in prossimità della traversa 1-Roccabianca. Indicate le sezioni trasversali di rilievo (2005), il perimetro degli argini maestri e le aree golenali

Le opere considerate comprendono la traversa, che occupa per intero l'alveo di magra, e la conca realizzata in affiancamento in sponda destra, comprensiva delle aree di approccio e stazionamento. La conca ha una lunghezza utile di 110.00 m e larghezza utile 12.50 m. In destra idraulica, tra la traversa e l'adiacente area di servizio, è posta la scala di risalita per la fauna ittica.

La Figura 300 riporta lo schema corografico dell'opera, la Figura 301 lo schema della sezione

trasversale della traversa, mentre nella successiva Figura 302 si riporta lo schema planimetrico della traversa e della conca di navigazione. Di seguito le principali grandezze caratteristiche per il dimensionamento del modello:

- Magra Q=500 m3/s zw=21.5 m s.m.
- Regolazione Q=1200 m3/s zw=31.00 m s.m.
- Piena PAI-Tr200 Q=14300 m3/s zw=34.80 m s.m.
- Quota fondo alveo zf=19.00 m s.m.
- Quota fondo vasca dissipazione zfv=15.25 m s.m.
- Quota estradosso impalcato zi=40.50 m s.m.
- Lunghezza max platea Lp=57.00 m s.m.
- Lunghezza max delle aree di approccio-stazionamento L=534.00 m
- Larghezza massima di ingombro trasversale conca-traversa 280.00 m

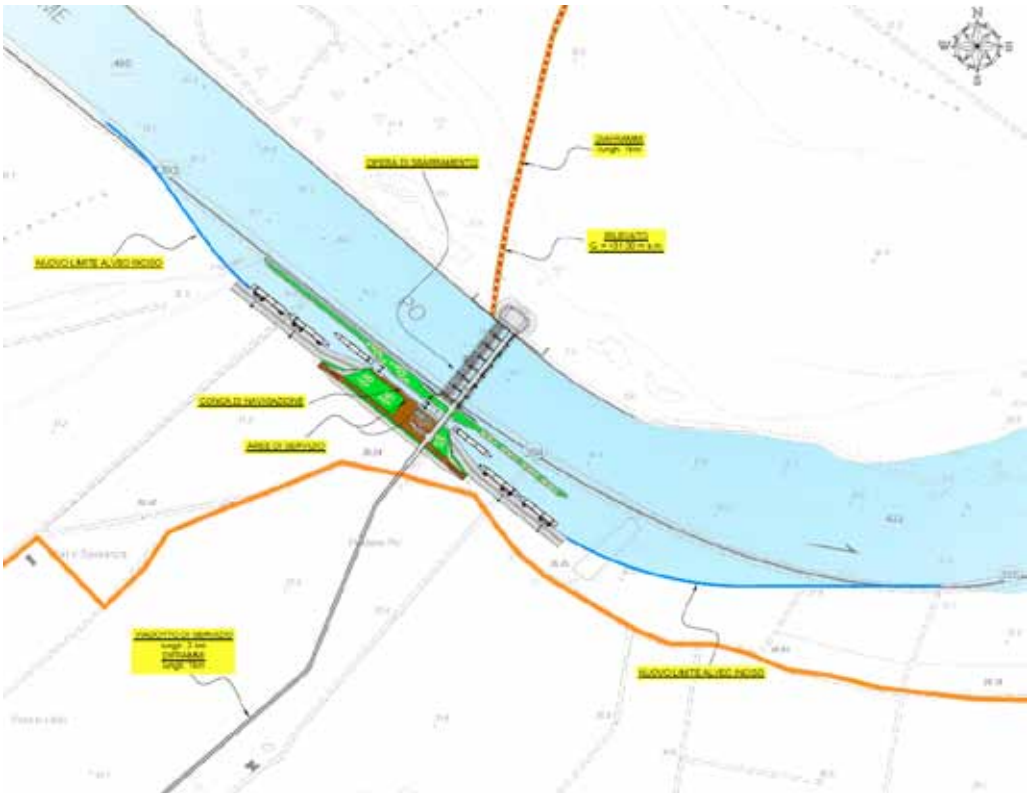


Figura 300 - Traversa 1, Roccabianca Motta-Baluffi.

Schema planimetrico della traversa e della conca

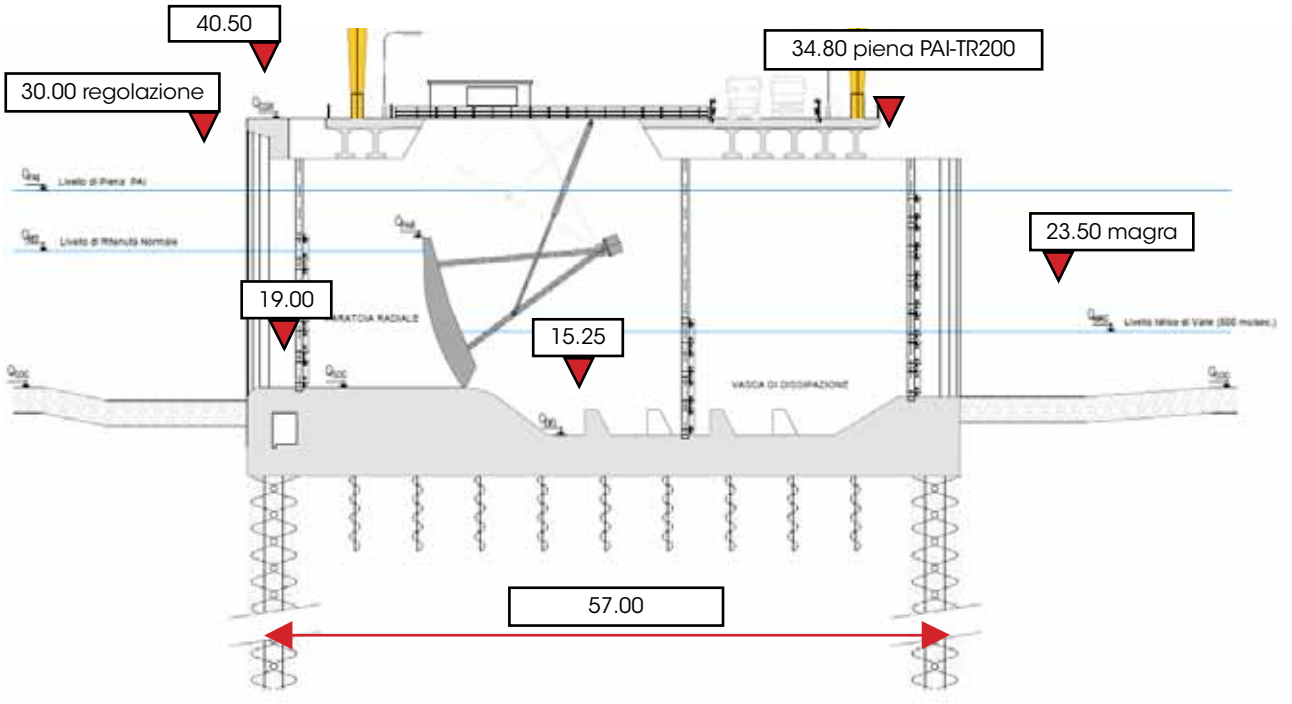


Figura 301 - Traversa 1-Roccabianca.
Schema della sezione trasversale della traversa

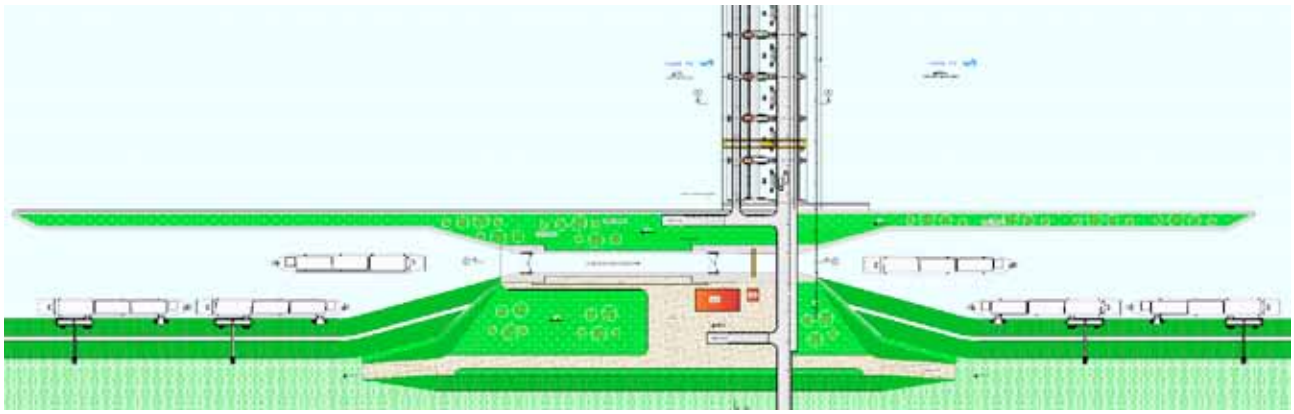
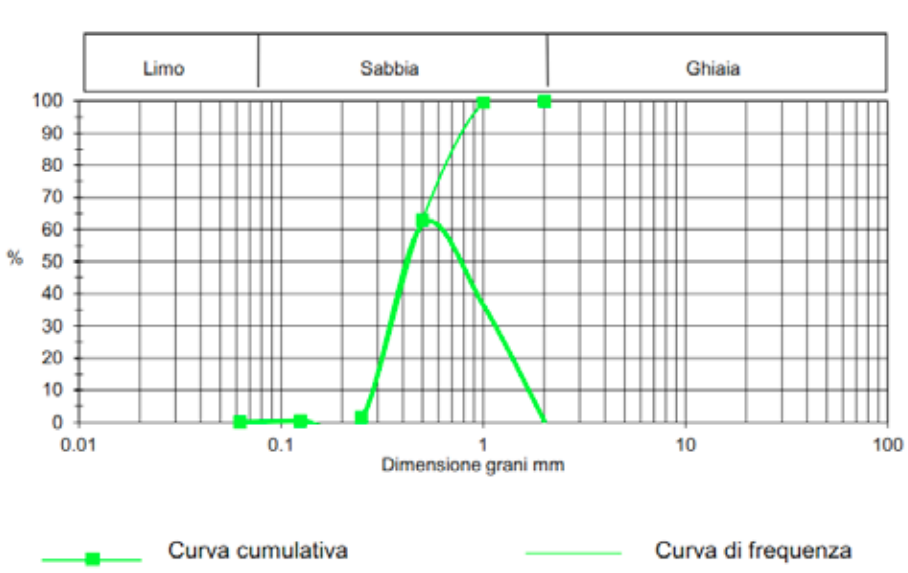


Figura 302 - Traversa 1-Roccabianca.
Schema planimetrico della traversa e della conca di navigazione

11.4.2 I rilievi

Durante il presente studio sono state effettuate campagne di rilievo sedimentologico in corrispondenza della sez.30. La Figura 303 riporta la curva granulometrica riferita al campione (superficiale) prelevato in alveo.

Il campione rivela la presenza di sabbie da molto fini a molto grossolane con un rapporto di presenza di ghiaie riferito alle sabbie inferiore al 5%. La curva probabilistica (Figura 304) mostra punti di troncatura in corrispondenza dei valori di 1.000, 0.250 e 0.125 mm.



D_{84}	D_{50}	D_{16}	D_5
0.70	0.42	0.29	0.27

Figura 303 - Sez30. Curva granulometrica del campione d'alveo attivo effettuato in occasione del presente studio (campione TE/S30/A/2)

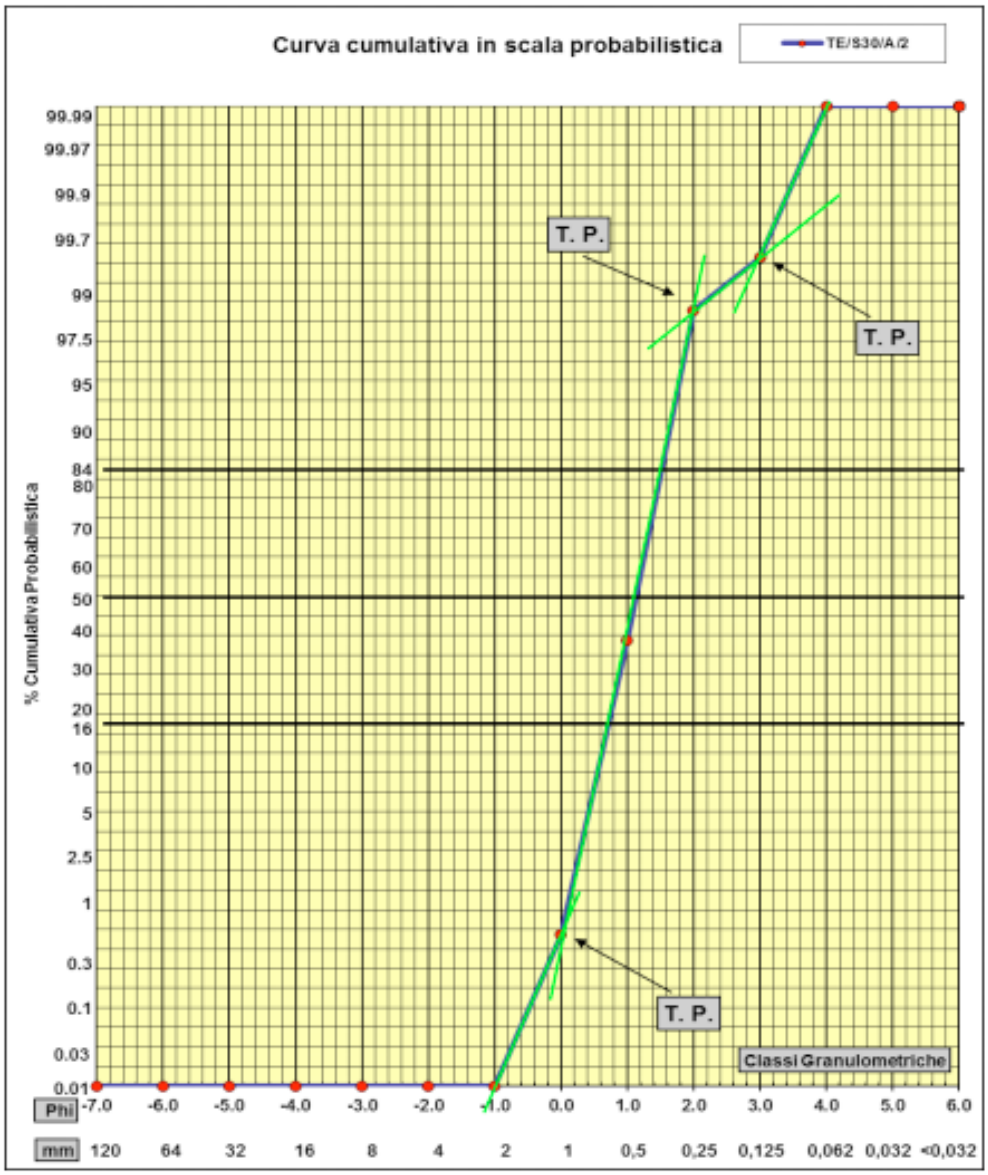


Figura 304 - Punti di troncatura sulla curva granulometrica del campione d'alveo attivo effettuato in occasione del presente studio (campione TE/S30/A/2)

I campioni (superficiali) prelevati sulla barra emersa, confermano la presenza di depositi sabbiosi caratterizzati da distribuzione granulometrica sostanzialmente coincidente con quella rilevata nel campione d'alveo.

Quest'ultimo è considerato rappresentativo del materiale dell'alveo attivo su tutto il tratto da modellare.

La batimetria del prototipo è stata ricostruita sulla scorta del DTM dell'anno 2005. Nelle successive Figura 305 ÷ Figura 308 sono riportate le sezioni trasversali rilevate nel 2005 in prossimità della localizzazione della traversa.



Figura 305 - Sezioni trasversali-rilievo 2005 – prog. km 399.199

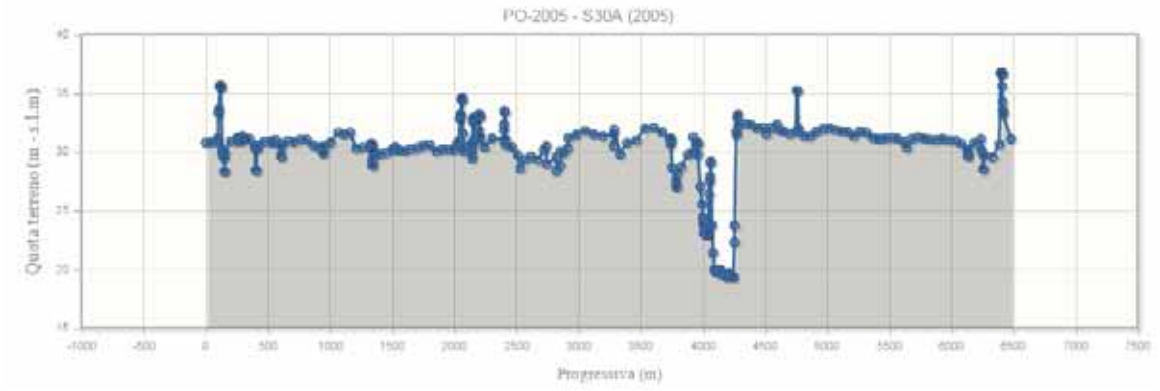


Figura 306 - Sezioni trasversali-rilievo 2005 prog. km 401.198

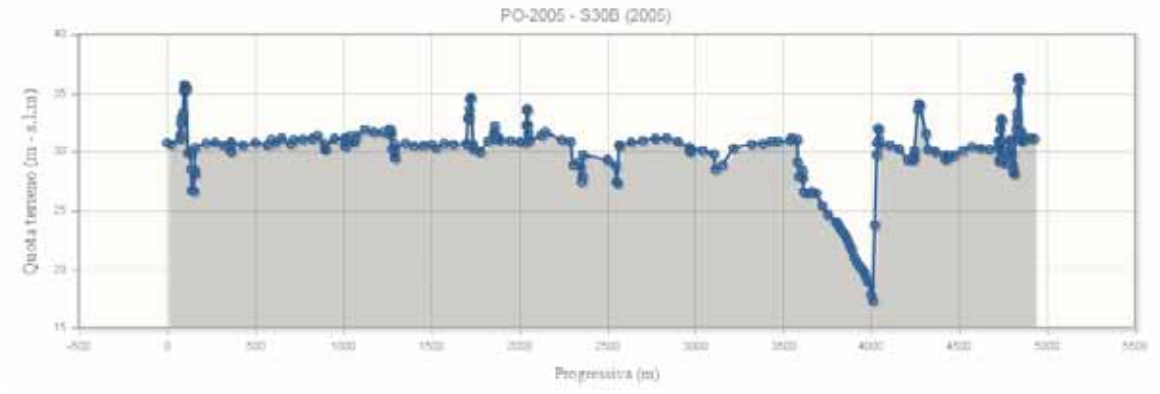


Figura 307 - Sezioni trasversali-rilievo 2005. prog. km 402.463

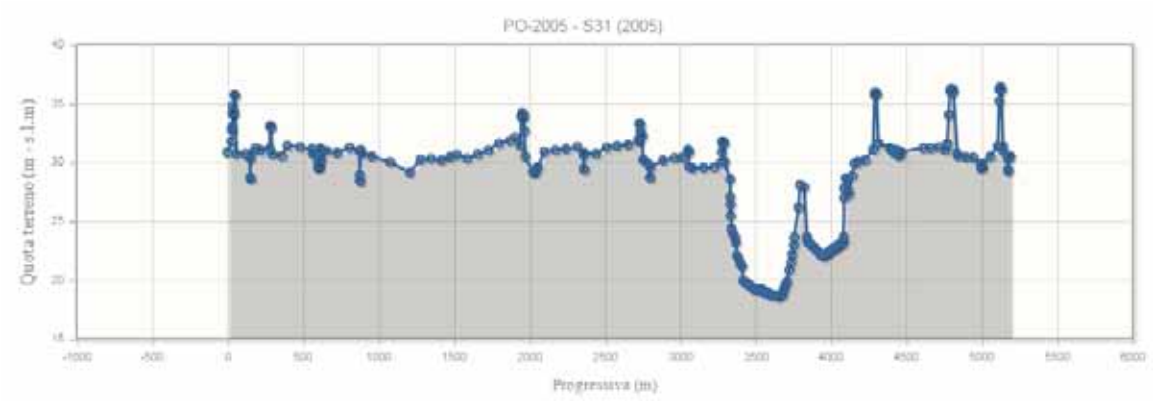
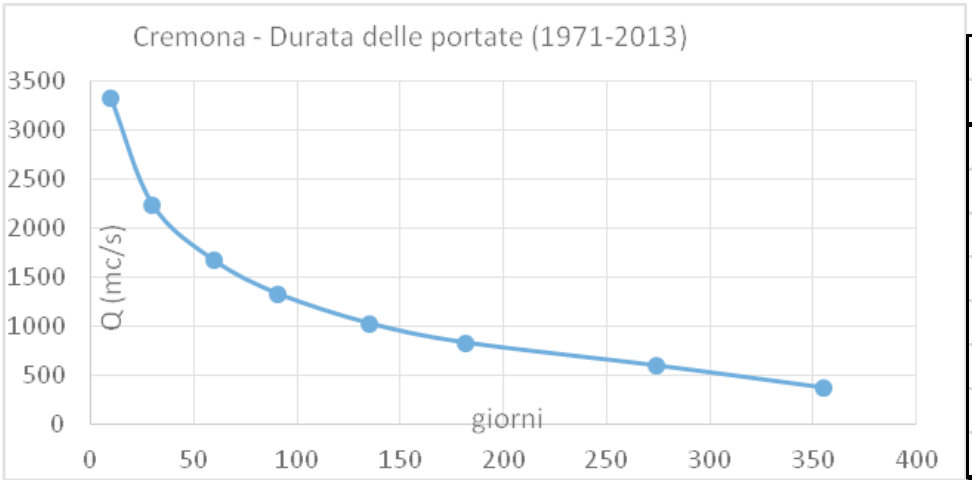


Figura 308 - Sezioni trasversali-rilievo 2005 prog. km 403.436

11.4.3 Le condizioni idrometriche e la scelta delle portate di prova

Nella successiva Figura 309 si riporta la scala di durata delle portate a Cremona, rappresentativa del tratto in esame.



gg	Q
	mc/s
10	3320
30	2240
60	1670
91	1330
135	1030
182	831
274	598
355	372

Figura 309 - Cremona - Curva di durata delle portate

Le prove su modello dovranno riferirsi alla portata di massima piena PAI-Tr200 (Q=14300 m3/s) per le verifiche di sicurezza idraulica e per la valutazione degli effetti di scavo localizzato in corrispondenza dei punti critici dei manufatti, alla portata di 1200 m3/s (portata di regolazione della traversa) nonché a valori di portata significativi dei processi di trasporto solido in riferimento ai bilanci sedimentari nel tratto ed ai processi di erosione deposizione utili alla corretta definizione della geometria del mandracchio a monte e valle della prevista conca di navigazione.

Per quanto riguarda i processi sedimentari si fa riferimento alle portate di 2300 m3/s e 3300 m3/s, rappresentative rispettivamente del 70% e 30% circa del trasportato.

Quindi complessivamente le portate di prova su modello saranno:

- Q=14300 m^3/s (sicurezza idraulica)
- Q=3300 m^3/s (bilancio sedimentario)
- Q=2300 m^3/s (bilancio sedimentario)
- Q=1200 m^3/s (regolazione traversa)

11.4.4 Il modello numerico 2-D

Nell'ambito del presente studio (come riportato nel capitolo specifico ad esso dedicato) è stato implementato un modello bidimensionale 2-D sia a fondo fisso (dedicato alla verifica delle condizioni di sicurezza idraulica in riferimento alla portata PAI-Tr200) che a fondo mobile (finalizzato alla simulazione degli scenari rappresentativi dell'evoluzione morfologica del corso d'acqua nel medio termine).

In riferimento al tratto fluviale in cui è ricompresa la traversa 1, il dominio di calcolo implementato ha un'estensione longitudinale di circa 15-20 km estesa trasversalmente fino agli argini maestri e prolungata a monte e a valle della traversa per una lunghezza idonea ad evitare che l'influenza delle condizioni al contorno di valle si risenta fino alla posizione della traversa.

La superficie delle singole maglie di calcolo che costituiscono il dominio del modello è compresa tra 250 e 2000 mq, mentre per le aree golenali tale valore è compreso tra un minimo di 2000 mq e un massimo di 10000 mq, anche se nelle zone in cui la morfologia lo richiede il modello costruisce celle di dimensioni più piccole della soglia impostata per poi accorparle in aree di dimensioni pari alle minime dimensioni impostate durante il calcolo. Nelle zone in prossimità delle opere il reticolo è ancor più dettagliato con la definizione di una superficie della maglia di calcolo compresa tra 5 e 10 mq. Nella Figura 310 è riportato il dominio di calcolo.

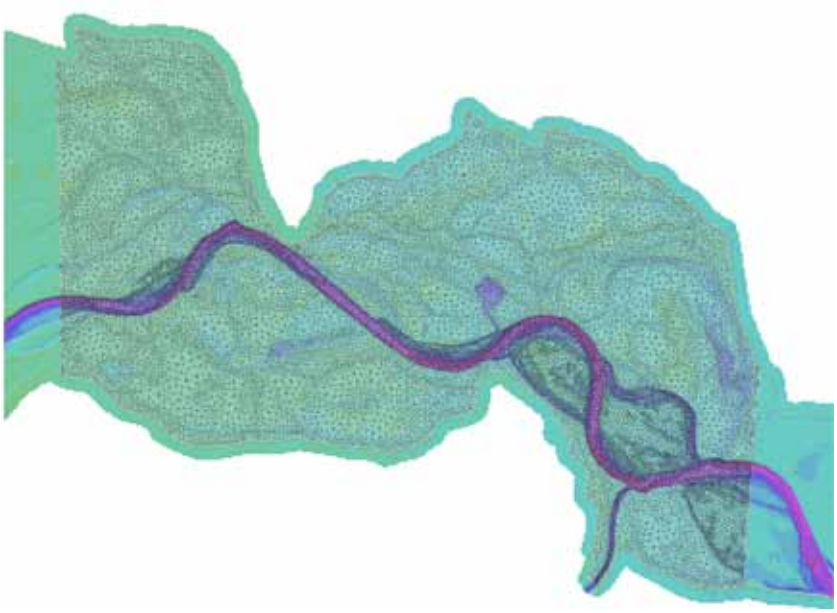


Figura 310 - Traversa 1- Dominio di calcolo del modello 2-D a fondo fisso

La condizione di monte è rappresentata dalla distribuzione sul contorno di monte della portata per unità di larghezza; la condizione al contorno nella sezione di valle è imposta in termini di piezometrica valutata sulla scala delle portate di moto stazionario.

La taratura del modello è stata effettuata per confronto tra lo scenario attuale (in assenza delle opere) ed i livelli misurati in occasione della recente piena del novembre 2000. In tal modo sono stati valutati i campi dei coefficienti di scabrezza utilizzati per le diverse zone del dominio (fondo alveo, barre, isole, golene boscate, golene coltivate, ecc.) come riportato nella successiva Figura 311. La distribuzione e l'entità delle scabrezze ricostruite sul dominio saranno di guida nella applicazione delle scabrezze artificiali da apporre sulle porzioni del modello fisico a fondo fisso. In Tabella 104 si riporta il confronto tra livelli misurati e simulati nel tratto.

Sez.	Piena 2000 (m s m)		Modello (m s m)		Differenze (m)	
	sx	dx	sx	dx	sx	dx
32A	33,66	33,5	33,54	33,54	0,12	-0,04
32	33,99	33,99	33,7	33,85	0,29	0,14
31	34,28	35,05	34,1	34,5	0,18	0,55
30B	34,67	35,06	34,28	34,5	0,39	0,56
30A	33,95	35,15	34,2	34,9	-0,25	0,25
30	35,17	35,19	34,9	34,9	0,27	0,29
29	35,89	35,24	35,5	35,55	0,39	-0,31

Tabella 104 - Tratto interessato dalla traversa n. 1 a Motta Baluffi (CR) – Roccabianca (PR). Livelli idrici in m s.m. rilevati e ottenuti dal modello allo stato attuale nelle diverse sezioni in sponda sinistra e destra per la piena 2000 (portata al colmo rilevata Q2000 = 11.850 m3/s). In colore verde i livelli misurati.

Sulla configurazione dello stato attuale nel modello matematico, è stata successivamente implementata la presenza della traversa, inserendo l'ingombro geometrico della stessa, nella condizione di esercizio prevista (i.e. paratoie completamente sollevate) per la portata PAI-Tr200 Q=14300 m^3/s.

I risultati delle simulazioni 2-D a fondo fisso in presenza della traversa sono riportate nella Figura 312 e nella Figura 313.

I risultati sono stati utilizzati per la definizione delle principali caratteristiche idrodinamiche utili alla definizione del modello fisico.

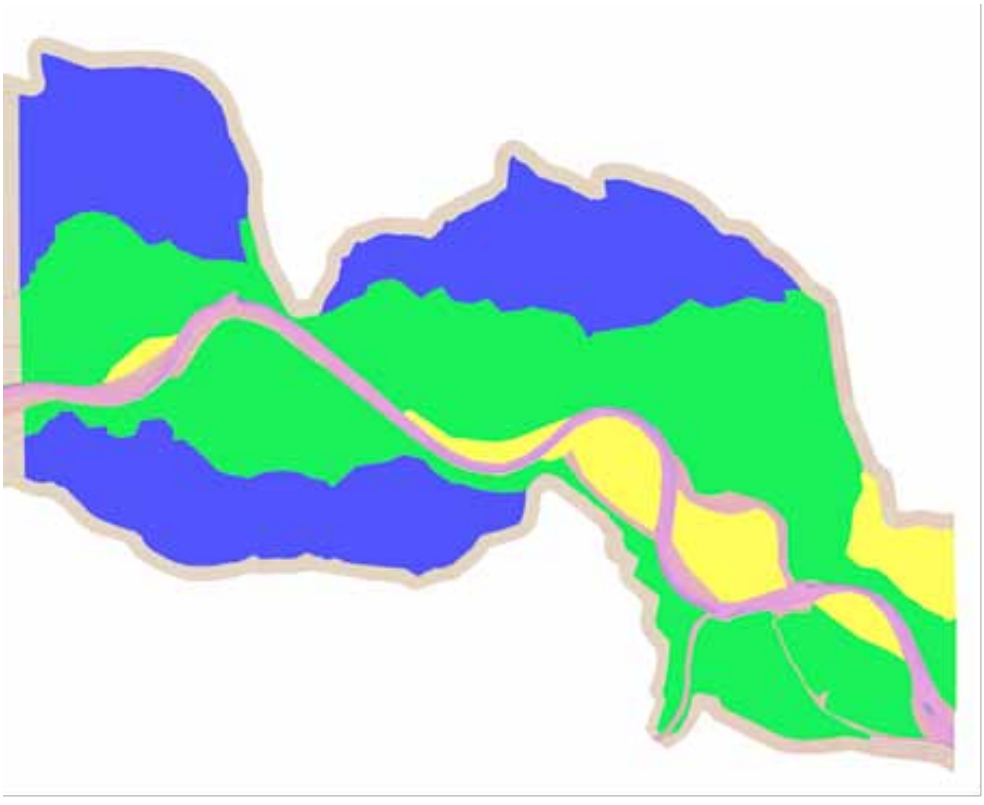


Figura 311 - Campi di scabrezza nel dominio di calcolo del tratto corrispondente alla traversa n. 1 (giallo = 0.04 m-1/3 s; verde = 0.05 m-1/3 s; blu = 0.1 m-1/3 s; alveo inciso = 0.0286 m-1/3 s)

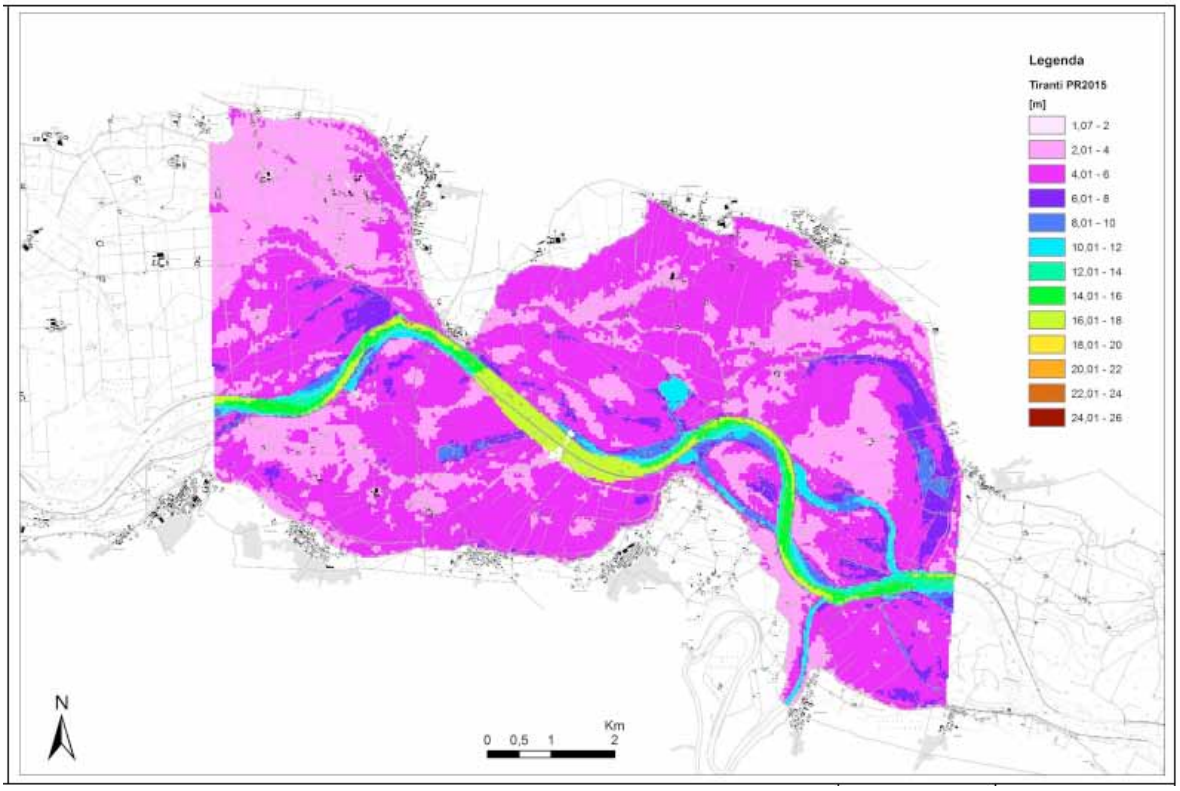


Figura 312 - Traversa 1 – risultati della simulazione 2-D a fondo fisso – Q=14300 m3/s

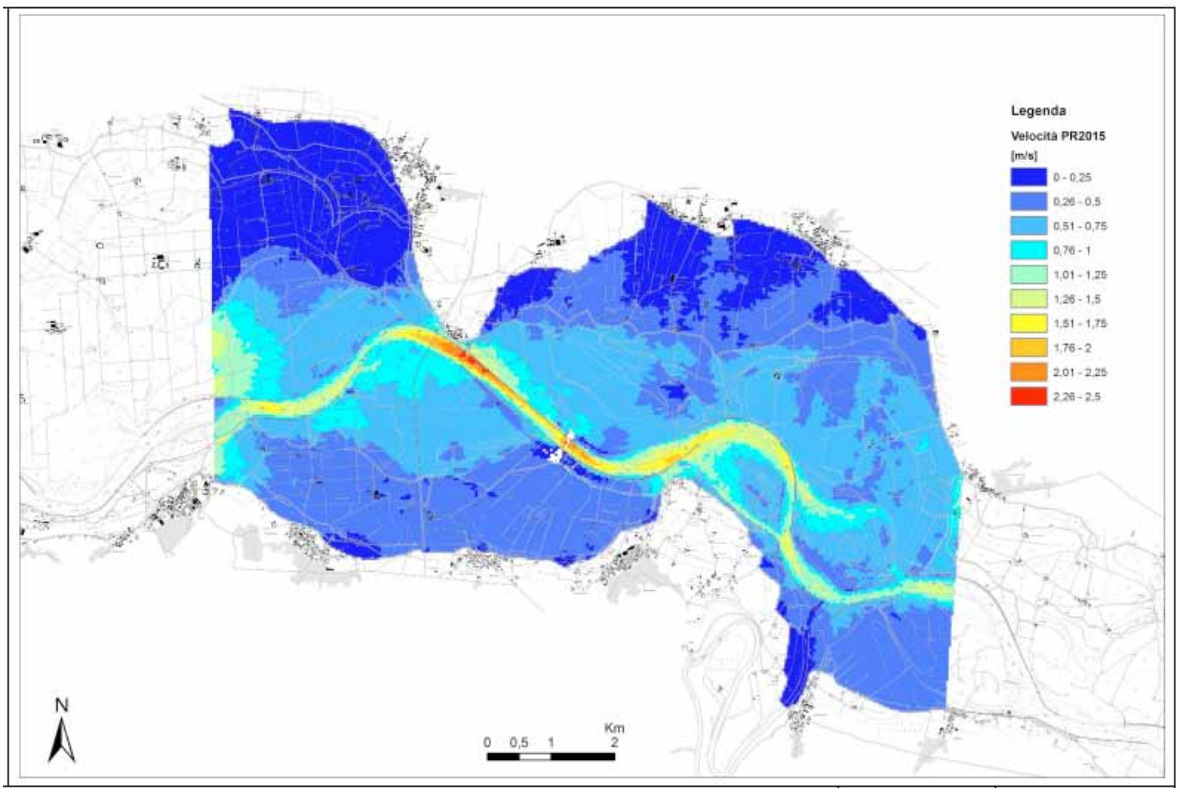


Figura 313 - Traversa 1 – risultati della simulazione 2-D a fondo fisso – Q=14300 m3/s

11.4.5 Criteri di similitudine ed effetti di scala

Nella scelta dei rapporti di scala e di similitudine si fa riferimento alla portata massima in prototipo Q=14'300 m3/s. Per tale portata, sulla scorta dei risultati della modellazione matematica sviluppata, si riscontrano le seguenti caratteristiche idrodinamiche:

PROTOTIPO:

- tirante medio hP=18 m
- velocità media UP=1.8 m/s
- numero di Froude medio FrP=0.15
- diametro medio sedimenti d50P=0.420 mm

In questa fase, la scala geometrica del modello è scelta in riferimento ad un ragionevole ingombro massimo del modello ricompreso all'interno di una sagoma planimetrica rettangolare di 40x25 m di lato. Rimane inteso che diverse geometrie potranno essere considerate in relazione agli effettivi spazi disponibili nel laboratorio di prova. In riferimento alla scelta preliminare di ingombro del modello fisico, si assegna la scala planimetrica Ly=Lx=1/110. In Figura 314 si riporta la sagoma di ingombro massimo del modello fisico.

Mantenendo inalterata la scala verticale (Lz=1/110) ne conseguirebbe, in similitudine di Froude:

- scala delle velocità Lv=1/10.49
- scala dei sedimenti Ld=1/110

La curva granulometrica del prototipo risulterebbe scalata con diametri compresi tra 0.0026 e 0.0064 mm. Il che implicherebbe l'adozione di sedimenti troppo fini nel modello, con conseguente presenza di fenomeni coesivi che altererebbero il comportamento sedimentologico del modello in similitudine a quello del prototipo.

Pertanto ci si deve orientare su una curva granulometrica distorta rispetto alla scala geometrica. Il che comporta nel modello l'insorgere di alcuni effetti scala indesiderati che si riflettono principalmente sui rapporti fra condizioni di inizio del trasporto e di risospensione, sulle forme di fondo generate, sulla resistenza al moto globale e sul trasporto solido in sospensione e quindi sulla scala dei tempi sedimentologica, che necessita una taratura empirico sperimentale ance al fine di rideterminare le durate delle singole prove su modello in riferimento alla sola scala dei tempi cinematica.

A queste considerazione si aggiunge quella relativa al rapporto relativo tra le forze viscose ed inerziali che, stante l'alterazione sulla scala geometrica delle particelle, nel modello tende ad amplificare l'effetto delle prime sulle seconde.

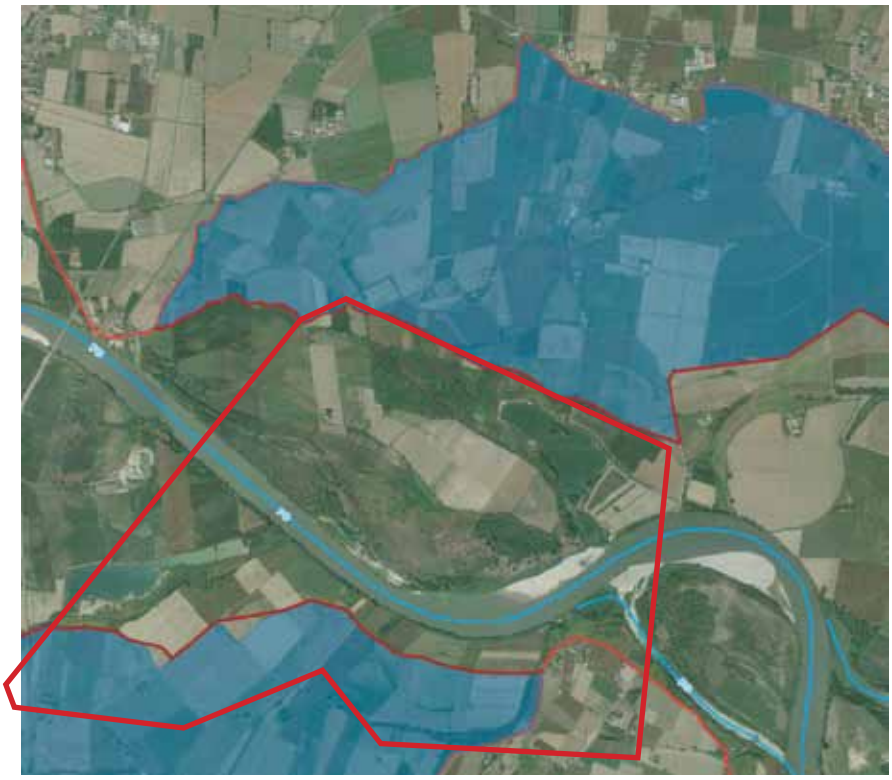


Figura 314 - Sagoma di ingombro massimo del modello fisico (scala geometrica planimetrica 1/110)

Per controbilanciare tali fenomeni, scegliendo al tempo stesso di non rinunciare al rapporto di densità unitario tra i sedimenti del prototipo e del modello e scegliendo dimensioni minime dei sedimenti compatibili con il campo delle sabbie (v.Tabella 105), si rende necessario alterare ragionevolmente il rapporto di scala planimetrico e verticale:

- scala planimetrica Lx=Ly=1/110
- scala verticale Lz=1/90

	ds (mm)			
	5%	16%	50%	84%
prototipo	0.270	0.290	0.420	0.700
modello in sim Fr	0.004	0.004	0.006	0.010
modello fisico	0.070	0.075	0.109	0.181

Tabella 105 - Caratteristiche della curva granulometrica nel prototipo e nel modello fisico

Pertanto risulta, in similitudine di Froude:

- scala delle velocità: Lv=1:9.5
- scale sedimenti (Ld=1:73.6 in similitudine di Froude)
- scala delle portate Lq=1:93'920

Applicando la scala sedimentologica in similitudine di Froude, si otterrebbero ancora sedimenti troppo fini (d_s=0.004-0.010 mm), che introdurrebbero nel modello forze coesive non presenti nel prototipo. Pertanto si sceglie di fissare il limite inferiore del fuso granulometrico dei sedimenti coincidente con la dimensione minima per le sabbie (i.e. d_s= 0.070 mm) e riscalare le rimanenti frazioni in ragione del rapporto 0.270/0.070 della frazione inferiore.

Con riferimento alle condizioni idrodinamiche del prototipo, si può stimare il valore del coefficiente di conduttanza adimensionale di Chezy relativo alla velocità d'attrito u*' associata alla sola scabrezza del materiale di fondo, opportunamente corretta in ragione della formula di Colebrook per il regime di parete diverso da parete scabra:

$$C'_p = 2.5ln\left(\frac{y_p}{3d_p}\right) + 6 \quad = 29.5$$

Da cui:

$u'_{*p} = 0.07$ m/s

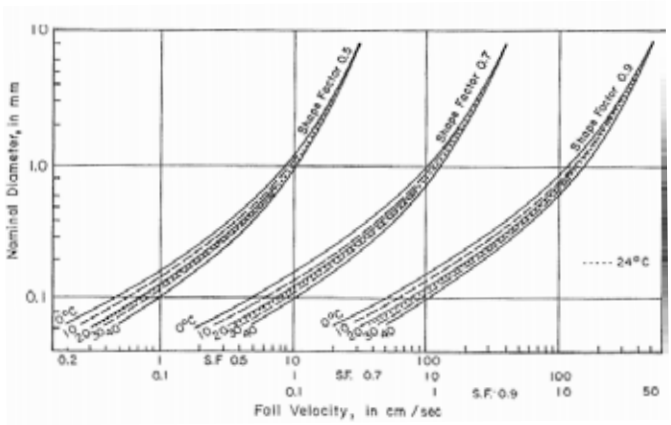


Figura 315 - Velocità di caduta delle particelle naturali in funzione del fattore di forma di Corey (Interagency Report n.12, 1957)

Con riferimento alla formula di Rubey (1933) che ben interpreta il grafico di Figura 315 (assumendo coefficiente di forma 0.7 per le particelle di sabbia), è possibile stimare la velocità di caduta ws delle particelle nel prototipo e nel modello:

w_{sP}=0.055 m/s w_{sM}=0.010 m/s

Nel prototipo il rapporto tra velocità di attrito e velocità di caduta delle particelle risulta:

$$\frac{u'_{*P}}{w_{sP}} = 1.2$$

che indica la tendenza delle particelle alla sospensione.

La scelta di un fuso granulometrico scalato nel modello, comporta l'aumento relativo di intensità delle forze viscose che si verifica passando dal prototipo al modello.

Per bilanciare tale effetto si sceglie di amplificare il rapporto tra velocità di attrito riferita alle particelle e velocità di caduta delle stesse. Per questa strada si ottiene anche l'effetto di bilanciare meglio il parametro di mobilità di Shields:

$$\theta = \frac{\rho u_*^2}{\gamma'_s d_s}$$

che esprimendo il rapporto tra lo stress al fondo ed il peso immerso dei grani può essere assunto come il numero indicativo del trasporto al fondo e della formazione e sviluppo delle forme di fondo stesse (Yalin & Ferreira da Silva, 2001).

Nell'imporre il nuovo rapporto tra velocità di attrito delle particelle e velocità di sedimentazione si deve tendere da una parte a rispettare il numero di Froude di densità e dall'altra a non esasperare il regime di corrente lenta trascinando il numero di Froude della corrente nel modello troppo distante da quello del prototipo. Alla luce di queste considerazioni si assume:

$$\frac{u'_{*M}}{w_{sM}} = 3.0$$

Da cui si ricava facilmente il nuovo valore della velocità di attrito riferita alle sole particelle:

$u'_{*M} = 0.03$ m/s

Il coefficiente di conduttanza riferito alle particelle, nel modello, risulta:

$$C'_M = 2.5 ln\left(\frac{y_M}{3d_M}\right) + 6 = 21.6$$

prossimo al valore del prototipo. Di conseguenza la velocità media ed il numero di Froude nel modello risultano superiori a quelli nel prototipo (pur mantenendosi caratteristiche piuttosto accentuate di corrente lenta):

$U_M = u'_{*M}\ C'_M$ = 0.63 m/s

$$Fr_M = \frac{U_M}{\sqrt{g y_M}} = 0.5$$

da cui è possibile risalire al rapporto significativo tra la profondità media della corrente ed il diametro medio dei sedimenti. Facendo riferimento ai grafici di Figura 316 e Figura 317, è possibile verificare le forme di fondo attese nel prototipo e nel modello.

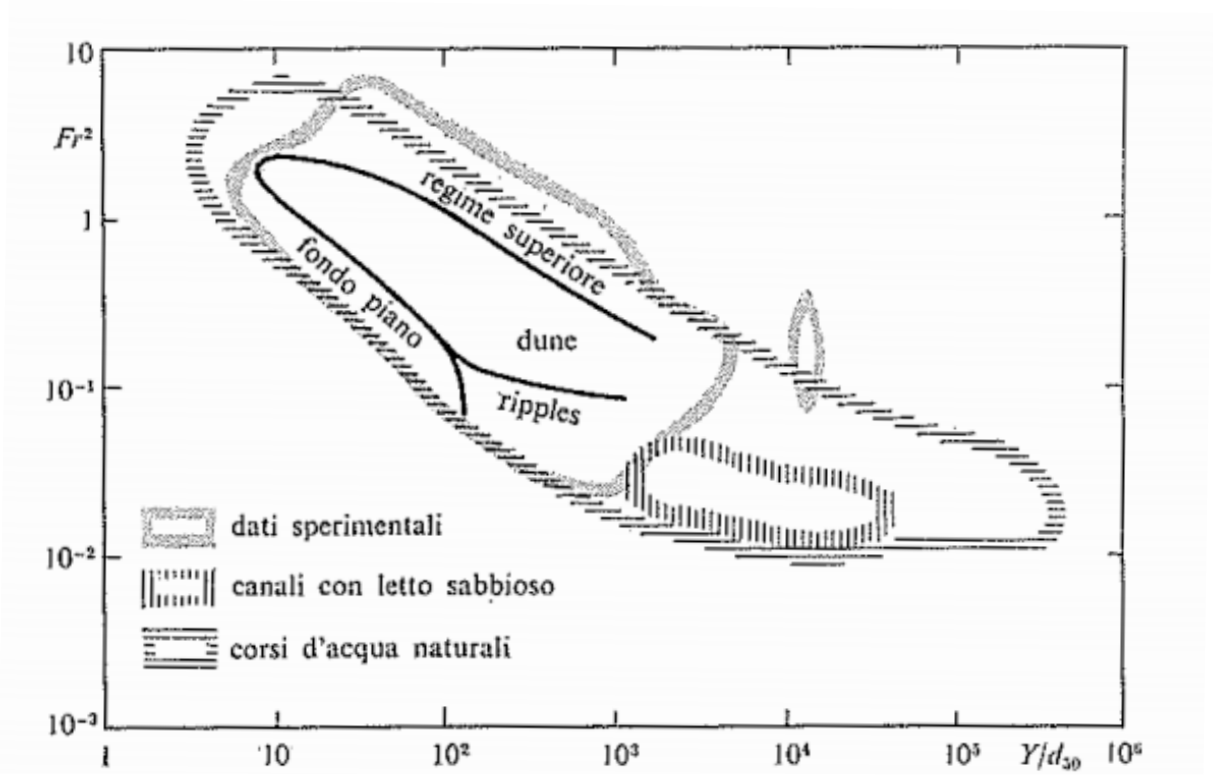


Figura 316 - Campi di moto con modellazione del fondo (Cooper, Peterson e Blench, 1972). (Fr numero di Froude della corrente; Y/d50 rapporto profondità media corrente e diametro medio sedimenti)

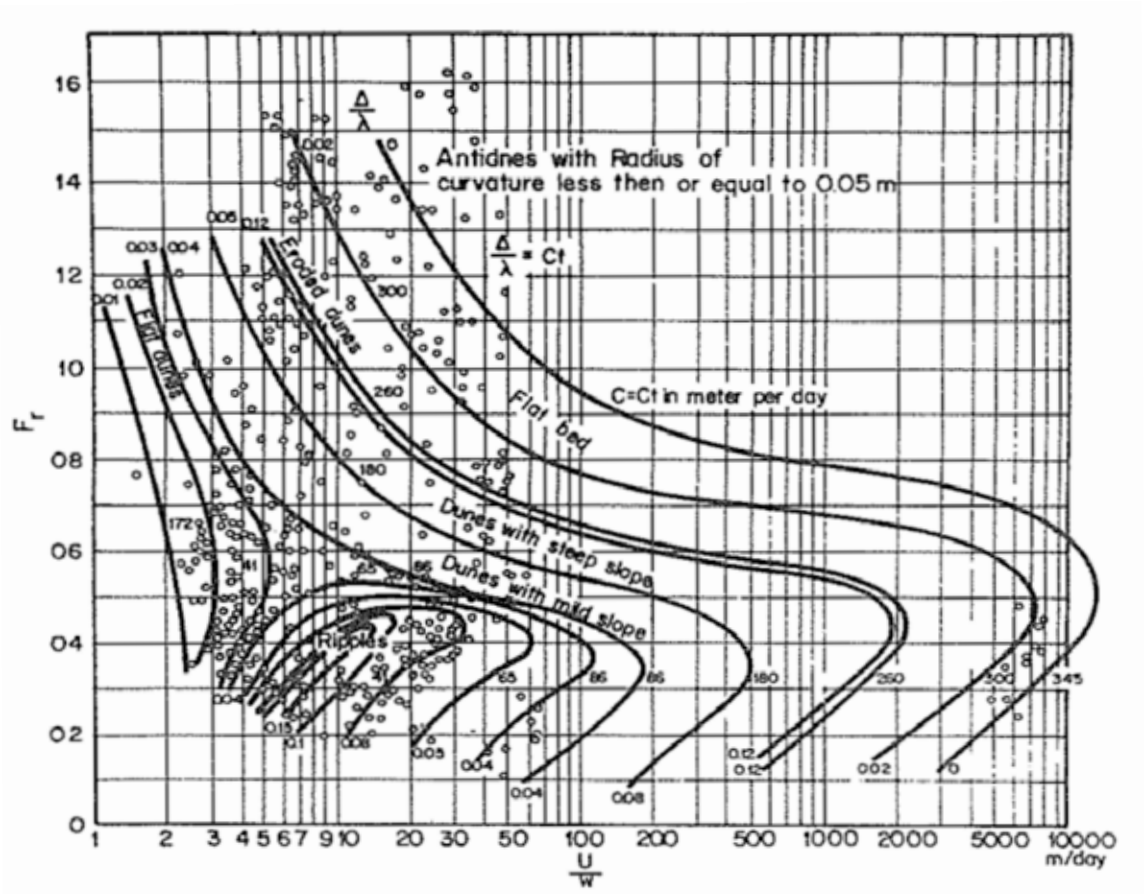


Figura 317 - Geometria e celerità delle forme di fondo (Znamenskaya, 1965).
(U velocità media della corrente; w velocità di sedimentazione delle particelle; Δ/λ ripidità della forma)

Calcolato il numero di Froude relativo alle particelle nel prototipo e nel modello,

$$Fr_s = \frac{U}{\sqrt{g\, d_s}}$$

$Fr_{sP} = 31.2$ $\qquad$ $Fr_{sM} = 19.4$

è possibile ricavare dal diagramma di Alam & Kennedy (v. Figura 318) il valore del coefficiente di conduttanza riferito alle forme di fondo, che risulta rispettivamente nel prototipo e nel modello:

$C_P'' = 27.0$ $\qquad$ $C_M'' = 18.7$

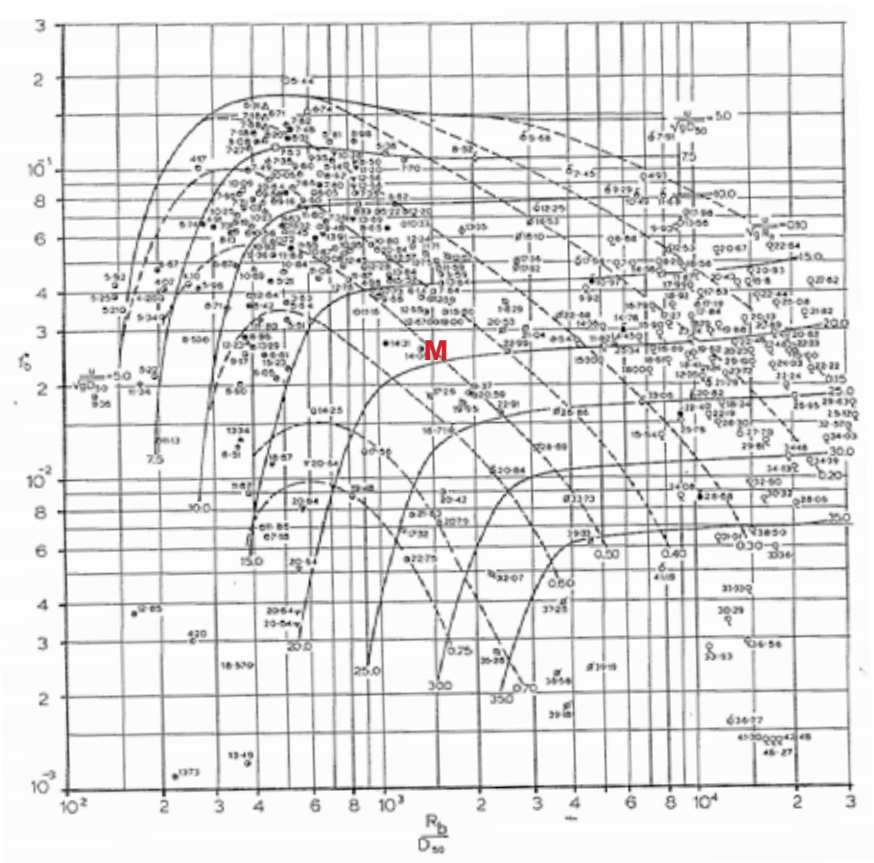


Figura 318 - Coefficiente di resistenza per le forme di fondo (Alam & Kennedy 1969)

Assumendo che le resistenze al moto totali siano la somma di quelle associate alla scabrezza delle particelle e di quelle conseguenti la presenza delle forme di fondo, si ottiene il coefficiente di conduttanza totale C, nonché la pendenza motrice media i (di moto uniforme):

$$\left(\frac{1}{C^2}\right) = \left(\frac{1}{C'^2}\right) + \left(\frac{1}{C''^2}\right)$$

$C_P = 19.9$ $\qquad$ $C_M = 14.1$

$$i = \frac{U^2}{C^2 g y}$$

$i_P = 0.07$ m/km $\qquad$ $i_M = 1.23$ m/km

Il modello risulta basculato, cioè con pendenza motrice maggiore di quella del prototipo. La differenza in livello rimane inapprezzabile nel modello, a fronte di velocità maggiori di quelle corrispondenti alla similitudine di Froude.

L'assetto definito per il modello ed in particolare la scelta del materiale costituente l'alveo attivo per le simulazioni a fondo mobile garantiscono un comportamento simile a quello del prototipo, sviluppando forme di fondo paragonabili, pur introducendo un effetto di scala dovuto alla granulometria scelta. Di questo si ha riscontro osservando la Figura 319.

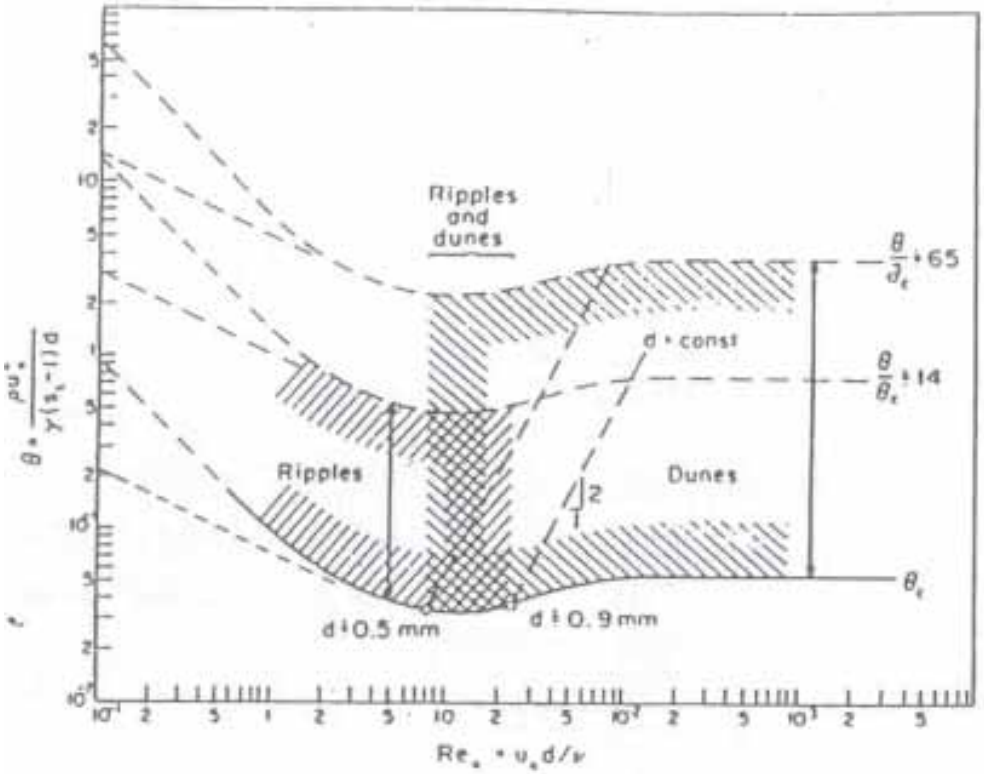


Figura 319 - Criterio di esistenza e caratteristiche delle forme di fondo (Yalin & Ferreira da Silva, 2001)

In ogni caso occorrerà interpretare opportunamente le risultanze delle modellazioni poiché l'effetto di scala introdotto con la scelta della curva granulometrica nel modello, ha effetto sia sulla condizione di incipiente movimento che sulla risospensione dei sedimenti e sulla dinamica degli scavi localizzati.

Nella seguente Tabella 106 si riporta il quadro sintetico dei parametri e delle grandezze caratteristiche del prototipo e del modello.

		Ingombro modello (m)
Lx prototipo (m)	4250	38.6
Ly prototipo (m)	2750	25.0

	Granulometria ds (mm)			
	5%	16%	50%	84%
prototipo	0.270	0.290	0.420	0.700
modello in sim Fr	0.004	0.004	0.006	0.010
modello	0.070	0.075	0.109	0.181

SCALE GEOMETRICHE			
Lx=	1/ 110	0.0091	
Lz=	1/ 90	0.0111	
Similitudine di Froude			
Lv	Ld	LQ	Lt
0.105	0.014	1.06474E-05	0.086243936
1/Lv	1/Ld	1/LQ	1/Lt
9.5	73.6	93'920	11.6

PROTOTIPO		MOD Froude	MOD basculato
Q (mc/s)	14300	0.152	
Qc (mc/s)	11500	0.122	
h (m)	15	0.17	0.17
U (m/s)	2	0.21	0.63
Fr^2	0.027		0.246
Fr	0.16		0.50
C'	29.5		21.6
u*' (m/s)	0.07		0.03
u*'/ws	1.2		3
Frs	31.2		19.4
C''	27.0		18.7
C	19.9		14.1
Sf (m/km	0.07		1.23
ws(m/s)	0.055		0.010
h/ds	35714		1531
U/ws	36.67		64.76
Teta	1.49		1.15
Re*	29.16		4.89

Tabella 106 - Quadro sintetico parametri e grandezze caratteristiche del modello fisico (MOD=modello fisico)

11.5 SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA IN CORRISPONDENZA PONTE DI REVERE-OSTIGLIA (INTERVENTO 7V1)

11.5.1 Il contesto e le opere

Le opere in esame si collocano circa 15 km a valle della Foce Mincio, sezione di valle del tronco già oggetto di sistemazione a corrente libera. In tutto il tratto a Valle di foce Mincio e fino a Pontelagoscuro, il corso d'acqua si presenta con un alveo prevalentemente monocursale, da rettilineo a sinuoso, localmente meandriforme e con presenza di barre longitudinali ben sviluppate.

In particolare le opere (v. Figura 320) si collocano tra la risvolta di Ostiglia e l'isola Boschina, in corrispondenza dei due attraversamenti (stradale e ferroviario) di cui quello di valle di recente realizzazione. Tali opere fanno parte dell'insieme di opere previste nel tratto che si estende dalla progressiva 504 km (a monte della risvolta di Ostiglia) alla 511 km (in corrispondenza dell'Isola Boschina) come illustrato in Figura 321.

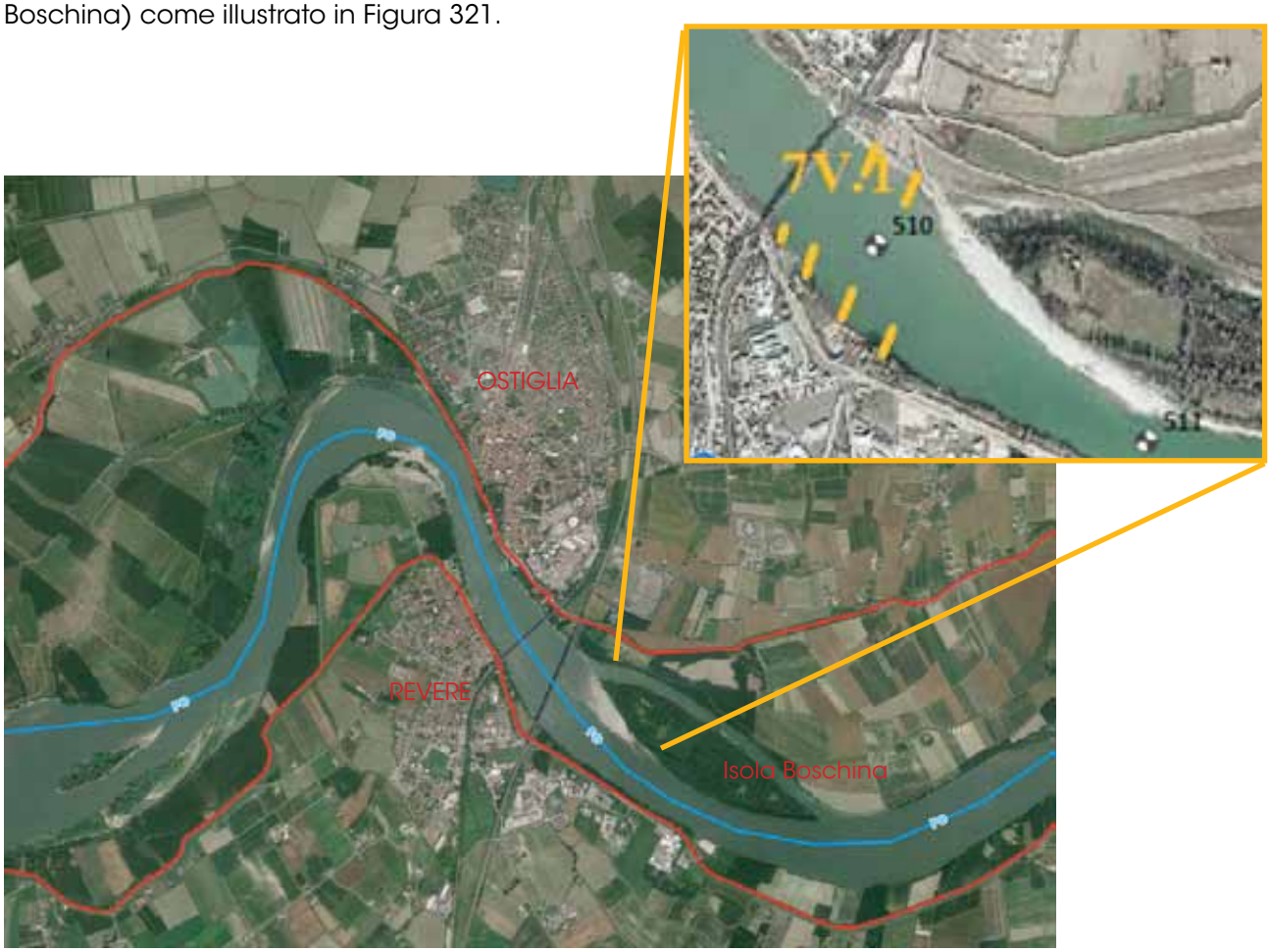


Figura 320 - Corografia del tratto di Po nell'intorno delle opere.
(lo sfondo è precedente la realizzazione del nuovo ponte ferroviario a valle del ponte preesistente)

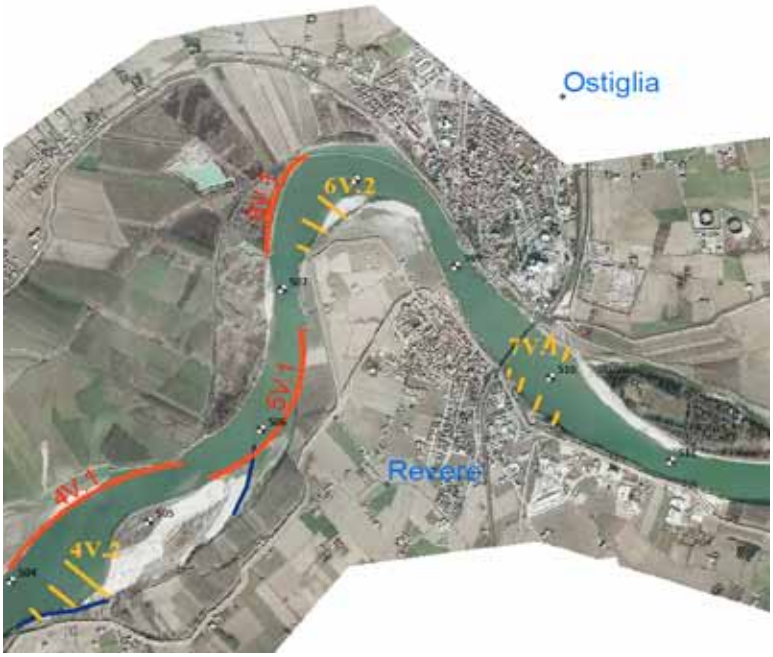


Figura 321 - Corografia della sistemazione complessiva a monte e valle della risvolta di Revere-Ostiglia (in rosso le nuove opere longitudinali, in arancione i pennelli, in blu le opere esistenti da demolire). Lo sfondo ortofotografico è datato precedentemente alla realizzazione del nuovo ponte ferroviario a valle di quello preesistente.

Il confronto delle due immagini di Figura 322 e Figura 323 relative a diverse condizioni idrometriche del Fiume evidenzia la presenza e la forma della barra a valle degli attraversamenti esistenti.



Figura 322 - La risvolta di Ostiglia e la Isola Boschina in condizioni idrometriche sostenute (data 10/5/2012)



Figura 323 - La risvolta di Ostiglia e la Isola Boschina in condizioni idrometriche di magra (data 4/9/2003)

La presenza delle pile dei due ponti esistenti unitamente ai pennelli qui considerati, costituisce un insieme articolato di presenze fisiche in alveo che interferiscono con la corrente alterandone significativamente l'assetto idrodinamico nelle diverse condizioni idrometriche. In questa situazione la valutazione degli effetti di erosione localizzata in corrispondenza delle pile dei ponti e delle teste dei pennelli, così come gli effetti sui flussi sedimentari e sul bilancio dei sedimenti nel tratto in prossimità delle opere, nonché l'effettiva funzionalità dei pennelli ai fini della navigazione in condizioni di magra è difficilmente inquadrabile con le formule disponibili in letteratura a causa della interazione reciproca delle opere.

L'intervento 7V1 oggetto dell'approfondimento relativo alla modellistica fisica, è costituito da 4 pennelli trasversali in sponda destra e 2 pennelli traversali in sponda sinistra, di altezza pari a 8,5 m e sviluppo trasversale alla sponda variabile da 48 m a 94 m circa, sormontabili per portate pari a circa 800 m3/s. La geometria dei pennelli, nonché le caratteristiche costruttive sono ispirate a quelle già largamente impiegate lungo il corso d'acqua da AIPo per la sistemazione a corrente libera di numerosi tratti fluviali. Queste prevedono la realizzazione di un nucleo centrale in sabbia contenuto da due cordoni laterali realizzati con burghe e paramenti laterali di pendenza 2/3 in pietrame di adeguata pezzatura.

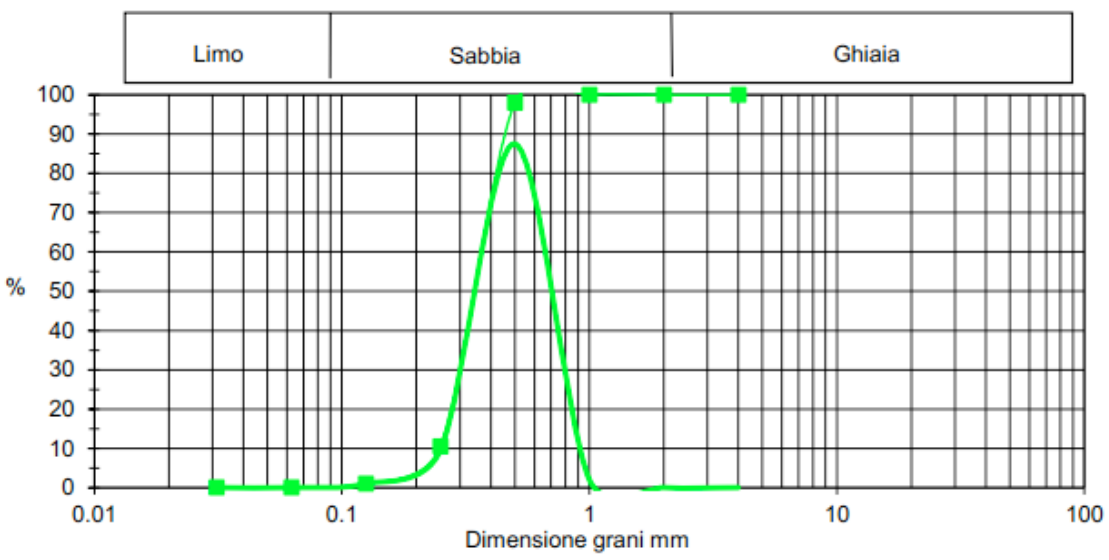
In Tabella 107 si riportano le caratteristiche salienti delle opere previste oggetto dell'approfondimento con modellistica fisica (intervento 7V1).

IDENTIFICAZIONE		CARATTERISTICHE PRINCIPALI OPERE					CARATTERISTICHE GEOMETRICHE						PARAMETRI GEOMETRICI		
CURVA	OPERA		Tipologia	Lunghezza	Quota sommità	Chilometrica	Livello Q800	Quota media base	Altezza massima opera	Altezza media opera	H max.sez. tipo	Larghezza sommità	Area sezione trasversale media	Volume opera	Volume totale opere
TAVOLA 13.1	5V	1	Pennello longitudinale	1310,0	8,9	506	8,88	0	8,9	7	9	4	108,9	142.659	142.659
	6V	1	Difesa spondale	1184,0	12	507,5	8,72	0	12	10	12	Variabile	223,5	264.624,0	264.624,0
	6V	2a	Pennello trasversale	83,0	8,75		8,72	1	7,75	6	8	4	84,8	7.038	
		2b	Pennello trasversale	173,0	8,75	507,5	8,72	4	4,75	3	5	3	27,3	4.723	
		2c	Pennello trasversale	221,0	8,75		8,72	4	4,75	3	5	3	27,3	6.033	
	6V	2	TOTALI	477,0	8,75								140,0		17.795
	7V	1a (SX)	Pennello trasversale	93,5	8,5		8,53	6	2,5	3	3	3	27,3	2.553	
		1b (SX)	Pennello trasversale	93,5	8,5		8,53	6	2,5	3	3	3	27,3	2.553	
		1c (dx)	Pennello trasversale	47,7	8,5		8,53	0	8,5	7,5	9	4,0	122,1	11.414	
		1d (dx)	Pennello trasversale	87,4	8,5	510	8,53	0	8,5	7,5	9	4,0	122,1	5.822	
		1e (dx)	Pennello trasversale	93,5	8,5		8,53	-2	10,5	9	11	4,0	166,1	14.524	
		1f (dx)	Pennello trasversale	85,4	8,5		8,53	-2	10,5	9	11	4,0	166,1	15.530	
	7V	1	TOTALI	501,1	8,5								631,0		52.395
	7V	2	Pennello longitudinale	866,6	14	512,2	8,3	3	11	10	11	4	199,2	172.625	172.625

Tabella 107 - Caratteristiche principali degli interventi ricompresi tra la prog. Km 506 e la prog. Km 512

11.5.2 I rilievi

Durante il presente studio sono state effettuate campagne di rilievo sedimentologico in corrispondenza delle sez. 50 prog. Km 509,5 a monte del tratto rettilineo impegnato dalle opere previste e sez.53B alla prog. Km 511,7 in corrispondenza dell'Isola Boschina immediatamente a valle. La Figura 324 e la Figura 326 riportano le curva granulometriche riferita al campione (superficiale) prelevato in alveo.



D_{84}	0.70
D_{50}	0.42
D_{16}	0.29
D_5	0.27

Figura 324 - Curva granulometrica del campione d'alveo attivo effettuato in occasione del presente studio (campione TE/S50/A/2)

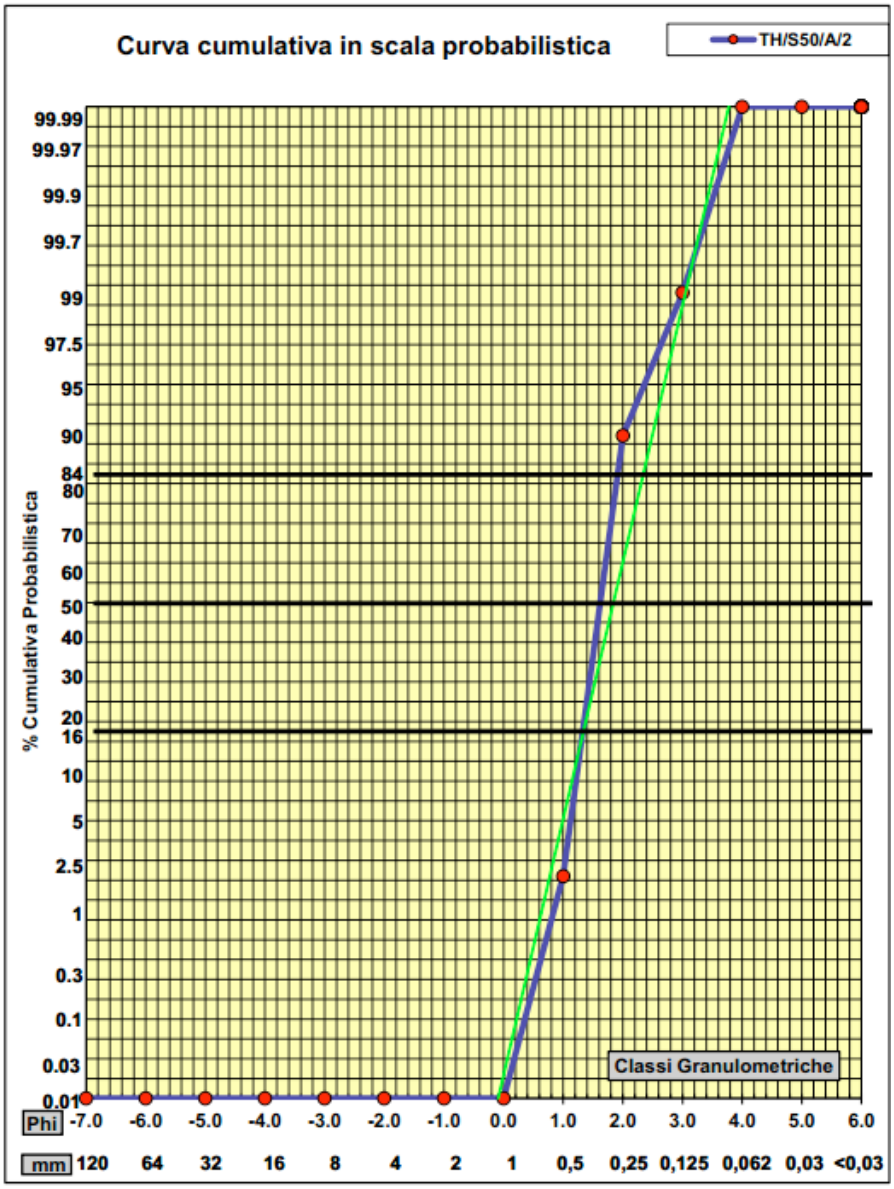
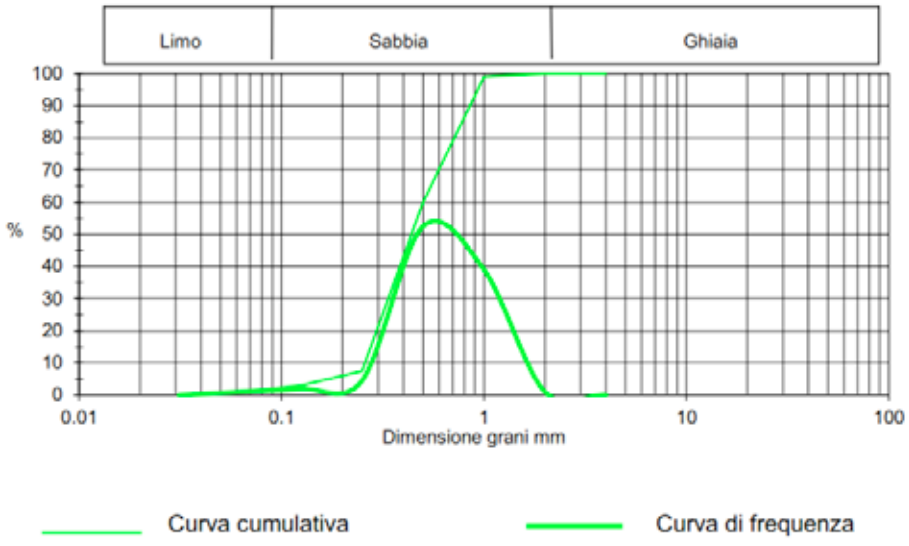


Figura 325 - Punti di troncatura sulla curva granulometrica del campione d'alveo attivo effettuato in occasione del presente studio (campione TE/S50/A/2)



D_{84}	0.45
D_{50}	0.34
D_{16}	0.26
D_5	0.17

Figura 326 - Sez53B. Curva granulometrica del campione d'alveo attivo effettuato in occasione del presente studio (campione TE/S53B/A/2)

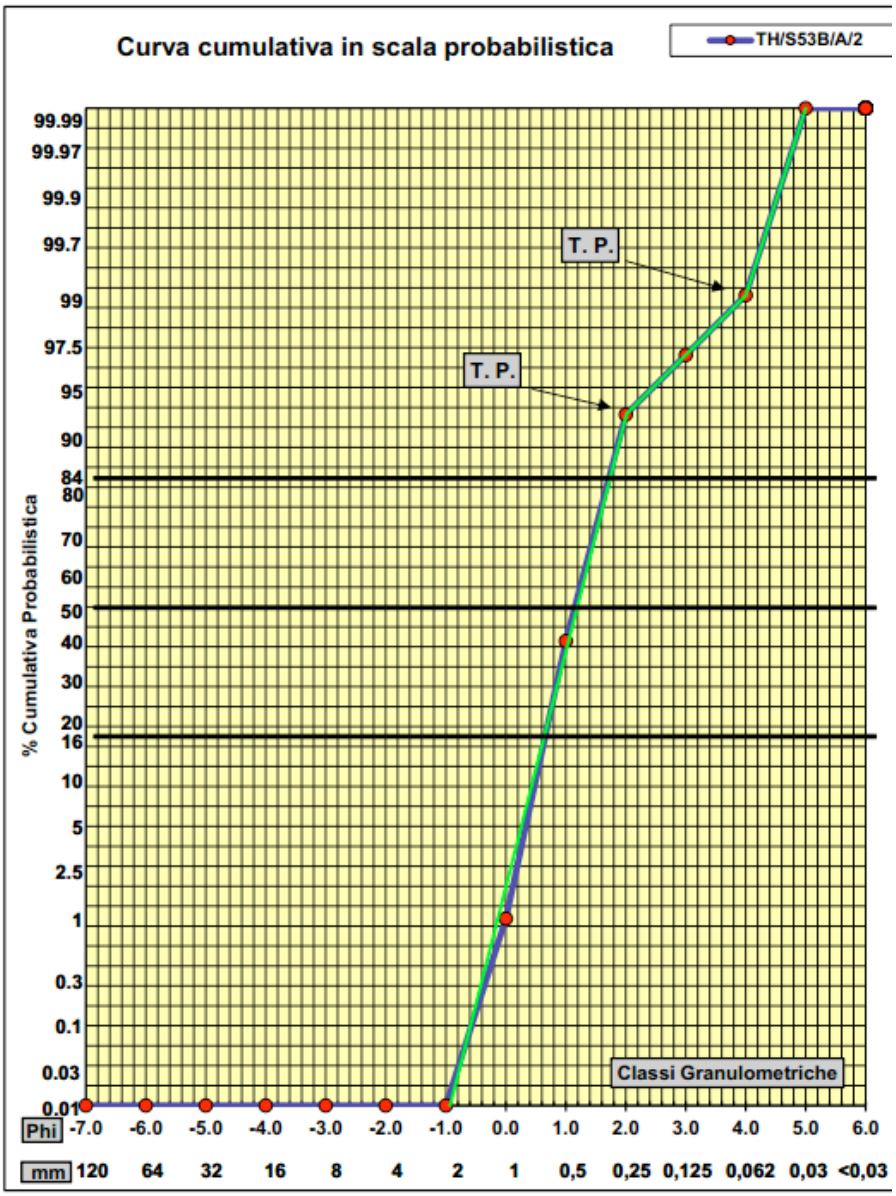
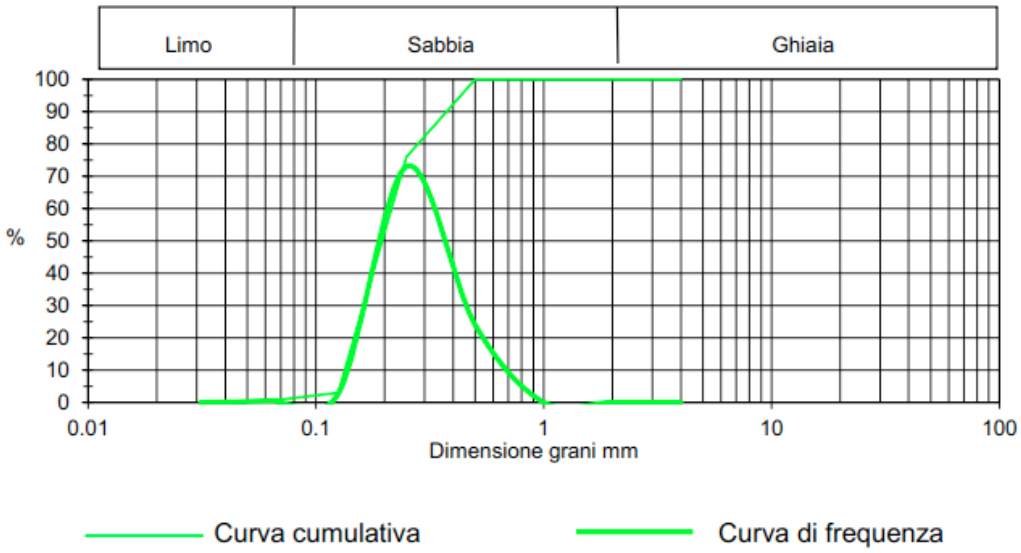


Figura 327 - Punti di troncatura sulla curva granulometrica del campione d'alveo attivo effettuato in occasione del presente studio (campione TE/S53B/A/2)

I campioni (superficiali) prelevati in questa occasione sulla barra emersa dell'Isola Boschina (TE/S30/A/1), confermano la presenza di depositi sabbiosi caratterizzati da granulometrie fini paragonabili a quelle d'alveo, diversamente dai riscontri del rilievo effettuato nel 2007 che evidenziava presenza di frazioni relativamente più grossolane. La differenza può essere imputata al diverso regime idrometrico (e di trasporto e deposizione) che ha caratterizzato i periodi precedenti i rilievi.



D_{84}	D_{50}	D_{16}	D_5
0.31	0.20	0.14	0.13

Figura 328 - Curva granulometrica del campione d'alveo attivo effettuato in occasione del presente studio (campione TE/S53B/A/1)

Ai fini del presente studio, si assume come curva granulometrica rappresentativa del materiale d'alveo, quella risultante dalla media applicata ai diametri passanti caratteristici dei campioni delle sezioni S50 e S53B, come riportato in Tabella 108.

D_5	D_{16}	D_{50}	D_{84}
0.17	0.27	0.40	0.61

Tabella 108 - Fuso granulometrico (mm) rappresentativo del tratto di studio ove insistono le opere di sistemazione 71.V (pennelli)

La batimetria del prototipo è stata ricostruita sulla scorta del DTM dell'anno 2005. Nelle successive Figura 329, Figura 330 e Figura 331 sono riportate le sezioni trasversali rilevate nel 2005 nel tratto in esame.



Figura 329 - Inquadramento dell'area oggetto di studio. In evidenza le sezioni di rilievo.

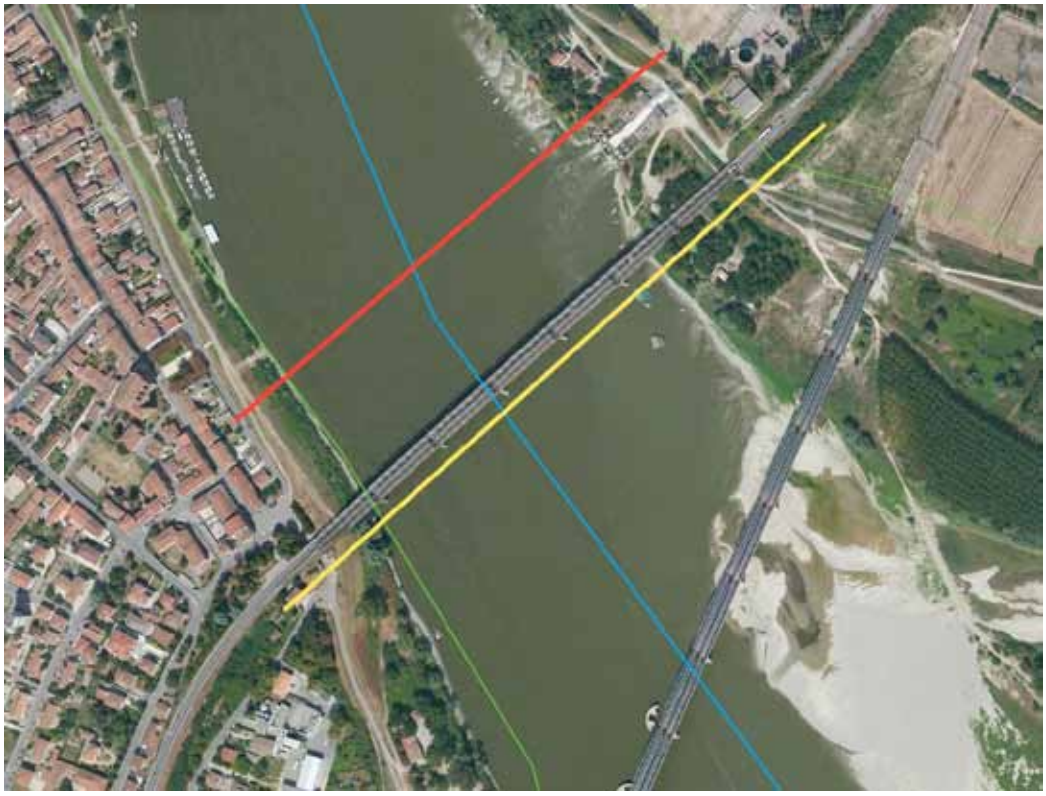


Figura 330 - Inquadramento planimetrico della sezione 53A prog. Km 510.3

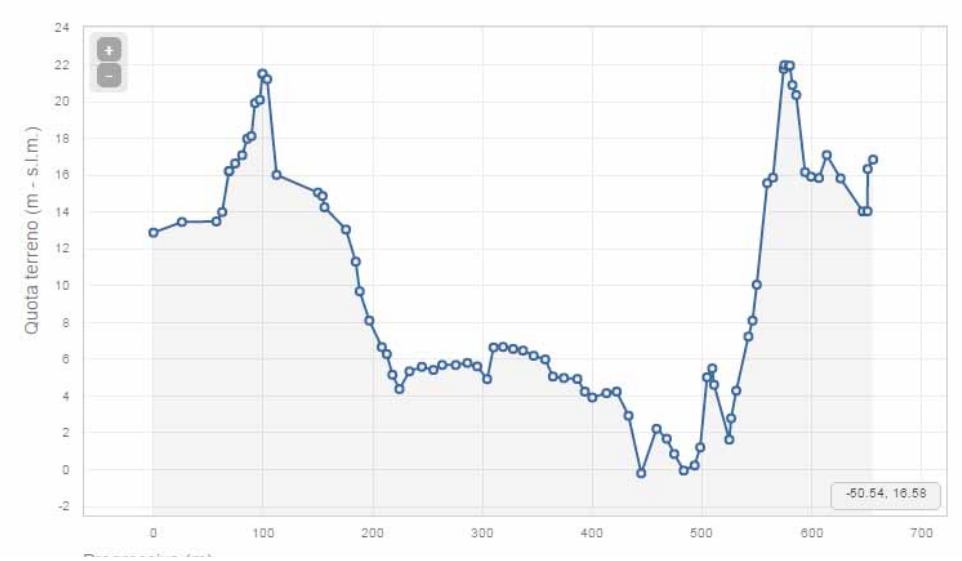
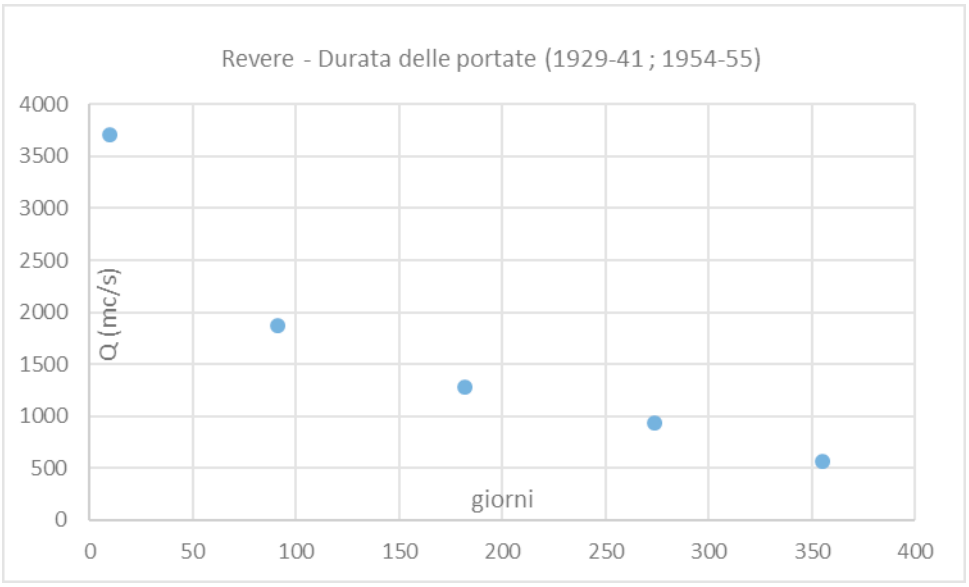


Figura 331 - Sez 53A prog. Km 510.3 in corrispondenza del tratto interessato dalle opere -intervento 7V1. La linea tratteggiata indica la quota di sommità dei pennelli (8.5 m s.m.)

11.5.3 Le condizioni idrometriche e la scelta delle portate di prova

La stazione idrometrica di Revere del Servizio Idrografico Nazionale, attiva dal 1851, ha misurato le portate nel periodo 1929÷1941 con una ripresa sporadica nel 1954-55. Nella successiva Figura 332 si riporta la scala di durata delle portate alla stazione.



gg	Q mc/s
10	3710
91	1870
182	1280
274	931
355	568

Figura 332 - Revere - Curva di durata delle portate

Il progetto di sistemazione a corrente libera sull'intero tratto è tarato su una portata di sommergenza limite dei pennelli pari a 800 m3/s corrispondenti ad una durata di circa 300-320 giorni.

Le prove su modello dovranno riferirsi alla portata di massima piena PAI-Tr200 Q=13100 m3/s (da "Direttiva "Piena di Progetto") per le verifiche di sicurezza idraulica e per la valutazione degli effetti di scavo localizzato in corrispondenza dei punti critici dei manufatti, nonché a valori di portata significativi dei processi di trasporto solido in riferimento ai bilanci sedimentari nel tratto ed alla corretta definizione della geometria dei pennelli con riguardo al mantenimento del canale di magra navigabile e dei processi di interrimento a tergo dei pennelli.

Per quanto riguarda i processi sedimentari si fa riferimento alle portate di 1900 m3/s e 3700 m3/s che si possono ritenere rappresentative di circa il 80% e 20% rispettivamente del trasporto solido medio annuo.

Quindi complessivamente le portate di prova su modello saranno:

- Q=13100 m3/s (sicurezza idraulica)
- Q=3700 m3/s (bilanci sedimentari)
- Q=1900 m3/s (bilanci sedimentari)
- Q=800 m3/s (condizione di sommergenza dei pennelli)

11.5.4 Il modello numerico 2-D

Nell'ambito del presente studio (come riportato nel capitolo specifico ad esso dedicato) è stato implementato un modello bidimensionale 2-D sia a fondo fisso (dedicato alla verifica delle condizioni di sicurezza idraulica in riferimento alla portata PAI-Tr200) che a fondo mobile (finalizzato alla simulazione degli scenari rappresentativi dell'evoluzione morfologica del corso d'acqua nel medio termine).

La superficie delle singole maglie di calcolo che costituiscono il dominio del modello è compresa tra 250 e 2000 mq, mentre per le aree golenali tale valore è compreso tra un minimo di 2000 mq e

un massimo di 10000 mq, anche se nelle zone in cui la morfologia lo richiede il modello costruisce celle di dimensioni più piccole della soglia impostata per poi accorparle in aree di dimensioni pari alle minime dimensioni impostate durante il calcolo. Nella Figura 333 è riportata la batimetria utilizzata nel modello risultante dall'impiego dei rilievi AIPO 2005; mentre nella Figura 334 è riportata una immagine della griglia di calcolo utilizzata.

La condizione di monte è rappresentata dalla distribuzione sulla sezione di ingresso della portata per unità di larghezza; la condizione al contorno nella sezione di valle è imposta in termini di piezometrica valutata sulla scala delle portate di moto stazionario.

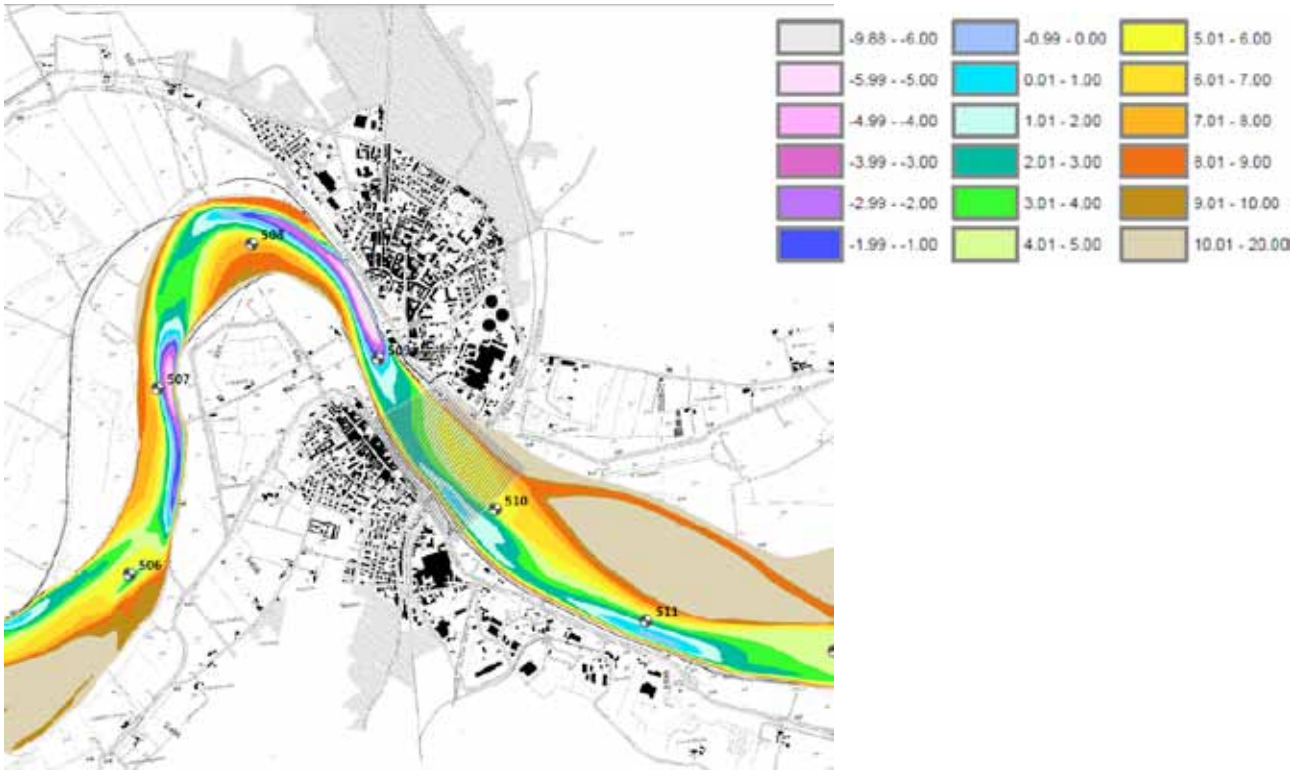


Figura 333 - Particolare relativo alla risvolta di Revere-Ostiglia della batimetria (rilievi 2005) implementata nel modello 2-D (campita l'area di intervento di sistemazione a corrente libera 7V1).

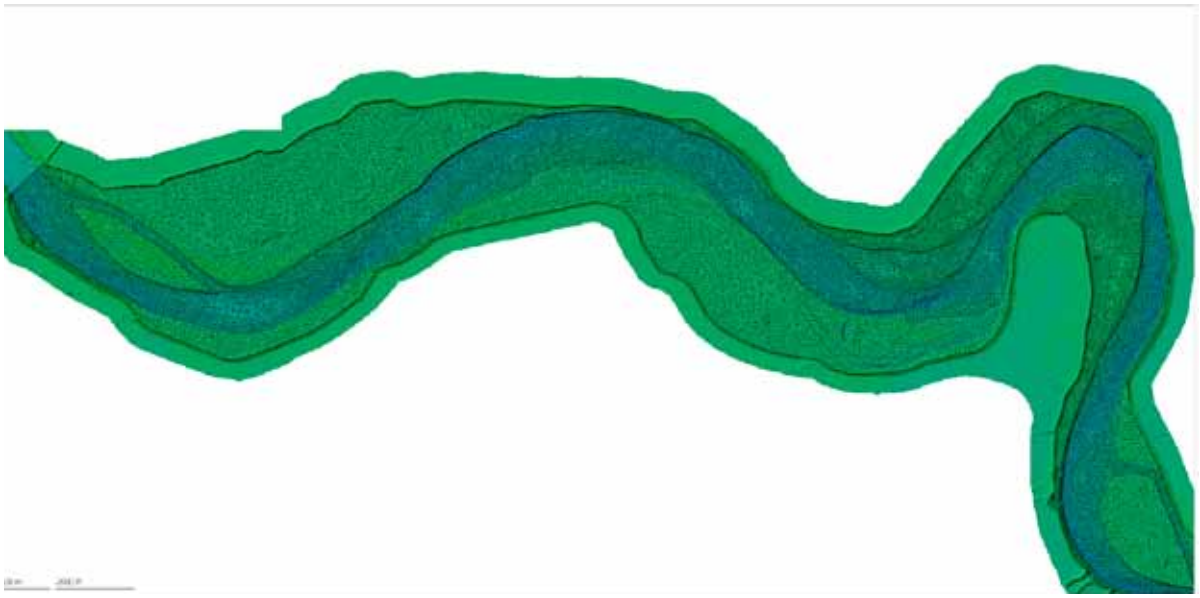


Figura 334 - Modello 2-D. Griglia di calcolo in prossimità della risvolta di Revere Ostiglia

La taratura del modello è stata effettuata per confronto tra lo scenario attuale (in assenza delle opere) ed i livelli misurati in occasione della recente piena del novembre 2000. In tal modo sono stati

definiti i campi dei coefficienti di scabrezza utilizzati per le diverse zone del dominio (fondo alveo, barre, isole, golene boscate, golene coltivate, ecc.) v. Figura 335. La distribuzione e l'entità delle scabrezze ricostruite sul dominio saranno utili in termini di verifica del coefficiente di conduttanza globale valutato in via teorica per il prototipo (v. paragrafo 11.5.5).

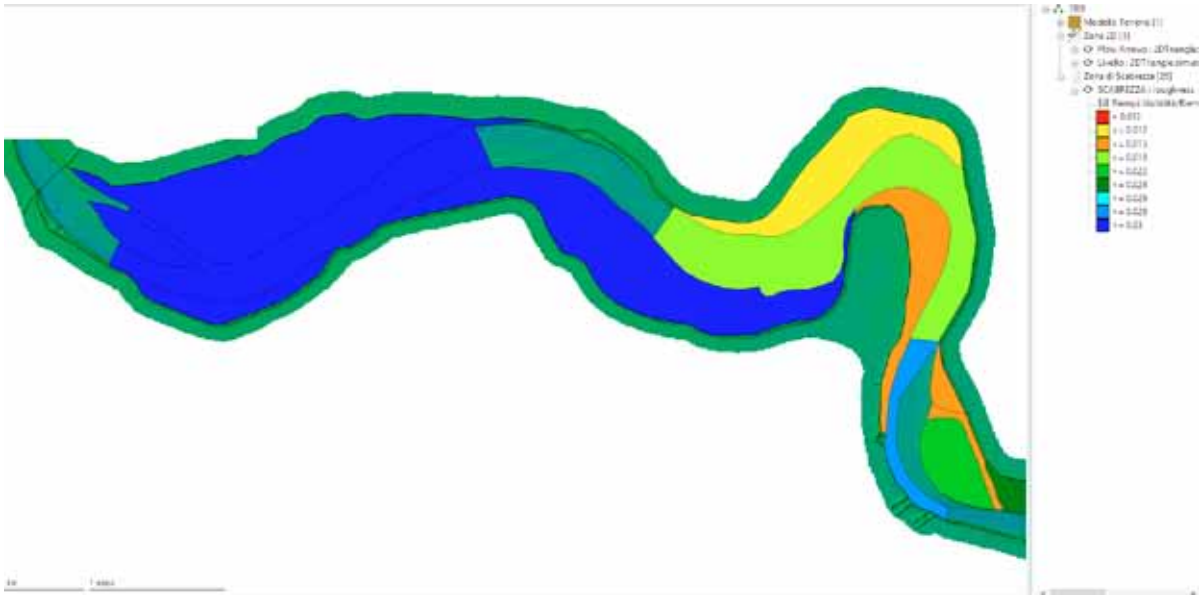


Figura 335 - Ripartizione delle scabrezze lungo il corso d'acqua in prossimità della Risvolta di Revere

Sulla configurazione dello stato attuale nel modello matematico, è stata successivamente implementata la presenza delle opere di sistemazione a corrente libera, inserendo l'ingombro geometrico delle stesse per la portata PAI-Tr200.

I risultati delle simulazioni 2-D a fondo fisso in presenza delle opere sono riportate nella Figura 336 e nella Figura 337.

I risultati sono stati utilizzati per la caratterizzazione delle principali grandezze idrodinamiche utili alla definizione del modello fisico.

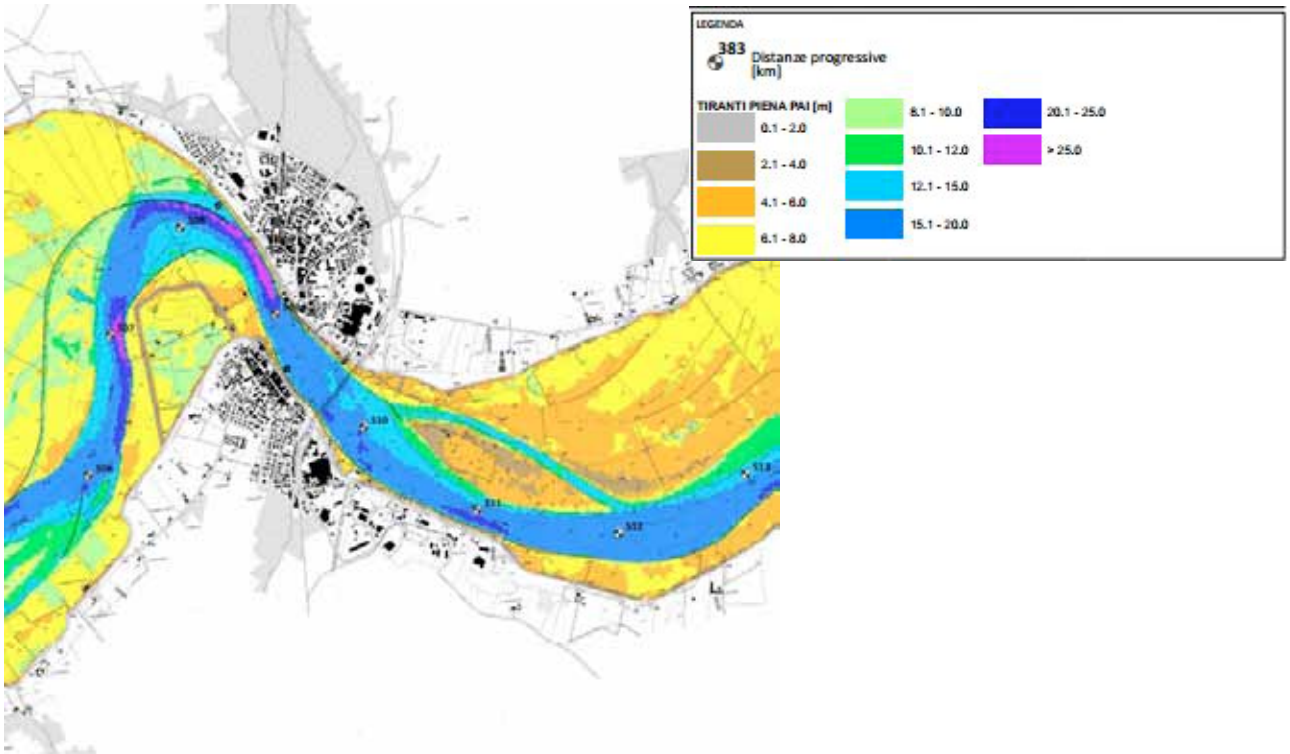


Figura 336 - Risvolta di Revere-Ostiglia – risultati della simulazione 2-D a fondo fisso – Q=13100 m3/s.

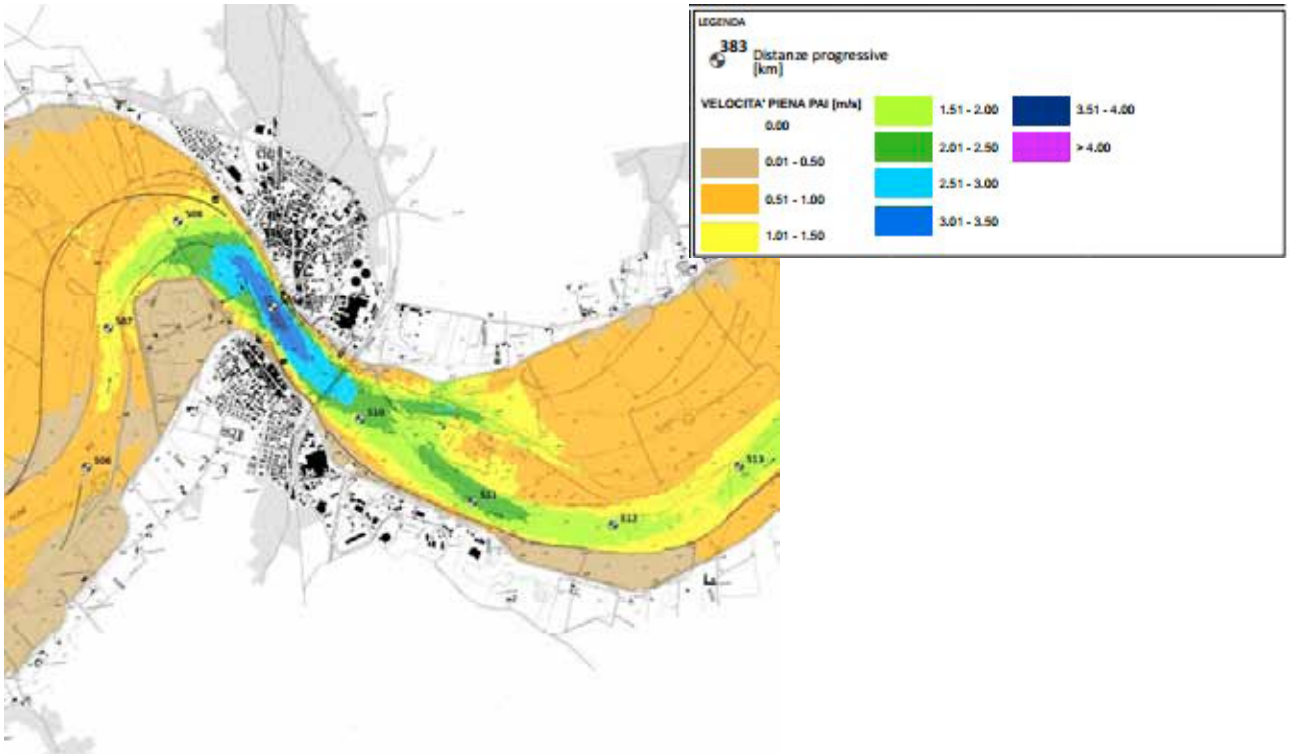


Figura 337 - Risvolta di Revere-Ostiglia – risultati della simulazione 2-D a fondo fisso – Q=13100 m3/s. Velocità della corrente

11.5.5 Criteri di similitudine ed effetti di scala

Nella scelta dei rapporti di scala e di similitudine si fa riferimento alla portata massima in prototipo Q=13'100 m3/s. Per tale portata, sulla scorta dei risultati della modellazione matematica sviluppata, si riscontrano le seguenti caratteristiche idrodinamiche:

PROTOTIPO:

- tirante medio hP=13 m
- velocità media UP=2.5 m/s
- numero di Froude medio FrP=0.22
- diametro medio sedimenti d50P=0.390 mm

In questa fase, la scala geometrica del modello è scelta in riferimento ad un ragionevole ingombro massimo del modello ricompreso all'interno di una sagoma planimetrica rettangolare di dimensioni massime 28x25 m di lato. Rimane inteso che diverse geometrie potranno essere considerate in relazione agli effettivi spazi disponibili nel laboratorio di prova. In riferimento alla scelta preliminare di ingombro del modello fisico, si assegna la scala planimetrica Ly=Lx=1/100. In Figura 338 si riporta la sagoma di ingombro massimo del modello fisico.



Figura 338 - Sagoma di ingombro massimo del modello fisico (scala geometrica planimetrica 1/100)

Mantenendo inalterata la scala verticale (Lz=1/100) ne conseguirebbe, in similitudine di Froude:

- scala delle velocità Lv=1/10
- scala dei sedimenti Ld=1/100

La curva granulometrica del prototipo risulterebbe scalata con diametri compresi tra 0.0017 e 0.0061 mm. Il che implicherebbe l'adozione di sedimenti troppo fini nel modello, con conseguente presenza di fenomeni coesivi che altererebbero il comportamento sedimentologico del modello in similitudine a quello del prototipo.

Pertanto ci si deve orientare su una curva granulometrica distorta rispetto alla scala geometrica. Il che

comporta nel modello l'insorgere di alcuni effetti scala indesiderati che si riflettono principalmente sui rapporti fra condizioni di inizio del trasporto e di risospensione, sulle forme di fondo generate, sulla resistenza al moto globale e sul trasporto solido in sospensione e quindi sulla scala dei tempi sedimentologica, che necessita una taratura empirico sperimentale anche al fine di rideterminare le durate delle singole prove su modello in riferimento alla sola scala dei tempi cinematica.

A queste considerazione si aggiunge quella relativa al rapporto relativo tra le forze viscose ed inerziali che, stante l'alterazione sulla scala geometrica delle particelle, nel modello tende ad amplificare l'effetto delle prime sulle seconde. Per controbilanciare tali fenomeni, scegliendo al tempo stesso di non rinunciare al rapporto di densità unitario tra i sedimenti del prototipo e del modello e scegliendo dimensioni minime dei sedimenti compatibili con il campo delle sabbie (v. Tabella 109), si rende necessario alterare ragionevolmente il rapporto di scala planimetrico e verticale:

- scala planimetrica Lx=Ly=1/100
- scala verticale Lz=1/80

	ds (mm)			
	5%	16%	50%	84%
prototipo	0.170	0.270	0.390	0.610
modello in sim Fr	0.003	0.004	0.006	0.010
modello fisico	0.062	0.098	0.142	0.222

Tabella 109 - Sistemazione a corrente libera risvolta di Revere_Ostiglia. Caratteristiche della curva

Pertanto risulta, in similitudine di Froude:

- scala delle velocità: Lv=1:8.9
- scale sedimenti (Ld=1:64 in similitudine di Froude)
- scala delle portate Lq=1:71554

Applicando la scala sedimentologica in similitudine di Froude, si otterrebbero ancora sedimenti troppo fini (ds=0.003-0.010 mm), che introdurrebbero nel modello forze coesive non presenti nel prototipo. Pertanto si sceglie di fissare il limite inferiore del fuso granulometrico dei sedimenti coincidente con la dimensione minima per le sabbie (i.e. ds= 0.062 mm) e riscalare le rimanenti frazioni in ragione del rapporto 0.170/0.062 della frazione inferiore.

Con riferimento alle condizioni idrodinamiche del prototipo, si può stimare il valore del coefficiente di conduttanza adimensionale di Chezy relativo alla velocità d'attrito u*' associata alla sola scabrezza del materiale di fondo, opportunamente corretta in ragione della formula di Colebrook per il regime di parete diverso da parete scabra:

$$C'_p = 2.5 ln\left(\frac{y_p}{3d_p}\right) + 6 = 29.3$$

Da cui:

$u'_{*p} = 0.09$ m/s

Con riferimento alla formula di Rubey (1933) che ben interpreta il grafico di Figura 339 (assumendo coefficiente di forma 0.7 per le particelle di sabbia), è possibile stimare la velocità di caduta ws delle particelle nel prototipo e nel modello:

w_{sP}=0.051 m/s w_{sM}=0.015 m/s

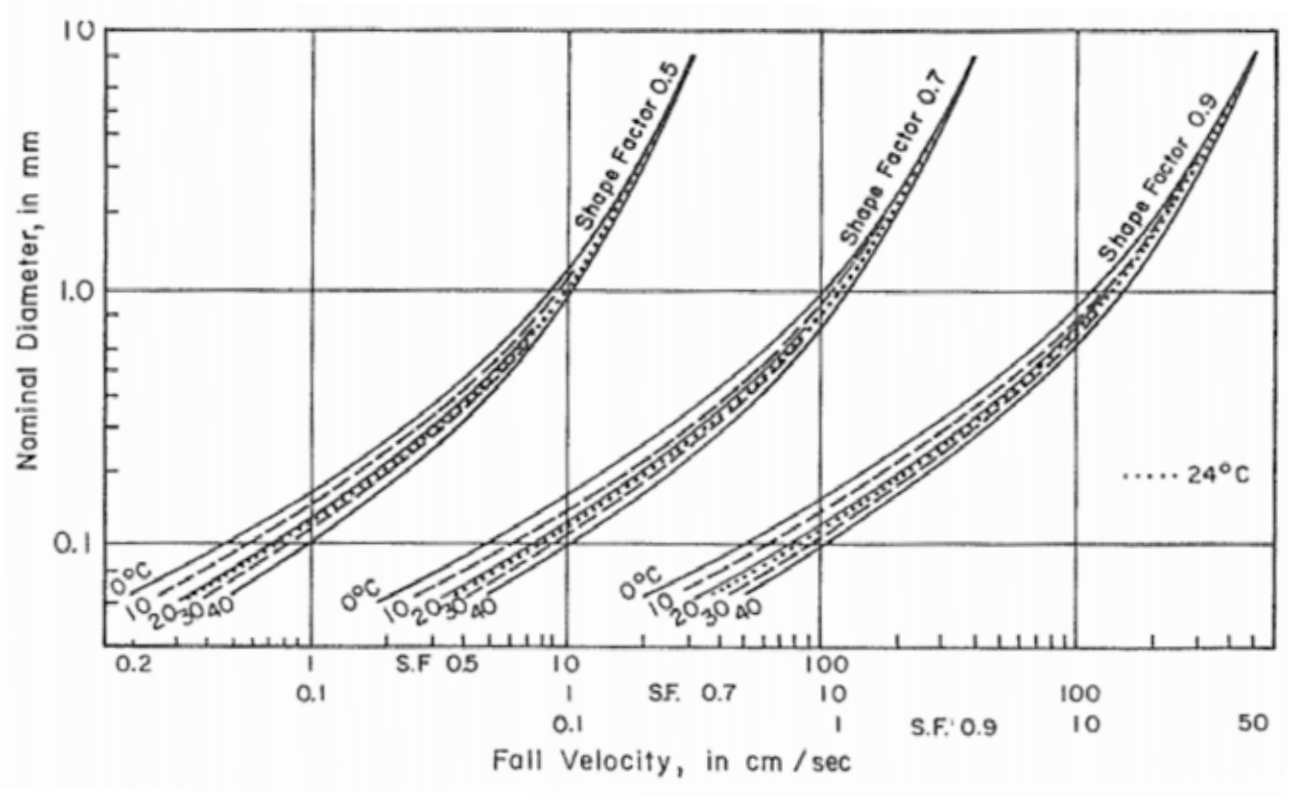


Figura 339 - Velocità di caduta delle particelle naturali in funzione del fattore di forma di Corey (Interagency Report n.12, 1957)

Nel prototipo il rapporto tra velocità di attrito e velocità di caduta delle particelle risulta:

$$\frac{u'_{*P}}{w_{sP}} = 1.7$$

che indica la tendenza delle particelle alla sospensione. Nel modello tale rapporto risulterebbe inferiore all'unità, anche come conseguenza della scelta di un fuso granulometrico scalato nel modello che comporta l'aumento relativo di intensità delle forze viscose passando dal prototipo al modello. Purtuttavia mantenendo tale rapporto anche nel modello:

$$\frac{u'_{*M}}{w_{sM}} = 1.7$$

si ricava facilmente il nuovo valore della velocità di attrito delle particelle:

$u'_{*M} = 0.03$ m/s

Il coefficiente di conduttanza riferito alle particelle, nel modello, risulta:

$$C'_M = 2.5ln\left(\frac{y_M}{3d_M}\right) + 6 = 20.9$$

Che evidenzia una minor scabrezza "di pelle" nel modello rispetto al prototipo. Di conseguenza la velocità media ed il numero di Froude nel modello risultano amplificati, pur rimanendo il numero di Froude nel modello lontano dal valore critico:

$U_M = u'_{*M}\ C'_M = 0.55$ m/s

$$Fr_M \frac{U_M}{\sqrt{g y_M}} = 0.43$$

Facendo riferimento ai grafici di Figura 339 e Figura 340 è possibile verificare il campo di esistenza delle forme di fondo attese nel prototipo e nel modello.

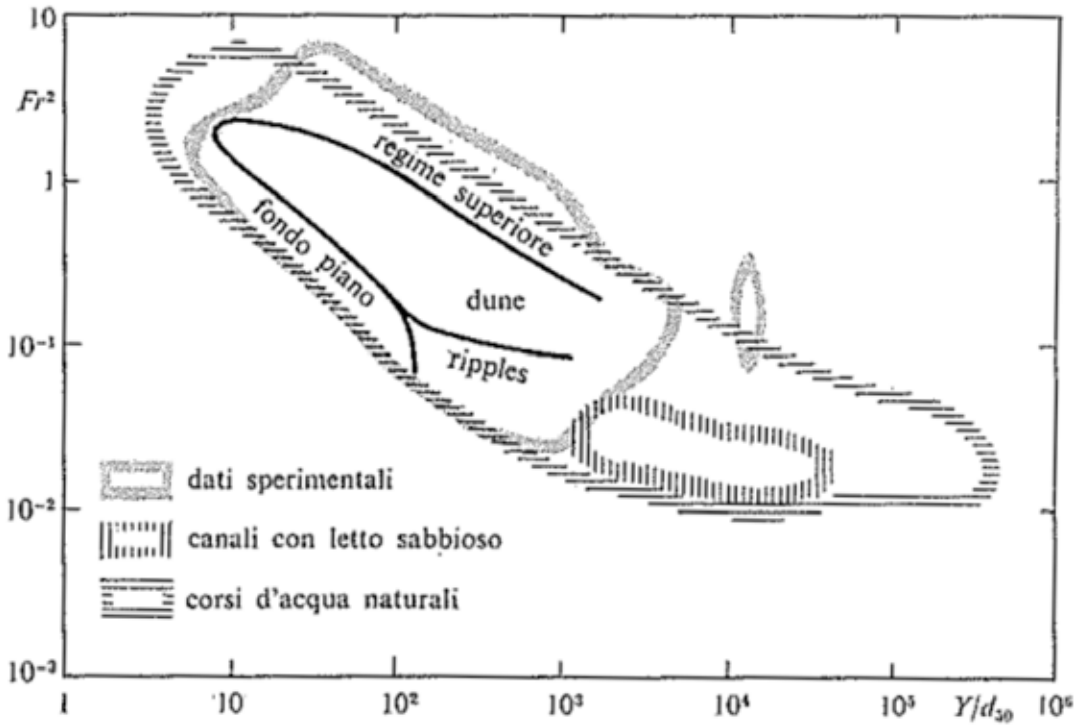


Figura 340 - Campi di moto con modellazione del fondo (Cooper, Peterson e Blench, 1972)

Nel prototipo le forme di fondo tendono ad essere più spianate, conseguenza di una intensità di corrente più marcata di quella del modello. D'altra parte non volendo rinunciare al rapporto unitario di scala per la densità del fluido e dei sedimenti, lo spianamento del letto nel modello potrebbe ottenersi solo a condizione di utilizzare sedimenti di dimensioni molto più piccole del limite inferiore delle sabbie.

Calcolato il numero di Froude relativo alle particelle nel prototipo e nel modello,

$$Fr_s = \frac{U}{\sqrt{g\, d_s}}$$

$Fr_{sP} = 40.4$ $\qquad$ $Fr_{sM} = 14.6$

è possibile ricavare dal diagramma di Alam & Kennedy (v. Figura 341) il valore del coefficiente di conduttanza riferito alle forme di fondo, che risulta rispettivamente nel prototipo e nel modello:

$C_p' = 42.2$ $\qquad$ $C_M' = 13.3$

Assumendo che le resistenze al moto totali siano la somma di quelle associate alla scabrezza delle particelle e di quelle conseguenti la presenza delle forme di fondo, si ottiene il coefficiente di conduttanza totale C, nonché la pendenza motrice media i (di moto uniforme):

$$\left(\frac{1}{C^2}\right) = \left(\frac{1}{C'^2}\right) + \left(\frac{1}{C''^2}\right)$$

$C_p = 24.1$ $\qquad$ $C_M = 11.2$

$$i = \frac{U^2}{C^2 g y}$$

$i_p = 0.08$ m/km $\qquad$ $_M = 1.48$ m/km

Il modello risulta basculato, cioè con pendenza motrice maggiore di quella del prototipo.

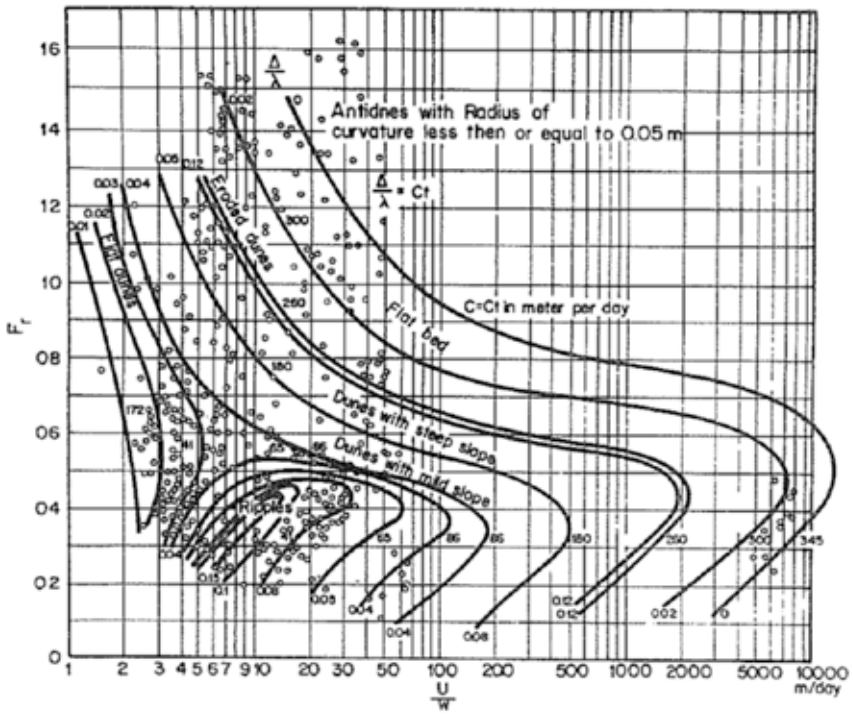


Figura 341 - Geometria a celerità delle forme di fondo (Znamenskaya, 1965)

L'assetto definito per il modello ed in particolare la scelta del materiale costituente l'alveo attivo per le simulazioni a fondo mobile garantiscono un comportamento simile a quello del prototipo, sviluppando forme di fondo paragonabili, pur introducendo un effetto di scala dovuto alla granulometria scelta. Nella Figura 343 è riportato il campo di esistenza delle forme di fondo atteso nel prototipo e nel modello.

In ogni caso occorrerà interpretare opportunamente le risultanze delle modellazioni poiché l'effetto di scala introdotto con la scelta della curva granulometrica nel modello, ha effetto sia sulla condizione di incipiente movimento che sulla risospensione dei sedimenti e sulla dinamica degli scavi localizzati. Nella seguente Tabella 110 si riporta il quadro sintetico dei parametri e delle grandezze caratteristiche del prototipo e del modello.

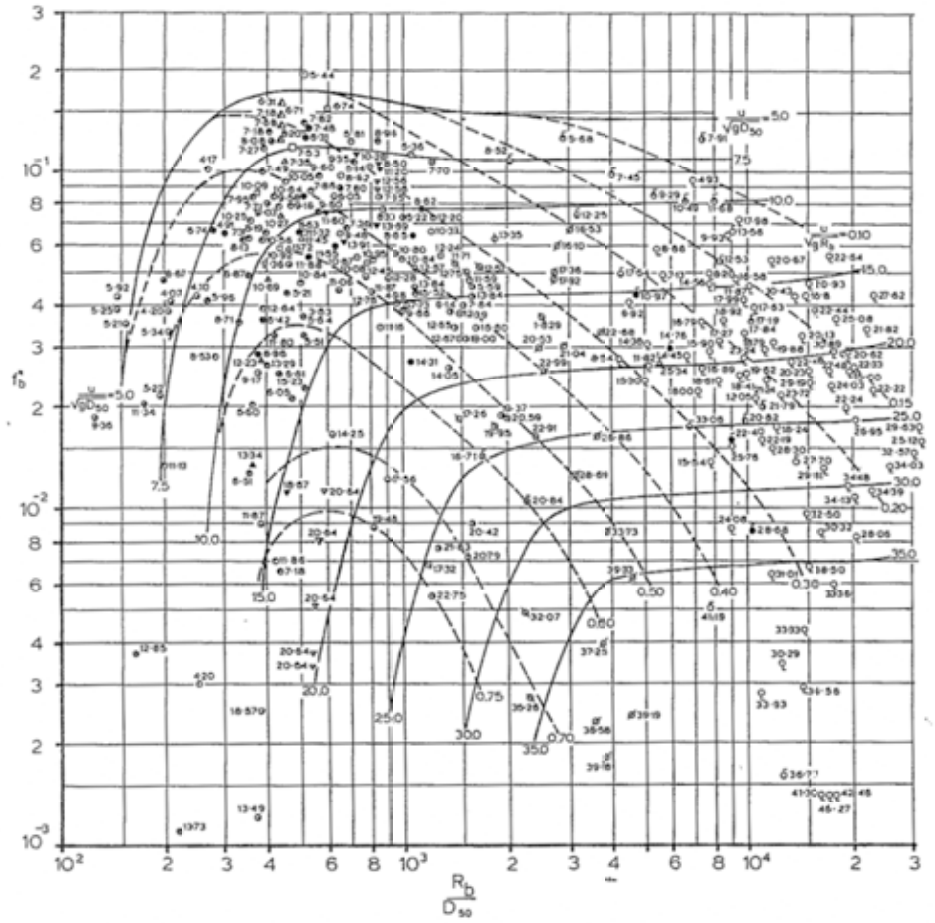


Figura 342 - Coefficiente di resistenza per le forme di fondo (Alam & Kennedy 1969)

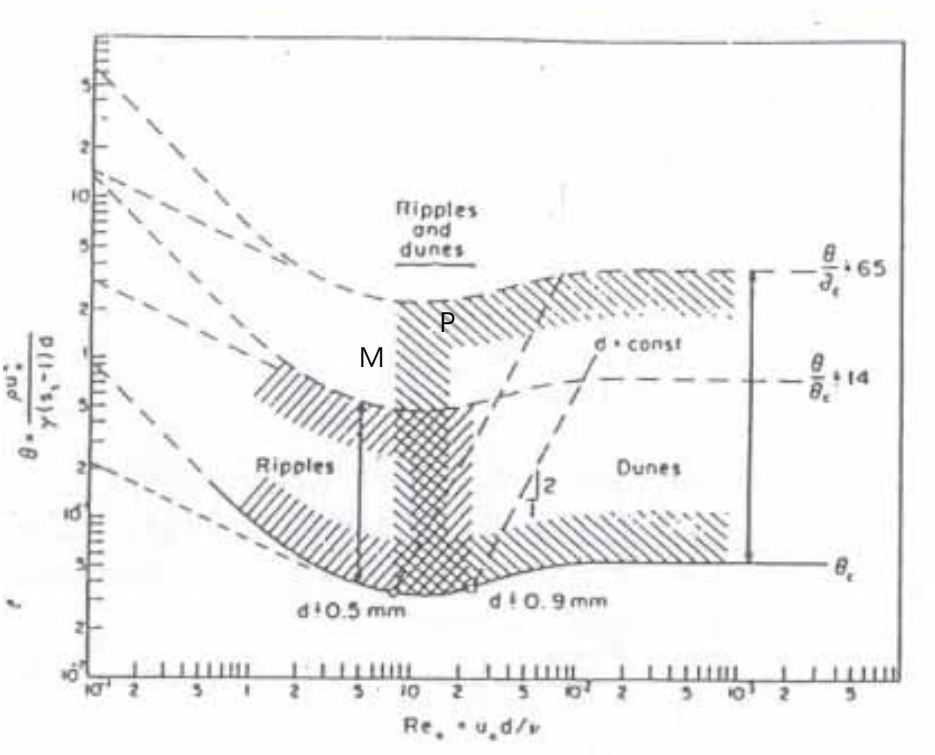


Figura 343 - Criterio di esistenza e caratteristiche delle forme di fondo (Yalin & Ferreira da Silva, 2001)

		Ingombro modello (m)
Lx prototipo (m)	2750	27.5
Ly prototipo (m)	2450	24.5

	Granulometria ds (mm)			
	5%	16%	50%	84%
prototipo	0.170	0.270	0.390	0.610
modello in sim Fr	0.003	0.004	0.006	0.010
modello	0.062	0.098	0.142	0.222

SCALE GEOMETRICHE			
Lx=	1/	100	0.0100
Lz=	1/	80	0.0125

Similitudine di Froude			
Lv	Ld	LQ	Lt
0.112	0.016	1.39754E-05	0.089442719
1/Lv	1/Ld	1/LQ	1/Lt
8.9	64.0	71'554	11.2

PROTOTIPO		MOD Froude	MOD basculato
Q (mc/s)	13100	0.183	
Qc (mc/s)	13100	0.183	
h (m)	13	0.16	0.16
U (m/s)	2.5	0.28	0.55
Fr^2	0.049		0.187
Fr	0.22		0.43
C'	29.3		20.9
u*' (m/s)	0.09		0.03
u*'/ws	1.7		1.7
Frs	40.4		14.6
C''	42.2		13.3
C	24.1		11.2
Sf (m/km	0.08		1.48
ws(m/s)	0.051		0.015
h/ds	33333		1142
U/ws	48.74		35.45
Teta	1.71		1.02
Re*	28.06		6.91

Tabella 110 - Quadro sintetico parametri e grandezze del modello fisico

12 BARRIERA ANTISALE

La definizione degli interventi di regimazione e delle opere di sistemazione a corrente libera è stata corredata da uno studio di massima di un'opera volta a contrastare la risalita del cuneo salino nel delta del Po.

Tale intervento si configura come opera integrativa di sistemazione del corso d'acqua.

La barriera antisale, caratterizzata in modo da costituire anche un nuovo attraversamento stradale ad integrazione della viabilità esistente, sarà quindi ubicata sul ramo del Po della Pila, immediatamente a monte del canale di presa dell'impianto termoelettrico di ENEL, situato sull'isola di Polesine Camerini (Figura 344). Le sezioni fluviali in questo tratto si presentano regolari, con quote del fondo a profondità di circa -5.0 m s.m.

L'opera ha una larghezza complessiva di circa 325 m.



Figura 344 – Ubicazione della barriera antisale.

Le caratteristiche dell'opera sono state definite per rispondere ai seguenti obiettivi:

- efficacia dell'azione di ritenuta con possibilità di regolazione automatica dei livelli a monte;
- compatibilità con eventi di piena e di mareggiata,
- sicurezza di funzionamento in caso di piena;
- funzionalità dal punto di vista della manovra e manutenzione degli organi mobili;
- opera transitabile;
- compatibilità con esigenze di navigazione.

La configurazione progettuale è stata scelta per assicurare il minor ingombro possibile delle strutture in alveo, e quindi per minimizzare l'influenza sul deflusso delle acque e del materiale flottante in piena, quando lo sbarramento risulterà completamente aperto.

La configurazione dell'opera, così come ad oggi elaborata, prevede una conca di navigazione in sinistra idraulica per consentire il superamento dello sbarramento alle imbarcazioni da diporto e da lavoro, comunemente transitanti in questo tratto d'alveo.

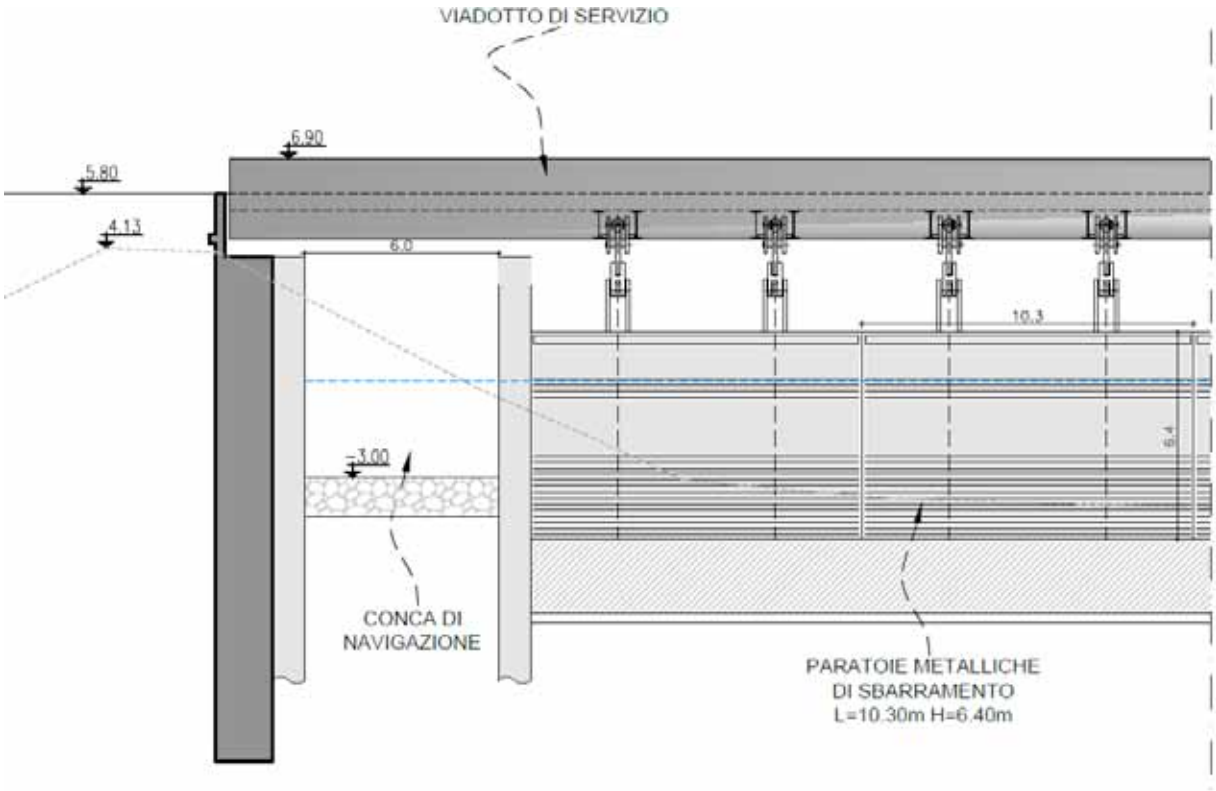


Figura 345 – Ipotesi di sezione longitudinale della barriera antisale in corrispondenza della spalla sinistra a ridosso della quale è ricavata una conca di navigazione.

Si prevede di realizzare una barriera suddivisa in 10 luci, di cui 9 dotate di paratoie di regolazione.

Il manufatto sarà quindi dotato di 9 pile in alveo, fondate su pali di diametro 600 mm, adeguate a sostenere l'impalcato del ponte sovrastante, di spessore pari a 1.5 m, larghezza di 22.5 m e altezza di 9.15 m. La testa dei pali è collegata da una zattera di fondazione in c.a. di dimensioni pari a: 23.5 m (lunghezza), 5 m (larghezza), 1.8 m (spessore).

In corrispondenza delle paratoie del manufatto è prevista una platea in c.a. di collegamento tra le pile in alveo, il cui estradosso è a quota -4.9 m s.m., necessaria al fissaggio sul fondo delle paratoie di sbarramento in posizione di chiusura. A valle delle paratoie la platea va a quota -5.4 m s.m.

I gruppi di manovra delle paratoie risultano appoggiati sulle travi secondarie del ponte che sovrasta la barriera. Le paratoie metalliche a ventola sono incernierate superiormente alla struttura del ponte. L'altezza del singolo elemento sarà di 6.5 m (Figura 346).

Il livello massimo di regolazione a monte dello sbarramento è pari a +1.5 m s.m.

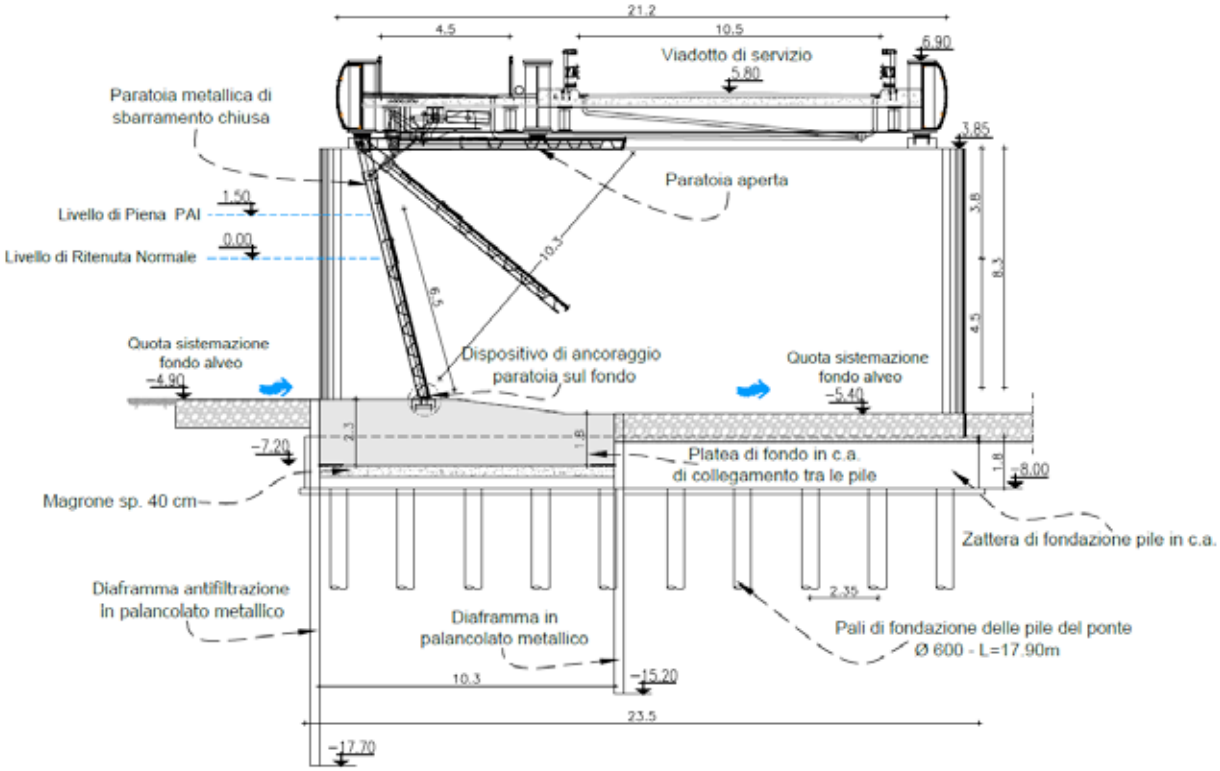


Figura 346 – Ipotesi di sezione trasversale della barriera antisale

La platea sarà delimitata a monte e a valle da palancole infisse rispettivamente fino a quota -17.20 e -15.20 m s.m., aventi una duplice funzione:

- funzione strutturale, in fase di esercizio;
- funzione di contenimento in fase di cantiere.

Si prevede infatti che l'opera sia realizzata per conci successivi (5 conci), e che le fasi di lavoro prevedano:

- Fase 1: infissione di palancolato metallico, prosciugamento dell'area interclusa, dragaggio fino a quota magrone, abbassamento della falda con emungimento da pozzi;
- Fase 2: getto del magrone, abbassamento della falda con emungimento da pozzi,

predisposizione di armature e getto platea;

- Fase 3: installazione predisposizioni per aggancio paratoie, opere finitura, taglio delle palancole a quota di progetto.

Dal punto di vista idraulico, il Consorzio di Bonifica Delta del Po, mediante implementazione di un modello di calcolo bidimensionale, ha valutato la ripartizione delle portate nei diversi rami del delta per diverse condizioni di portata a Pontelagoscuro comprese tra 200 e 800 m^3/s, sia nello stato di fatto che nello stato di progetto.

I risultati di questo studio mostrano che:

- nello stato attuale, la portata media che transita nel Po di Pila è circa il 50% di quella totale a Pontelagoscuro;
- l'effetto dello sbarramento risulta significativo nel Po di Tolle e nel Po di Maistra, che vedono quasi raddoppiare le portate defluenti, mentre risulta minimo per il Po di Goro, troppo lontano per essere influenzato dall'opera;

gli effetti dello sbarramento in termini di livelli si traducono in un aumento rispetto allo stato di fatto compreso tra 8 cm, per portata di 200 m^3/s, e 36 cm per portata di 800 m^3/s, immediatamente a monte dell'opera. Tale incremento di livello si attenua progressivamente procedendo verso monte, con un sovralzo quasi nullo a Po di Goro.

La progettazione della barriera antisale, il cui costo è stimato in circa 60 M€ come riportato in Tabella 111, verrà quindi sviluppata nelle fasi successive di studio con Consorzio di Bonifica Delta del Po e con la Regione del Veneto.

La progettazione dovrà essere supportata sia da indagini (rilievi batimetrici aggiornati, qualità delle acque, prove geotecniche in sito e in laboratorio) sia da un modello fisico dell'opera.

1	Cantiere	6.3	6.3
2	Manufatto		37.4
2.1	Movimenti terra	1.5	
2.2	Fondazioni (diaframmi - palancole)	8.5	
2.3	Opere in c.a.	5.0	
2.4	Opere di carpenteria metallica (struttura in acciaio sostegno paratoie - sbarramento, ponte, strutture di appoggio e giunti)	7.3	
2.5	Organi elettromeccanici	12.9	
2.6	Conca di navigazione	1.2	
2.7	Opere accessorie	0.8	
3	Totale opere (1+2)		43.5
4	Costi addizionali		16.5
4.1	Imprevisti (5% di 3)	2.2	
4.2	Espropri, indennizzi (1% di 3)	0.4	
4.3	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 3)	4.3	
4.4	IVA (22% di 3)	9.6	
5	Costo totale (3+4)		60.0

Tabella 111 – Stima del costo della barriera antisale (€ x 1.000.000)

I costi annui di gestione (intesi come somma dei costi di manutenzione ordinaria e straordinaria) sono valutati, analogamente a quanto già esposto per le opere di regimazione (par. 7.3.4.2), considerando le seguenti percentuali dei costi di costruzione delle opere soggette a manutenzione (escludendo quindi i costi delle opere provvisionali di cantiere e dei diaframmi di fondazione):

manutenzione ordinaria opere civili	0,2 % costi di costruzione
manutenzione ordinaria opere elettromeccaniche	0,6 % costi di costruzione
manutenzione straordinaria	0,6 % costi di costruzione

I costi di gestione derivanti dall'applicazione delle suddette percentuali, porta a stimare l'onere di manutenzione della barriera antisale pari a 0,28 M€/anno.

13 CONCLUSIONI

13.1 BREVE PANORAMA DEL TRASPORTO IDROVIARIO EUROPEO

Osservando i principali bacini e distretti produttivi degli altri stati dell'Unione Europea non si può non rilevare come ogni grande capitale o distretto produttivo e sociale, sia servito anche dal trasporto per acqua a standard adeguati.

Navi provenienti dal Marocco, dalla Tunisia, dalla Norvegia e dal Regno Unito sbarcano direttamente le loro merci nei porti sulla Senna a monte di Parigi. Il trasporto idroviario sul Reno serve i porti di Strasburgo e Basilea, ad oltre 800 km dal mare del Nord. Lungo il Danubio, dal mar Nero e per migliaia di chilometri fino ai centri industriali della Baviera, Norimberga, Ratisbona, Passau, e dell'Austria, Vienna, Linz, ecc., sono collegati con il trasporto per acqua. Il nodo di Berlino sta vedendo imponenti realizzazioni per rendere efficienti i collegamenti idroviari al mare del Nord, all'Elba e all'Oder.

Il bacino del Reno e del Danubio sono ormai collegati attraverso il canale Reno-Meno-Danubio, inaugurato nel 1992, che già vede notevoli flussi di traffico.

In Francia si sta costruendo il canale di collegamento tra il Rodano, oggi ottimamente navigabile fino a monte di Lione, e il Reno, in corrispondenza di Mulhouse nella regione di Strasburgo, realizzando così il primo collegamento per acque interne tra il mar Mediterraneo e il mare del Nord, attraverso i grandi bacini industriali dell'Alsazia e delle regioni renane, fino ai grandi porti olandesi.

In tale quadro l'Italia, che può costituire il ponte tra l'Europa e tutte le regioni del Mediterraneo, può utilizzare il Corridoio Adriatico e la Rete Idroviaria Padano-Veneta, integrati nei porti alle reti ferroviarie per i valichi alpini, quale alternativa efficace e molto più rapida rispetto ai porti del Nord Europa e alla lunga navigazione sul Danubio, per l'acquisizione di nuovi mercati e quale servizio competitivo per il proprio sistema produttivo.

Anche ai fini nazionali ricordiamo infatti che, tra le dorsali Milano-Venezia e Milano-Bologna, già fortemente intasate sia sulle reti autostradali che ferroviarie, la Rete Idroviaria penetra come una bisettrice al centro della pianura padana e può assorbire senza problemi rilevanti volumi di traffico, al servizio di una regione territoriale tra le più importanti in Europa, che presenta quasi 20 milioni di abitanti e produce oltre il 50% del PIL nazionale.

Milano inoltre, pur essendo in una regione ricchissima d'acqua ai piedi delle Alpi, è ormai l'unica capitale industriale e commerciale in Europa non ancora servita dal trasporto idroviario e non collegata direttamente al mare.

In questo quadro delle attuali criticità e carenze si colloca la nuova e rilevante opportunità di sviluppo generata dall'inserimento del sistema navigabile del Po e dei canali ad esso collegati tra le reti strategiche europee nell'ambito del Corridoio Mediterraneo, segmento centrale del Corridoio V Transeuropeo che attraversa l'Europa meridionale da Lisbona in Portogallo a Kiev in Ucraina. In particolare in questo programma strategico sono compresi molteplici interventi di rilevante importanza che, insieme ad altri già programmati e/o in corso di attuazione, consentiranno di garantire lo standard di navigabilità commerciale di classe Va CEMT nel Po e canali collegati, da Milano al mare Adriatico, quali i seguenti:

- costruzione della nuova conca di Isola Serafini (in atto)
- adeguamento dei punti critici lungo il canale Fissero Tartaro Canal Bianco
- costruzione di un bacino di evoluzione a Porto Levante
- adeguamento del canale Boicelli nel ferrarese con l'adeguamento di due ponti e due botti sifone

- miglioramento della navigabilità del Po da Cremona al Po di Goro (presente studio)
- progetto del nuovo canale navigabile Milano-Cremona (studio di fattibilità concluso).

13.2 CRITERI GENERALI DI ANALISI COMPARATIVA MULTI-OBIETTIVO

Uno dei principali obiettivi del presente studio è quello di fornire un'analisi oggettiva degli effetti indotti dagli interventi previsti nei due diversi scenari di intervento, regimazione e sistemazione a corrente libera, che consenta di operare un confronto tra le diverse soluzioni qui proposte e di fornire un supporto nella definizione delle azioni che occorre intraprendere, non solo ai fini della navigabilità, ma anche in relazione alla necessità di recupero morfologico dell'alveo inciso e di difesa idraulica nell'intero tratto compreso tra il Porto di Cremona e il Delta

Nell'ambito delle attività condotte nel presente studio sono state affrontate le seguenti tematiche:

- navigabilità del fiume;
- trasporto solido, assetto e dinamiche morfologiche del fiume;
- sicurezza idraulica.

Nell'ambito di altri studi, in particolare quello condotto nell'ambito del Servizio n. 2 sono state prese in considerazione altre tematiche, in particolare:

falda freatica, il reticolo idrico superficiale e le aree golenali ed extra-golenali;

- ambienti ripariali;
- cuneo salino;
- qualità delle acque.

Si ricorda che la soluzione progettuale consistente nella regimazione con traverse di sostegno dei livelli idrici di magra è stata impostata fin dagli Studi AIPo del 2009 con le molteplici finalità che qui si richiamano nuovamente:

- consentire la navigazione del fiume Po con navigli di classe Va per 365 giorni all'anno;
- incentivare un possibile riequilibrio idraulico/morfologico del fiume con conseguente recupero morfologico delle dinamiche fluviali;
- produrre energia idroelettrica da fonte rinnovabile;
- migliorare le possibilità di derivazione a fini irrigui;
- innalzare e stabilizzare le falde freatiche;
- disporre di una maggiore risorsa idrica da gestire durante i periodi particolarmente siccitosi per poter contrastare la risalita del cuneo salino nella zona del delta;
- incentivare la riqualificazione paesistica ed ambientale;
- non alterare il regime delle piene fluviali e non indurre impatti sulla stabilità del sistema arginale.

Il progetto di sistemazione a corrente libera si pone come obbiettivi:

- garantire condizioni di navigabilità fissate a 340 gg/anno con tirante di 2.0 m, con possibilità di navigare anche in condizioni di magra straordinaria con interventi locali e temporanei di dragaggi del corridoio navigabile;
- stabilizzare la configurazione planimetrica dell'alveo di magra a vantaggio della stabilità delle opere di difesa;
- mantenere l'attuale dinamica e morfologia fluviale (continuità longitudinale, sinuosità) nei regimi delle basse portate;
- non alterare il regime delle piene fluviali;
- non indurre impatti sulle aree esterne all'alveo inciso;

- integrare gli interventi di stabilizzazione del canale di magra con interventi di riattivazione e riqualificazione delle lanche.

Nell'analisi dell'intero sviluppo del Po da Cremona al Po di Goro valgono le seguenti considerazioni:

- *tratto di circa 120 km* da Cremona a foce Mincio: è interessato da entrambi i progetti, cioè sia dalle traverse n. 1, 2, 3 sia dalle opere di sistemazione a corrente libera che in tale tratto sono già state estesamente costruite, come si è visto, e sono solo parzialmente da completare in base al progetto definitivo AIPo già approvato. In questo tratto quindi il confronto multi-obiettivo tra le due ipotesi progettuali è importante al fine di mettere in luce se le opere di sistemazione a corrente libera già esistenti o programmate siano già da sole sufficienti per le esigenze di navigazione e di sicurezza e per l'equilibrio morfologico, ambientale e paesaggistico del Po o se il progetto di regimazione possa consentire di raggiungere, insieme alle suddette opere di sistemazione a corrente libera, quelle già estesamente esistenti e quelle progettate, le finalità complessive non assicurate da queste ultime;
- *tratto di circa 60 km da foce Mincio a Stienta*: è interessato dalle traverse n. 4 e 5 e dal loro profilo di rigurgito e nel quale le esistenti opere di sistemazione a corrente libera sono di scarsa entità. In questo tratto quindi ha senso il mettere a confronto le due suddette ipotesi progettuali dal momento che nell'ipotesi della regimazione il profilo di rigurgito indotto dalle traverse garantirebbe ovunque la navigabilità e implicherebbe quindi una ben minore necessità di nuovi interventi di sistemazione a corrente libera salvo nel tratto immediatamente a valle della traversa n. 4 ove si attenua o si annulla del tutto il suddetto effetto di rigurgito. In alternativa l'ipotesi di sistemazione a corrente libera prevede una serie di opere di regolazione del filone della corrente di interesse per la navigazione e per la sicurezza degli argini. In questo tratto quindi il confronto multi-obiettivo tra le due soluzioni ha lo scopo di evidenziarne i rispettivi costi-benefici e poter quindi fornire elementi utili per decidere sulla scelta o dell'una o dell'altra o della combinazione migliore delle due soluzioni;
- *tratto di circa 50 km da Stienta al Po di Goro*: in tale tratto non è prevista alcuna traversa di regimazione. In esso quindi resta definitivo il regime idrico di corrente libera e la navigabilità e la sicurezza degli argini possono essere assicurate solo dal progetto di sistemazione a corrente libera. Pertanto, la sistemazione a corrente libera di tale tratto diventa la condizione al contorno della navigazione per quel che riguarda tiranti, giorni navigabili e capacità trasportistica. Si ricorda a tal proposito che la possibilità di utilizzare il Fissero-Tartaro-Canal Bianco quale alternativa all'asta principale del fiume, da varie parti ipotizzata, risulta non percorribile, almeno per le classi di imbarcazioni previste, per le varie limitazioni presenti lungo il suo tracciato, quali raggi di curvatura troppo stretti, visuali libere insufficienti e altezze sotto alcuni ponti inadeguate.

Nell'ottica della priorità strategica del potenziamento della navigazione fluviale in Po, base fondamentale del progetto "Sistema idroviario del Po 365 – Progetto preliminare per migliorare la navigabilità dal porto di Cremona al mare Adriatico – 2012-IT-91076-S", occorre anche osservare che l'inserimento delle traverse, a fronte di maggiori garanzie relativamente ai tiranti idraulici necessari alla navigazione, introduce dei vincoli nei confronti della capacità di trasporto della via navigabile, a causa dei tempi tecnici necessari alle operazioni di concata che non esistono nel caso di via navigabile libera da infrastrutture di questo tipo. A tal proposito occorre osservare che le dimensioni delle eventuali conche di navigazione risultano fondamentali per definire la quantità di merci transitabile lungo la via d'acqua. Si ricorda a questo proposito, che tutte le principali reti idroviarie europee poste lungo le grandi vie d'acqua, Danubio, Reno, Rodano, ecc., presentano in corrispondenza degli sbarramenti conche di navigazione, sia singole che doppie, di dimensioni pari molto spesso al doppio di quelle minime richieste per la classe Va sia in termini di larghezza che di lunghezza. Pertanto, potrà essere necessario prevedere, in corrispondenza delle eventuali traverse da realizzare, conche di navigazione di dimensioni più elevate rispetto a quelle strettamente necessarie alla classe Va CEMT, in modo che tali infrastrutture non introducano dei vincoli e delle limitazioni nei confronti della capacità di trasporto della via navigabile.

Si sottolinea che il processo di valutazione comparativa non pretende di definire in maniera univoca l'alternativa progettuale "migliore", ma di rendere evidenti i vantaggi e le criticità di ciascuna di

esse, in relazione ai diversi criteri di valutazione, favorendo la successiva fase di discussione e di individuazione dell'approccio progettuale da intraprendere.

Le analisi in atto e future potranno dare evidenza anche di eventuali soluzioni compensative e integrative tra i due diversi scenari di progetto, in un'ottica di ottimizzazione delle soluzioni al fine di permettere il conseguimento dei molteplici obiettivi. A tal proposito può quindi risultare di interesse confrontare le due soluzioni base con la soluzione integrata delineata nel Cap. 8 che, avendo valutato la complementarietà tra le opere di regimazione e quelle di sistemazione a corrente libera, consiste nella realizzazione delle sole tre traverse 1, 2, 4 e nella costruzione delle opere a corrente libera in tutti i tratti non interessati dal sostegno generato dalle tre traverse.

13.3 ANALISI COMPARATIVA DEI TRE SCENARI PROGETTUALI

Nella tabella successiva, con riferimento alle tematiche affrontate nel presente studio, vengono riepilogate le peculiarità principali che caratterizzano le due soluzioni progettuali base e la soluzione integrata in termini dei rispettivi vantaggi e criticità.

Tale riepilogo richiama le analisi, i risultati e le considerazioni svolti in precedenza in merito a tutti i diversi aspetti esaminati e cioè gli aspetti progettuali e di costo dei tre scenari di soluzione, nonché le loro caratteristiche in termini di ricadute sul potenziamento della capacità navigazionale del Po, sulla possibilità di recupero morfologico del corridoio fluviale, sulla sicurezza idraulica nei confronti delle piene straordinarie del fiume, sulla possibilità di recuperi energetici da fonte rinnovabile.

Il riepilogo non richiama altri aspetti, pure di rilevante interesse, riguardanti l'influenza dei diversi scenari progettuali sulle falde, sulle derivazioni a fini agricoli e potabili e sui sistemi di bonifica, sulla possibilità di contrastare l'intrusione del cuneo salino dell'area del Delta del Po in occasione di periodi di magra, sulle possibilità di aumentare le riserve idriche strategiche per compensare periodi di siccità eccezionale, per i quali si rimanda agli altri studi di dettaglio contemporaneamente commissionati da AIPo.

	PROGETTO DI REGIMAZIONE (n. 5 Traverse di sostegno tra Cremona e Stienta + opere di sistemazione a corrente libera da Stienta al Po di Goro)		PROGETTO DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA (opere esistenti da Cremona a foce Mincio + opere nuove da foce Mincio al Po di Goro)		SOLUZIONE INTEGRATA (n. 3 Traverse tra Cremona e Quingentole + sistemazione a Corrente libera da Quingentole al Po di Goro)	
ASPETTO	VANTAGGI	CRITICITA	VANTAGGI	CRITICITA	VANTAGGI	CRITICITA
NAVIGAZIONE	365 gg/anno nel tratto fino a Stienta regimato con le 5 traverse (L=180 km) 340 gg/anno nel tratto da Stienta al Po di Goro (L=50 km)	Necessità di completare comunque a corrente libera il tratto a valle della quinta traversa di Stienta. Circa un mese/anno di ridotta possibilità di navigazione per bassi fondali nei tratti sistemati a corrente libera. le conche impongono un limite superiore alla capacità di trasporto della via navigabile dovuto ai tempi necessari all'effettuazione delle concate	340 gg/anno su tutto il tratto da Cremona al Po di Goro (L=230 km) La via navigabile ha una capacità potenzialmente illimitata grazie all'assenza di conche di navigazione	Circa un mese/anno di ridotta possibilità di navigazione per bassi fondali su tutto il tratto da Cremona al Po di Goro.	365 gg/anno nei tratti da Cremona a foce Parma (L=53 km) e da foce Oglio a Quingentole (L=43 km) interessati dal sostegno delle 3 traverse 340 gg/anno nei tratti da foce Parma a foce Oglio (L=33 km) e da Quingentole al Po di Goro (L=100 km) interessati dalle opere a corrente libera	Circa un mese/anno di ridotta possibilità di navigazione per bassi fondali nei tratti sistemati a corrente libera.
POTENZIALITÀ DI PRODUZIONE ENERGIA IDROELETTRICA	SI (635 GWh/anno con centrale esterna alla traversa) 550 GWh/anno con centrale nella traversa)	da approfondire la fattibilità tecnica delle centrali idroelettriche annesse alle 5 traverse; da approfondire la redditività dell'investimento in relazione al valore dell'energia da fonte rinnovabile	NO		SI (400 GWh/anno con centrale esterna alla traversa) 360 GWh/anno con centrale nella traversa)	da approfondire la fattibilità tecnica delle centrali idroelettriche annesse alle 3 traverse; da approfondire la redditività dell'investimento in relazione al valore dell'energia da fonte rinnovabile
MORFOLOGIA E TRASPORTO SOLIDO DI FONDO	Nel tratto regimato: innalzamento del livello idrico nel tratto regimato con le 5 traverse e conseguenti recuperi morfologici ampliamento della larghezza dell'alveo di magra con incremento della continuità morfologica trasversale contrasto all'approfondimento dell'alveo inciso.	Nel tratto regimato: alterazione della continuità longitudinale locale in corrispondenza delle traverse riduzione del trasporto solido al fondo nel tratto regimato (in base alle analisi nel medio termine di 10 anni) fino al nuovo equilibrio sedimentologico di lungo termine (allo stato delle analisi riferite al medio termine di 10 anni, l'effetto riduttivo si propaga limitatamente fino al Delta) possibili fenomeni erosivi localizzati a valle delle traverse. Nel tratto a corrente libera: approfondimento e canalizzazione dell'alveo di magra abbassamento del livello idrico nei regimi di magra e medio accentuazione della capacità erosiva della corrente nell'alveo canalizzato.	Mantenimento della continuità longitudinale del trasporto solido	approfondimento e canalizzazione dell'alveo di magra abbassamento del livello idrico nei regimi di magra e medi accentuazione della capacità erosiva della corrente nell'alveo canalizzato.	Nel tratto regimato: innalzamento del livello idrico nel tratto regimato con le 3 traverse e conseguenti recuperi morfologici ampliamento della larghezza dell'alveo di magra con incremento della continuità morfologica trasversale contrasto all'approfondimento dell'alveo inciso.	Nel tratto regimato: alterazione della continuità longitudinale locale in corrispondenza delle traverse riduzione del trasporto solido al fondo nel tratto regimato (in base alle analisi nel medio termine di 10 anni) fino al nuovo equilibrio sedimentologico di lungo termine (allo stato delle analisi riferite al medio termine di 10 anni, l'effetto riduttivo si propaga limitatamente fino al Delta) possibili fenomeni erosivi localizzati a valle delle traverse Nel tratto a corrente libera: approfondimento e canalizzazione dell'alveo di magra abbassamento del livello idrico nei regimi di magra e medio accentuazione della capacità erosiva della corrente nell'alveo canalizzato.

SICUREZZA IDRAULICA		Nel tratto regimato con le traverse di sostegno: le traverse e le relative opere accessorie (conca di navigazione, ecc.) modificano localmente il campo di moto della corrente sia in magra che in piena; tuttavia le modellazioni 2D confermano l'assenza di modifiche nei livelli idrici che si generano in presenza della piena di riferimento PAI. Nel tratto sistemato a corrente libera: le opere (pennelli, ecc.) modificano il campo di moto in magra e in piena; la presenza dei pennelli longitudinali e trasversali incrementa la sicurezza strutturale degli argini maestri ove questi sono vicini all'alveo di magra.		le opere (pennelli, ecc.) modificano il campo di moto in magra e in piena; la presenza dei pennelli longitudinali e trasversali incrementa la sicurezza strutturale degli argini maestri vicini all'alveo di magra.		Nel tratto regimato con le traverse di sostegno: le traverse e le relative opere accessorie (conca di navigazione, ecc.) modificano localmente il campo di moto della corrente sia in magra che in piena; tuttavia le modellazioni 2D confermano l'assenza di modifiche nei livelli idrici che si generano in presenza della piena di riferimento PAI. Nel tratto sistemato a corrente libera: le opere (pennelli, ecc.) modificano il campo di moto in magra e in piena; la presenza dei pennelli longitudinali e trasversali incrementa la sicurezza strutturale degli argini maestri ove questi sono vicini all'alveo di magra.	
COSTI INVESTIMENTO	**Opere base**	3'390 M€ (con centrale idroelettrica esterna) 2'881 M€ (con centrale idroelettrica nella traversa) 2'183 M€ (senza centrale idroelettrica)		616 M€		2'401 M€ (con centrale idroelettrica esterna) 2'094 M€ (con centrale idroelettrica nella traversa) 1'676 M€ (senza centrale idroelettrica)	
	Barriera antisale	60 M€		60 M€		60 M€	
	Totale	3'450 M€ (con centrale idroelettrica esterna) 2'941 M€ (con centrale idroelettrica nella traversa) 2'243 M€ (senza centrale idroelettrica)		676 M€		2'461 M€ (con centrale idroelettrica esterna) 2'154 M€ (con centrale idroelettrica nella traversa) 1'736 M€ (senza centrale idroelettrica)	
COSTI ESERCIZIO	**Opere base**	18 M€/anno (con centrale idroelettrica esterna alla traversa) 16 M€/anno (con centrale idroelettrica nella traversa) 12 M€/anno (senza centrale idroelettrica)		5,46 M€/anno		13,8 M€/anno (con centrale idroelettrica esterna alla traversa) 12,9 M€/anno (con centrale idroelettrica nella traversa) 10 M€/anno (senza centrale idroelettrica)	
	Barriera antisale	0,3 M€		0,3 M€		0,3 M€	
	Totale	18,3 M€/anno (con centrale idroelettrica esterna alla traversa) 16,3 M€/anno (con centrale idroelettrica nella traversa) 12,3 M€/anno (senza centrale idroelettrica)		5,76 M€/anno		14,1 M€/anno (con centrale idroelettrica esterna alla traversa) 13,2 M€/anno (con centrale idroelettrica nella traversa) 10,3 M€/anno (senza centrale idroelettrica)	

Il processo di valutazione multi-obiettivo che occorre effettuare, già da tempo in corso ma che sarà ulteriormente perseguito, deve essere di tipo partecipativo con coinvolgimento dei diversi portatori di interesse al fine di evidenziare sotto diversi punti di vista gli effetti dei tre scenari nei confronti delle rispettive istanze.

13.4 BREVI CONSIDERAZIONI ATTINENTI IL PROGRAMMA DI SVILUPPO PER IL PO

L'obbiettivo di consentire la navigazione sul fiume per il maggior numero di giorni possibili e con un tirante sufficiente al passaggio delle imbarcazioni della classe Va CEMT, deve essere inquadrato in una visione generale che riguarda l'attuale situazione del fiume che da molti anni ormai vede un progressivo declino relativo al trasporto merci lungo il suo percorso, e che deve recuperare progressivamente la sua potenzialità fluviale attraverso una serie di interventi di sicura fattibilità ed efficacia.

La sostenibilità di un progetto di tali dimensioni, al di là di tutti gli altri importanti aspetti legati all'ambiente e al riequilibrio morfologico, si basa sulla capacità di riattivare un interesse per la navigazione commerciale sul fiume. Tale risultato, a patto che ne sussistano i requisiti economici di base, può essere raggiunto soltanto se l'asta fluviale del Po diventa il fulcro di un sistema idroviario complessivo che comprende, oltre al tratto padano del fiume, i terminali a mare e lo speculare terminale interno verso l'area milanese.

Questo comporta che non basta la sistemazione del tronco medio-basso del fiume, da Cremona all'incile del Po di Goro, ma occorre pensare all'intero sistema idroviario padano con la sistemazione dell'asta fluviale, la riqualificazione e il potenziamento dei porti adriatici, il rifacimento della conca in ingresso al porto di Cremona e al successivo canale per Milano, a sua volta da completare nel suo sviluppo verso l'area Milanese, il tutto nell'ottica di realizzare una grande via navigabile dove possano transitare diversi milioni di tonnellate di merci che potrebbero essere tolte dalle altre infrastrutture trasportistiche, con notevoli risparmi in termini di costi e di emissioni inquinanti in un area che, come ribadito anche nel corso dell'ultima conferenza sul clima di Parigi, risulta fra le più inquinate d'Europa. Il trasferimento di una parte importante del traffico commerciale che oggi si svolge prevalentemente lungo le infrastrutture stradali ed autostradali, avrebbe un benefico impatto sia dal punto di vista della sicurezza, sia dal punto di vista della riduzione di emissioni inquinanti responsabili del deterioramento della qualità dell'aria nell'area padana.

14 BIBLIOGRAFIA

AIPo "Progetto preliminare di adeguamento delle condizioni di navigabilità dell'alveo di magra del fiume Po per navi di classe V - Revere – Ferrara".

AIPo (2011) "Progetto definitivo degli interventi relativi alla sistemazione a corrente libera del fiume Po nella tratta compresa tra Isola Serafini e foce Mincio per consentire il transito di una unità di navigazione della Va classe CEMT (MN-E-12/NI-1)".

Alam A.M.Z., Kennedy J.F., 1969, "Friction factors for flow in sand bed channels", Proc. ASCE, 95, HY6, paper 6900, pp. 1973-1992

ARNI (1998) "Studio di fattibilità del sistema idroviario Padano-Veneto".

ARNI e Consorzio Ferrara Ricerche (2007) "Studio di compatibilità degli interventi di progetto in alveo di Po per l'adeguamento delle condizioni di navigabilità dell'alveo di magra per navi di V classe europea nel tratto Palantone Occhiobello".

ARPA Emilia Romagna - Servizio Idrometeorologico - Area Idrologia (dal 2005 al 2013) "Annali idrologici".

Autorità di bacino del fiume Po (2004) "Catasto arginature maestre del fiume Po".

Autorità di bacino del fiume Po (2005 e 2006) "Studio di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po" stralcio Tanaro - Arda e Arda – mare.

Autorità di bacino del fiume Po (2006) "Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)".

Autorità di bacino del fiume Po (2007) "Aggiornamento delle analisi morfologiche e del bilancio del trasporto solido dell'asta del fiume Po da confluenza Stura di Lanzo all'incile del delta (periodo 2002 – 2005) e report di valutazione".

Autorità di bacino del fiume Po (2007) "Rappresentazione delle condizioni di rischio residuale lungo l'asta del fiume Po da Torino al mare: sintesi delle conoscenze e report descrittivi".

Autorità di bacino del fiume Po (2008) "Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta principale del fiume Po".

Cati L. (1981) – "Idrografia e Idrologia del bacino del Po". Pubbl. n. 19 dell'Ufficio Idrografico del Po.

Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W., 1988. "Applied Hydrology". New York, McGraw.

Cooper R.H., Peterson A.W., Blench T., 1972. "A Critical Review of Sediment Transport Experiments", J. Hydraul. Div.,ASCE 9S, HY5,

Galvani I., Pellegrini M., 2007. "Navigare il Po, tra passato e futuro". Cap. 4 del volume: "Un Po di carte. La dinamica fluviale del Po nell'Ottocento e la tavole della Commissione Brioschi". Ed. Diabasis, Reggio Emilia.

Interagency Committee in Water Resources. 1957. " A study of methods used in measurements and analysis of sediment loads in streams", Report n.12, Minneapolis, Minnesota.

Jacobsen R. B., Elliot C. M., Johnson H. E. "Assessment of shallow-Water Habitat Availability in Modified Dike Structures, Lower Missouri River", 2004. U.S. Geological Survej.

Jansen P. Ph. (1979) "Principles of river engineering" Pitman – London.

Julien P. Y. (2002), "River Mechanics". Cambridge – New York.

Lombardini E., (1870). "Guida allo studio dell'idrologia fluviale e dell'idraulica pratica" Milano,

Tipografia degli Ingegneri, 1870.

Paoletti A., Braga G., Colombo A., Croci S., Peduzzi G.B., Savazzi G. (2007) "La gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo inciso del fiume Po", L'Acqua.

Paulo C.F. Erbisti (2014 – 2nd edition) "Design of Hydraulic Gates" CRC Press.

Regione Lombardia con il supporto di AIPo e Infrastrutture Lombarde (2009) "Attività e studi propedeutici relativi alla regimazione del Po nel tratto tra Cremona e foce Mincio - ipotesi, analisi e verifiche preliminari".

Regione Lombardia con il supporto di AIPo e Infrastrutture Lombarde (2009) "Attività e studi propedeutici relativi alla regimazione del Po nel tratto tra Cremona e foce Mincio - studi integrativi".

SIMPO S.p.A. (1984) "Studio della formazione del Piano Generale della navigazione interna Padano-Veneta".

Viganò L., Arillo A., Buffagni A., Camusso M., Ciannarella R., Crosa G., Falugi C., Galassi S., Gazzella L., Lopez A., Mingazzini A., Pagnotta R., Patrolecco L., Tartari G., Valsecchi S., 2003. Quality assessment of bed sediments of the bed sediments of the Po River (Italy). Water Research 37 (2003).

Vignati D., Pardos M., Diserens J., Ugazio G., Thomas R., Dominik J,. 2003. Characterization of bed sediments and suspension of the river Po (Italy) during normal and high flow conditions. Water Research 37 (2003).

Yalin M.S., 1971 "Theory of hydraulics model", Macmillan Education UK

Znamenskaya N.S. (–) "The use of the law of sediment dune movements in computing channel deformations", Sov. Hydr

15 ALLEGATI

15.1 ALLEGATO 1 - RISULTATI DELLE INDAGINI GRANULOMETRICHE

L'allegato riporta i dati e risultati delle osservazioni di campagna e delle analisi di laboratorio sui campioni granulometrici riportati in apposite schede, raggruppate per "tratto omogeneo".

15.2 ALLEGATO 2 - CARTOGRAFIA DELLE TENDENZE EVOLUTIVE IN ATTO NEL PERIODO 2005-2015

L'allegato (scala 1:10'000) riporta i processi morfologici (erosioni e depositi) intervenuti nel periodo 2005-2015 con riferimento alle forme di fondo (sponde e barre).

15.3 ALLEGATO 3 - ANALISI MODELLISTICA BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO DEI BASSI FONDALI ALLO STATO ATTUALE.TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO

L'allegato (scala 1:25'000) riporta i risultati del modello in termini di tiranti idrici presenti nell'alveo di magra e delle larghezze disponibili per la navigazione, con riferimento a differenti valori di portata di magra.

15.4 ALLEGATO 4 - INDIVIDUAZIONE DEI BASSI FONDALI (TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO).

L'allegato (scala 1:25'000) riporta i tratti in cui sono presenti dei bassi fondali, espressi in termini di numero di giorni medi annui con fondale inferiore a 2,00 metri.

15.5 ALLEGATO 5 - IPOTESI DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA (TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO).

L'allegato (scala 1:25'000) riporta la posizione planimetrica e le principali caratteristiche dimensionali delle opere di sistemazione a corrente libera previste nel tratto compreso tra foce Mincio e l'incile del Po di Goro.

15.6 ALLEGATO 6 - APPROFONDIMENTO PROGETTUALE DELLE OPERE RELATIVE ALLA SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA DELL'ASTA DEL FIUME PO (TRATTO DA FOCE MINCIO AL PO DI GORO)

L'allegato riporta la localizzazione delle opere, le planimetrie e le sezioni di progetto delle opere di sistemazione a corrente libera nel tratto da foce Mincio all'incile del Po di Goro.

15.7 ALLEGATO 7 - PROGETTO DI REGIMAZIONE MEDIANTE TRAVERSE DI SOSTEGNO. RISULTATI DEL MODELLO BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO PER LE TRAVERSE N. 1, 2, 3, 4, 5 NELLE DIVERSE SOLUZIONI PROPOSTE.

L'allegato riporta le cartografie con tutte le rappresentazioni del campo di moto ottenute dalle modellazioni della piena PAI Tr200, in termini di tiranti idrici, livelli idrici e velocità della corrente, oltre che delle variazioni dei livelli idrici indotte dalle opere in progetto in riferimento alle condizioni di regime indisturbato.

15.8 ALLEGATO 8 - INGEGNERIA DI MASSIMA DELLE OPERE DI REGIMAZIONE

L'allegato riporta la localizzazione, la planimetria e le sezioni di progetto delle opere di regimazione (traversa, conca di navigazione, centrale idroelettrica, ecc.). In particolare sono riportate tre configurazioni: traversa senza centrale, traversa con centrale tradizionale posta esternamente alla traversa, traversa con centrale posta all'interno della soglia della traversa. Sono riportate anche delle ipotesi di cantierizzazione.

15.9 ALLEGATO 9 - RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DEL MODELLO 2D A FONDO MOBILE

L'allegato (scala 1:25'000) riporta il confronto tra le batimetrie dopo 10 anni relative al progetto di regimazione e di sistemazione a corrente libera, rispetto a quella derivante dallo scenario attuale.

15.10 ALLEGATO 10 - ANALISI CONDIZIONI DI NAVIGABILITÀ CON MODELLO 2D A FONDO FISSO

L'allegato (scala 1:25'000) riporta i tiranti idrici (maggiori e minori di 2.20 m) per i 3 assetti considerati (attuale, corrente libera, regimazione) per Q340gg e Q=350 m3/s

15.11 ALLEGATO 11 - RISULTATI DEL MODELLO IDRAULICO 2D A FONDO FISSO DELLO STATO ATTUALE CON RIFERIMENTO ALLA PIENA PAI

L'allegato (scala 1:25'000) riporta per l'assetto attuale del Po, i livelli idrici per la piena del 200 e i livelli idrici, i tiranti e le velocità relative alla piena PAI, da Cremona al Po di Goro e la caratterizzazione degli argini maestri in relazione all'entità del franco idraulico.

15.12 ALLEGATO 12 - RENDERING DELLE OPERE DI REGIMAZIONE

L'allegato riporta i render e i fotoinserimenti relativi alle prime due traverse, realizzati secondo diversi punti di vista, ottenuti a partire dai modelli tridimensionali degli sbarramenti opportu-namente renderizzati e successivamente inseriti sulle riprese fotografiche dal vero

15.13 ALLEGATO 13 - INGEGNERIA DI MASSIMA DELLA BARRIERA ANTISALE

L'allegato riporta la localizzazione dell'opera, la planimetria, le sezioni di progetto e un'ipotesi di cantierizzazione.

Improvement of Northern Italy Waterway System

365 PO RIVER SYSTEM

ATTIVITÀ N. 3: VALUTAZIONE AMBIENTALE DELLA SITUAZIONE ATTUALE DEL FIUME PO E STUDIO DEGLI IMPATTI AMBIENTALI DELLE SOLUZIONE PROPOSTE NEL MEDIO E LUNGO TERMINE (CORRENTE LIBERA E REGIMAZIONE)

I RESPONSABILI
Dott. Ing. Bruno Mioni
Dott. Ing. Ivano Galvani
Dott. Ing. Luigi Mille
Dott. Ing. Marcello Moretti

I CONSULENTI
Idroesse Engineering s.r.l.
Hydrodata s.p.a.
ART Ambiente Risorse e Territorio s.r.l.
Polaris Studio Associato s.r.l.

Cofinanziato dall'Unione europea
Rete transeuropea di trasporto (TEN-T)

16 PREMESSA

La presente relazione generale descrive le attività svolte relative all'incarico "***Sistema idroviario del Po 365 – Progetto preliminare per migliorare la navigabilità dal porto di Cremona al mare Adriatico – 2012-IT-91076-S" – Valutazione ambientale della situazione attuale del Po e studio degli impatti delle soluzioni di sistemazione: corrente libera e regimazione – Approfondimento delle interazioni tra il progetto di regimazione del fiume Po e la falda freatica, il reticolo idrico superficiale, le aree golenali ed extra-golenali e la risalita del cuneo salino. (IR-E-2) SERVIZIO N. 2***" assegnato da AIPO all'R.T.I. di cui al margine.

Il progetto preliminare sopra citato riguarda il tratto di fiume Po compreso tra il porto di Cremona e il Delta e considera due diverse opzioni di sistemazione dell'alveo di magra, costituite rispettivamente:

A. dalla sistemazione dell'alveo tramite l'inserimento di opere di regimazione, con l'obiettivo di migliorare radicalmente le condizioni di navigabilità e di recupero morfologico dell'alveo;

B. dal completamento della sistemazione a corrente libera dell'alveo nel tratto tra Cremona e foce Mincio e dalla sistemazione del tratto a valle fino al Delta con soluzioni strutturali che fanno ancora riferimento a opere di sponda e pennelli.

La prima opzione prevede la realizzazione di traverse opportunamente localizzate lungo l'intero tratto, in grado di regolare il profilo idrico di magra e di controllare l'abbassamento del fondo alveo che si è manifestato negli ultimi cinquant'anni risolvendone le criticità.

Gli effetti positivi principali di tale soluzione riguardano:

- il miglioramento delle condizioni di navigabilità (standard CEMT per la classe Va);
- il recupero morfologico, e anche naturalistico, degli equilibri del fiume;
- la produzione idroelettrica in corrispondenza dei salti delle traverse;
- il miglioramento della funzionalità delle derivazioni irrigue;
- la stabilizzazione delle falde idriche superficiali nelle aree rivierasche.

La seconda opzione, a corrente libera, realizzata con l'adattamento delle opere esistenti e l'inserimento di nuove opere (pennelli o difese radenti) nei nodi critici presenti tra Cremona e foce Mincio e, a valle di foce Mincio, con la realizzazione di un insieme di nuove opere di tipologia analoga, consente di migliorare le condizioni di navigabilità e di tendere verso un maggiore equilibrio dell'assetto morfologico dell'alveo.

Rispetto alle due opzioni indicate, le attività del Servizio 2 sono rivolte a specifici approfondimenti relativi all'assetto ecologico-ambientale attuale dell'alveo del Po e ai possibili impatti delle due soluzioni di sistemazione alternative; in dettaglio, i temi affrontati riguardano:

- l'approfondimento delle interazioni con la falda freatica, il reticolo idrico superficiale e le aree golenali ed extra-golenali; le interazione delle proposte progettuali nei confronti delle reti dei Consorzi di bonifica; le analisi delle interazione con gli ambienti ripariali;
- l'approfondimento delle interazioni con la risalita del cuneo salino;
- l'analisi sulla qualità delle acque e su altri parametri della direttiva 2000/60 su tutto il tratto; il monitoraggio e l'analisi dei parametri di qualità dell'acqua.

Rispetto alla due opzioni di base sopra elencate, è possibile anche una soluzione intermedia, costituita dalla sistemazione di parte del corso d'acqua con opere trasversali di regimazione e con opere longitudinali a corrente libera per la restante parte; le valutazioni degli effetti degli interventi sulle diverse componenti della regione fluviale restano validi con riferimento ai tratti di rispettiva influenza.

16 CARATTERISTICHE ATTUALI DELL'ALVEO DEL PO NEL TRATTO DI INTERESSE

Il tratto del fiume Po di interesse si estende tra Cremona (confluenza dell'Adda) e il Delta (conca di Volta Grimana), per una lunghezza complessiva di circa 230 km.

Le caratteristiche dell'alveo sono molto variabili, sia in ordine alla tipologia e alla dinamica morfologica, sia al regime idrologico e idraulico, sia infine per gli interventi attuati nel tempo per diverse finalità (difesa dalla piene, uso dell'acqua, navigazione).

Sotto l'aspetto complessivo, idrologico-idraulico e morfologico, possono essere individuati tre tratti che hanno caratteristiche significativamente diverse tra loro: tra foce Adda e foce Mincio, tra foce Mincio e l'incile del Delta e infine il ramo principale del Delta fino al mare (o alla conca di Volta Grimana).

Il primo tratto, la cui lunghezza è pari a circa 130 km con una pendenza motrice media dello 0,15‰, è caratterizzato da un alveo di piena molto ampio, con presenza di golene aperte e chiuse di grandi dimensioni, alveo di magra regimato da opere longitudinali di navigazione (curve di navigazione).

Il secondo tratto, con lunghezza di 110 km e pendenza media pari allo 0,12‰, ha un alveo di piena la cui larghezza si riduce progressivamente con l'avvicinarsi degli argini maestri alle sponde incise, che assumono una collocazione in froldo per estesi tratti; l'alveo di magra non è regimato per la navigazione e le opere di sponda assumono esclusiva funzione di protezione del piede degli argini.

Il terzo tratto costituisce il ramo principale del Delta, con pendenza e caratteri morfologici tipici di tale condizione e con argini maestri prevalentemente in froldo.

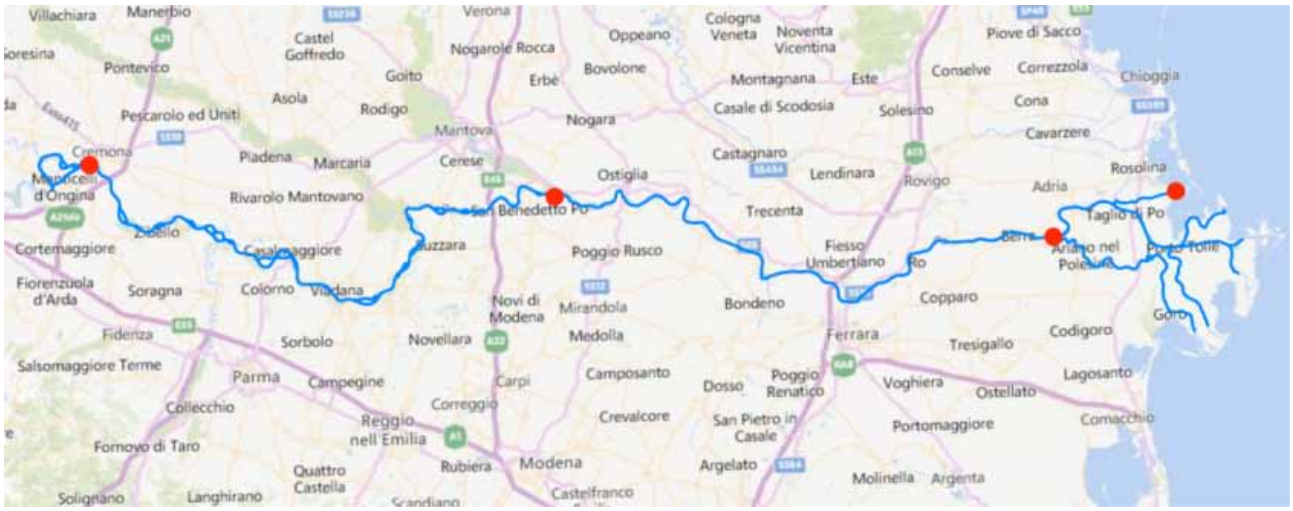


Figura 347 - Individuazione dei tre tratti omogenei tra Cremona e foce mare Adriatico

Immediatamente a monte della confluenza dell'Adda, sull'ampio meandro di Isola Serafini, vi è l'omonima traversa idroelettrica (con conca di navigazione) che costituisce l'unico sbarramento sul tratto di asta in studio e che svolge una funzione di regolazione dei livelli idrici a monte. L'opera, tenuto conto delle differenze di natura morfologica, idrologica e idraulica, rappresenta un esempio realizzato delle opere previste nell'opzione di progetto che prevede la regimazione e deve essere comunque tenuta in conto sia in quanto influenza direttamente l'assetto idrodinamico nel tratto in studio sia in ragione di eventuali effetti della regimazione in progetto a valle sul funzionamento attuale dell'impianto stesso.

16.1 CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DELL'ALVEO

Le caratteristiche morfologiche dell'alveo nel tratto in studio possono essere descritte con riferimento ai due tratti omogenei che ne rappresentano gran parte dell'estensione.

Tratto confluenza Adda - confluenza Mincio

La tipologia dell'alveo è di tipo monocursale sinuoso, assetto conseguente alle opere realizzate per la sistemazione a corrente libera per la navigazione, che hanno radicalmente modificato la tendenza naturale alla tipologia pluricursale (in ragione dei valori delle variabili indipendenti quali pendenza motrice e granulometria del materiale d'alveo).

Le opere (di sponda e pennelli), realizzate a partire dagli anni venti del secolo scorso, sono state progettate per trasformare il preesistente alveo pluricursale in monocursale stabile, in grado di assicurare fondali minimi di 2,50 m durante gli stati di magra ordinaria.

In seguito ai noti processi di abbassamento del fondo alveo, i pennelli dimensionati con quota di sommità posta a 2,0 m al di sopra del livello di magra ordinaria (e tracimati a partire da portate di 800 ÷ 1.000 m3/s) oggi contengono buona parte delle portate ordinarie e formative (fino a 4.000 ÷ 5.000 m3/s al limite della tracimazione).

La trasformazione in senso unicursale ha determinato la formazione di lanche e ambienti lentici in corrispondenza dei canali abbandonati, con evoluzione nel senso di una rapida occlusione e interrimento.

In alveo si ha una diffusa presenza di isole stabili, che stanno progressivamente collegandosi alla golena, in conseguenza dell´interrimento di uno dei due rami, dovuto sia all´abbassamento di fondo, sia alle opere di sponda. In prossimità delle curve di navigazione si hanno zone di attiva sedimentazione, in conseguenza della creazione artificiale di settori d´alveo a bassa energia (a tergo dei pennelli in alveo).

L´alveo di magra è dunque oggi pressoché interamente regolato e caratterizzato da un assetto stabile o comunque tendente alla stabilità (sezione che varia da triangolare nelle curve a rettangolare sui dossi e di larghezza regolare); solo nel tratto subito a valle della centrale e dal canale di scarico di Isola Serafini la sezione è ancora notevolmente irregolare e instabile.

L´alveo di piena, tra arginature continue, denuncia la presenza diffusa di ampie golene, aperte e chiuse da argini secondari: il tratto dispone complessivamente di notevoli volumi in golena disponibili all´invaso delle portate di piena, con rilevanti effetti di laminazione verso valle.

I maggiori problemi di stabilità morfologica si localizzano nei tratti con difese spondali parallele (presenti su entrambe le sponde); significativa la presenza delle arginature in froldo, localizzate nei tratti già critici per velocità e livelli idrometrici.

Su tutto il tratto, l´alveo inciso ha subito un rilevante abbassamento di fondo che ha direttamente interessato la stabilità e la funzionalità delle opere di difesa.

Le principali caratteristiche geometriche del tratto sono indicate nella.

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE	
Lunghezza tratto in asse	130,33 km
Distanza media tra le arginature	2600 m
Altezza media arginature su piano golenale	6,0÷8,0 m
Larghezza media alveo di magra	250 m
Profondità media alveo inciso	8,0÷8,5 m
Superficie alveo inciso per km di asta fluviale	0,44 km2/km
Superficie golena aperta per km di asta fluviale	1,36 km2/km
Superficie golena chiusa per km d´asta fluviale	0,83 km2/km
Sviluppo complessivo difese spondali	202,19 km
Sviluppo difese sponda sx rispetto a lunghezza tratto	77,2 %
Sviluppo difese sponda dx rispetto a lunghezza tratto	77,9 %
Indice di sinuosità	1,32

Tabella 112 - Caratteristiche geometriche del tratto di Fiume Po da confluenza Adda a confluenza Mincio

Tratto confluenza Mincio - incile del Delta

L'alveo di magra è monocursale, con andamento da sinuoso a sub-rettilineo. Solo localmente, in particolare fra confluenza Mincio e Ostiglia, si ha un assetto maggiormente dinamico con presenza di alcune isole e rami laterali ancora parzialmente attivi.

Le arginature maestre sono prossime alle sponde dell'alveo inciso, generalmente difese, e sono localmente separate dalle sponde da limitate aree golenali aperte. L´evoluzione morfologica dell´alveo inciso risulta estremamente lenta e di modesta entità; non si osservano modificazioni significative nel periodo recente, a partire dal 1954; i fenomeni erosivi di sponda sono localizzati e di modesta dimensione.

Si nota la presenza di pochi e grandi paleoalvei, di origine antica, totalmente sopra falda e ormai indipendenti dal sistema fluviale attuale (molte volte il tracciato è in parte esterno alle arginature).

L´alveo di piena tende a essere canalizzato, soprattutto nel tratto terminale, per la presenza di arginature molto prossime alle sponde; la distanza tra gli argini è infatti variabile e in alcuni tratti molto ridotta (soprattutto in corrispondenza delle località di Revere, Ficarolo, Pontelagoscuro, Polesella). Rimangono alcune golene chiuse di dimensioni relativamente modeste, che si estendono fino in prossimità dell´alveo inciso.

L´alveo di magra non ha raggiunto ovunque un assetto morfologico stabile e in alcuni tratti presenta problemi di ordine idraulico, soprattutto in corrispondenza delle curve di Revere-Ostiglia, Bergantino e Pontelagoscuro, dove fenomeni di instabilità di sponda tendono ad interessare le arginature maestre. La instabilità spondale dell´alveo inciso assume particolare importanza per le conseguenze indotte sui rilevati arginali. Il tracciato arginale presenta bruschi cambiamenti di direzione e restringimenti locali accentuati, che costituiscono punti critici per la stabilità dei rilevati arginali stessi.

Su tutto il tratto, l´alveo inciso ha subito un rilevante abbassamento di fondo che ha direttamente interessato la stabilità delle opere di difesa esistenti.

Le principali caratteristiche geometriche del tratto sono indicate nella Tabella 113.

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE	
Lunghezza tratto in asse	109,15 km
Distanza media tra le arginature	900 m
Altezza media arginature su piano golenale	9,0÷9,5 m
Larghezza media alveo di magra	350÷400 m
Profondità media alveo inciso	8,0÷8,5 m
Superficie alveo inciso per km di asta fluviale	0,48 km2/km
Superficie golena aperta per km di asta fluviale	0,28 km2/km
Superficie golena chiusa per km d´asta fluviale	0,15 km2/km
Sviluppo complessivo difese spondali	103,9 km
Sviluppo difese sponda sx rispetto a lunghezza tratto	48,3 %
Sviluppo difese sponda dx rispetto a lunghezza tratto	46,9 %
Indice di sinuosità	1,23

Tabella 113 - Caratteristiche geometriche del tratto Fiume Po da confluenza Mincio a incile Delta

16.2 SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA REALIZZATA NEL TRATTO FOCE ADDA – FOCE MINCIO

La sistemazione dell'alveo del Po a corrente libera nasce con finalità di miglioramento delle condizioni di navigabilità e di difesa idraulica.

Il progetto originale Valentini - Gorio del 1919 è riferito dapprima al solo tronco foce Enza - foce Crostolo di 14 km e viene esteso successivamente verso monte fino a foce Taro. Fu redatto per ottenere fondali di 2,50 m, necessari per natanti da 600 t con pescaggio di 2,10 m (all'epoca la navigazione sul Po era effettuata con "burchi" da 200 t e pescaggio di 1,80 m). La scelta progettuale e i suoi obiettivi sono ripetutamente confermati negli anni seguenti dalle Commissioni Parlamentari

presiedute da Leone Romanin Jacur, che riconoscono la possibilità e la convenienza di navigare il fiume rispetto alle alternative di canali laterali o pedemontani.

Nel 1923 la Commissione affida al Prof. Giandotti, capo dell'Ufficio Idrografico del Po, l'incarico di redigere un progetto generale per la sistemazione del tronco tra foce Adda e foce Mincio, progetto che viene approvato nel 1924 dal Consiglio Superiore dei LL.PP.

L'obiettivo del progetto fu quello di fissare la posizione planimetrica dell'alveo di magra, all'interno dell'alveo inciso, in modo da ottenere fondali non inferiori a 2,50 m con una portata di magra minima di 400 m3/s. I criteri fondamentali, desunti dalle leggi di Fargue, furono i seguenti:

- larghezza del canale regolato di 250÷300 m sulle soglie, con allargamento in corrispondenza dei vertici delle curve intorno ai 400 m;
- curve regolari a tracciato parabolico, con raggio mai inferiore a 800 m, (adottate anche perché dalla analisi dei rilievi a superficie libera contemporanea condotti dal 1905 al 1923 si era potuto riconoscere che varie erosioni in atto presentavano spontaneamente andamento planimetrico pressoché parabolico);
- sviluppo totale del tracciato quasi uguale a quello naturale (circa 130 km);
- vertici delle curve successive a una distanza media non eccessiva (2,8 km) per ottenere stabilità del tracciato e buona successione di fondali, conservando all'incirca lo stesso numero di passaggi che si riscontravano naturalmente nel fiume (in totale 51 curve);
- massima utilizzazione possibile delle vecchie difese esistenti, per ragioni economiche (circa 23 km);
- foce degli affluenti nelle parti concave delle curve, allo scopo di consentire da parte della corrente la più efficace e rapida rimozione degli apporti solidi;
- maggiore possibile addentramento delle parti concave delle curve nelle alte sponde golenali, allo scopo di ridurre la lunghezza delle opere in alveo;
- avvicinamento del tracciato ai centri di maggiore interesse economico.

I lavori ebbero inizio nel 1931-32, nell'ambito di un programma di opere pubbliche a sollievo della disoccupazione, con un progetto esecutivo che prevedeva 51 curve di navigazione e uno sviluppo complessivo del canale sistemato di circa 130 km. Il finanziamento e l'avanzamento dei lavori furono molto lenti e soltanto dopo il 1951 essi furono portati a un buon grado di completamento per tutto il tronco tra Cremona e Foce Mincio.

I criteri teorici prima elencati non sempre poterono essere rigorosamente applicati e in diverse situazioni i lavori furono condotti secondo altre condizioni di opportunità come ad esempio:

- quella di non avanzare esageratamente con le curve concave entro le alte sponde, generalmente di proprietà privata, al fine di evitare i costi degli espropri; questo ha condotto ad aumentare in diverse curve i raggi fin oltre i 2.000 m, che risultano non troppo favorevoli alla stabilità dei fondali;
- la necessità di utilizzare il più possibile le difese esistenti, evitando la demolizione di quelle che erano state costruite a protezione delle sponde e degli argini maestri;
- la necessità di ottenere delle buone soluzioni di andamento del canale di navigazione in corrispondenza dei ponti stabili stradali e ferroviari e di quelli stradali ancora su barche;
- la necessità dell'avvicinamento del canale regolato all'una o all'altra sponda per servire le esistenti derivazioni di acqua a scopo irriguo, i centri principali (Casalmaggiore), e infine il Cantiere Officina di Boretto.

La sistemazione è stata realizzata costruendo, lungo le curve progettate, tre tipi di opere:

- difese spondali;
- difese in cassero;
- opere in alveo (pennelli) a una o due fronti.

Le difese erano costruite lungo le sponde quando il tracciato non si addentrava nelle golene. La sponda veniva profilata in modo da ottenere una scarpata con pendenza 2/1, con una banchina a quota +2 m sulla magra ordinaria, e con la parte superiore semplicemente inerbita; la parte inferiore, fino al piede della scarpata, era difesa con buzzoni ricoperti con uno stato di 50 cm di pietrame.

I buzzoni venivano posti in opera, nella parte in acqua, con una barca detta "piattino" sulla quale venivano posti 5 buzzoni, uniti con paletti di salice in modo da formare una "piattinata" di dimensioni 4 m x 2 m, da far scivolare sulla scarpata.

Quando il tracciato si addentrava nelle golene e il terreno antistante da asportare era molto consistente, si preparava, lungo il tracciato stesso, una difesa "in cassero" e si attendeva che il terreno venisse asportato dalla corrente indirizzata dalle opere in alveo costruite a monte.

Questo tipo di difesa era costituito da una trincea con scarpata simile alle difese di sponda, rivestita con buzzoni e pietrame, che avrebbero dovuto costituire un primo elemento di difesa quando la corrente avrebbe asportato tutto il terreno antistante. Quando il tracciato della sponda era abbastanza vicino alla golena veniva costruita un'opera in alveo a una fronte con la scarpata verso fiume costruita con il sistema sopradescritto, una banchina larga 3,00 m e una scarpata inerbita fino a raggiungere la quota della golena che veniva allargata con riporto di terra. Quando invece il tracciato si allontanava dalla sponda, spesso erano previste opere trasversali aventi lo scopo di realizzare casse di colmata a tergo delle opere in alveo a doppia fronte.

La sistemazione è stata progettata e attuata con opere radenti discontinue, disposte sulla riva concava delle curve, mentre su quella convessa non era previsto nessun intervento. L'estremità di valle di ciascuna difesa viene a trovarsi all'incirca all'altezza dell'estremità di monte della difesa successiva sulla sponda opposta e brevi opere trasversali collegano l'inizio di ogni difesa con la sponda, mentre a valle spesso il varco resta libero consentendo alle torbide di entrare nella lunata a ricolmare per deposizione le precedenti erosioni.

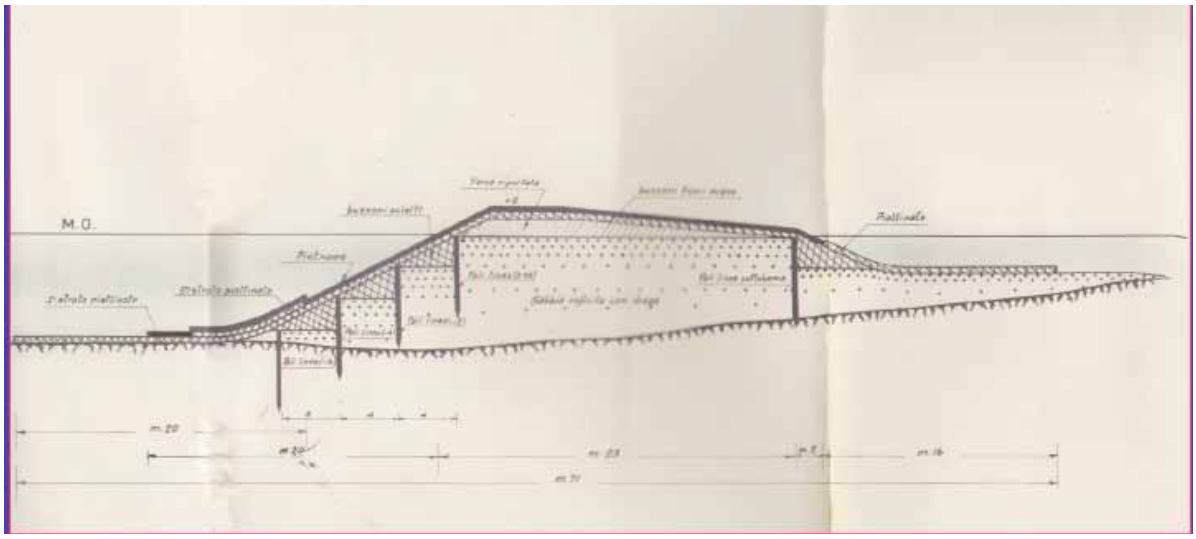


Figura 348 - Progetto di sistemazione a corrente libera dell'alveo del Po – Pennello di navigazione

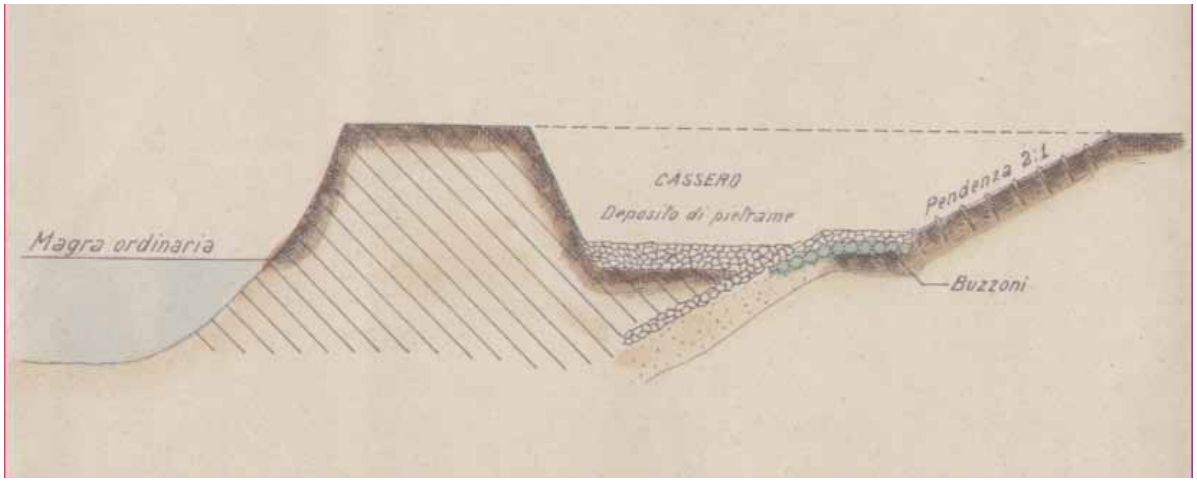


Figura 349 - Progetto di sistemazione a corrente libera dell'alveo del Po – Opera in cassero

Le trasformazioni del fiume che sono state prodotte dalle opere di sistemazione dell'alveo di magra nel tronco tra foce Adda e foce Mincio sono risultate imponenti e i risultati ottenuti sono di tutta evidenza. Il successo conseguito ha indotto l'ex Magistrato per il Po a programmare gli stessi interventi anche per il tronco di valle, dove l'instabilità del canale continua a provocare problemi alle difese.

Gli obiettivi del progetto possono dirsi quindi conseguiti per quel che riguarda la difesa idraulica, mentre per la navigazione i risultati non possono ancora essere definiti sufficienti, pur registrando un miglioramento radicale tanto che le condizioni di navigabilità hanno superato quelle del tronco inferiore che prima dei lavori erano di gran lunga migliori.

Riprendendo le analisi puntuali sviluppate, si può affermare che i punti nei quali si registrano bassi fondali sono comunque limitati sia come numero che come lunghezza e si estendono per non più di qualche chilometro per l'intera tratta di 130 km. L'esame critico e puntuale delle sistemazioni che non hanno dato i risultati voluti mostra che le cause prevalenti della formazione di bassi fondali sono da individuarsi:

- nell'impiego in alcuni casi di raggi di curvatura troppo grandi;
- nella lunghezza eccessiva di alcuni tratti in rettilineo;
- nell'adozione di curve di sviluppo troppo grande (Cremona Casalmaggiore, ecc.);
- nella erronea valutazione della larghezza di alcune soglie (la corrente fra curva e controcurva si dispone spesso trasversalmente su una soglia obliqua).

16.3 REGIME IDROLOGICO

Il bacino idrografico del Po ha una superficie, alla sezione di chiusura di Pontelagoscuro, di 70.091 km2; va inoltre aggiunta la superficie del Delta, che tra le delimitazioni dei due rami estremi a nord (Po di Maistra) e a sud (Po di Goro) è pari a 380 km2. L'area di pianura è circa 42.000 km2, pari a circa il 60% della superficie complessiva.

L'afflusso meteorico medio annuo sul bacino, sulla base di serie storiche estese dal 1918 a oggi, è pari a 1.108 mm e varia da est a ovest e tra la zona montana e la pianura: i valori massimi si collocano sulla catena alpina con oltre 2.000 mm; i minimi sulla pianura orientale, di poco inferiori ai 700 mm.

I volumi idrici corrispondenti sono pari a 77,7x109 m3/anno, equivalenti a una portata media continua di 2.464 m3/s. Il deflusso medio annuo corrisponde, sullo stesso periodo di osservazione, a 664 mm, pari a circa 46,5x109 m3/anno, che corrisponde al 60% dell'afflusso medio annuo ed equivale a 1.470 m3/s. Risultano di conseguenza 31,2x109 m3/anno che costituiscono la quota

di evapotraspirazione e di infiltrazione profonda. Le acque superficiali regolate, rappresentate sostanzialmente dai grandi laghi prealpini (Maggiore, Como, d'Iseo, Idro, Garda), costituiscono un volume di 1,3 x109 m3.

L'asta del Po ha una lunghezza totale di 675 km e il tratto tra Cremona e la foce (275 km) ne costituisce la parte con connotazione nettamente fluviale; gli affluenti principali di sinistra discendono dall'arco alpino e tra di essi gli ultimi 4, Ticino, Adda, Oglio e Mincio sono emissari dei grandi laghi prealpini che sono regolati artificialmente. Gli affluenti in destra, dal Tanaro al Panaro, sono invece alimentati dall'Appennino e hanno, a eccezione del Tanaro, modesta estensione e caratteristiche torrentizie.

Il regime idrologico è caratterizzato da due periodi di acque alte (autunnale e primaverile) e da due periodi di magra (invernale ed estivo); durante il periodo estivo, le magre sono sostenute prevalentemente dai ghiacciai alpini che alimentano gli affluenti e dalla regolazione dei grandi laghi.

I dati idrologici caratteristici, derivanti dalle serie storiche disponibili nelle stazioni di misura che hanno periodi di funzionamento più estesi, sono riportati in Tabella 114.

STAZIONE	BACINO km^2	H mm	Q MIN m^3/s	Q MED m^3/s	Q MAX m^3/s	H MAX m	G 10^3 t/anno
Piacenza	42.030	1.128	125	932	12.800	11.32	3.600
Boretto	55.183	1.113	200	1.150	12.200	9.82	10.300
Borgoforte	62.450	1.131	210	1.370	11.300	12.10	–
Pontelagoscuro	70.091	1.108	275	1.470	10.300	10.25	12.200

Tabella 114 - Dati idrologici nelle stazioni di misura con periodi di funzionamento più estesi - h = precipitazione media annua; Qmin = portata minima storica; Qmed = portata media; Qmax = portata massima storica; Hmax = escursione idrometrica massima; G = trasporto solido in sospensione medio.

E' interessante notare l'elevata escursione, sia in termini di livelli idrometrici che di portate, tra i valori minimi e massimi e l'andamento dei valori massimi di piena, che raggiungono i valori più elevati nel tratto intermedio (tra Piacenza e Cremona), per poi decrescere verso valle in forza dell'elevata capacità di laminazione fornita dalle golene (il volume complessivamente invasabile è dell'ordine di 500 milioni di m3) e del ridotto apporto degli affluenti.

Le caratteristiche idrologiche relative ai valori medi e minimi dei deflussi in alveo, che sono direttamente rapportabili all'uso della risorsa idrica, sono indicati in Tabella 115 per tronchi omogenei.

TRONCO	BACINO SOTTESO km^2	QUOTA MEDIA m s.m.	H mm	Q MED m^3/s	Q MIN5 m^3/s	Q355 m^3/s
Adda-Taro	51.884	912	1.165	1.100	300	400
Taro-Parma	54.312	891	1.160	1.150	300	450
Parma-Oglio	56.800	869	1.151	1.180	300	450
Oglio-Mincio	63.905	847	1.142	1.350	350	500
Mincio-Panaro	69.619	824	1.129	1.400	380	550
Panaro-Delta	71.403	814	1.125	1.450	380	550

Tabella 115 Caratteristiche idrologiche relative ai valori medi e minimi dei deflussi in alveo - h = precipitazione media annua ragguagliata; Q med = portata media; Q min5 = portata minima con tempo di ritorno di 5 anni; Q 355 = portata di durata 355 gg.

16.4 TRASPORTO SOLIDO

Le analisi condotte dall'Autorità di bacino del fiume Po nell'ambito degli "Studi di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po", hanno portato a determinare il bilancio del trasporto solido al fondo, cioè a stimare il valore del volume che nell'anno medio

(all'interno di un determinato periodo di analisi, che nello specifico è compreso tra il 1982 e il 2005) è transitato in una data sezione del corso d'acqua.

Senza entrare nel dettaglio degli aspetti metodologici, di seguito si riportano i risultati ottenuti che caratterizzano le condizioni dei diversi tratti di corso d'acqua interessato. Considerando il tratto in oggetto l'analisi ha messo in evidenza i seguenti elementi.

Nel tratto tra foce Adda (a valle di Isola Serafini e a monte di Cremona) e foce Taro si ha un incremento lungo la progressiva della portata solida al fondo (mediamente circa 22.000 m3/km anno) in quanto all'interno del tratto le erosioni, in atto soprattutto sul fondo alveo, sono superiori ai depositi, presenti soprattutto a tergo dei pennelli di navigazione.

Il processo di erosione a carico del fondo alveo è legato, come più volte osservato, alla presenza della centrale idroelettrica di Isola Serafini (apporto ridotto di materiale solido da monte), alle opere di navigazione (canalizzazione dell'alveo di magra) e all'estrazione di inerti (effetti legati alle estrazioni condotte in passato). Tale dinamica è incompatibile con l'assetto fluviale in quanto l'erosione in atto sul fondo alveo, in continua evoluzione, non solo rende parzialmente inutilizzabili alcune opere (conche di navigazione per l'accesso al porto di Cremona e della traversa di Isola Serafini), ma può indurre situazioni di rischio di instabilità sugli argini maestri e sui manufatti di attraversamento.

Dalle analisi granulometriche e litologiche condotte si è potuto riscontrare che il substrato ghiaioso, di chiara pertinenza litologica appenninica, si rinviene alla base dei depositi sabbiosi di barra a una quota maggiore di quella del fondo alveo attuale. Tale condizione mette in evidenza che detti depositi sono sospesi rispetto alla quota di fondo alveo ed essendo riscontrabili sulle barre di entrambe le sponde ne deriva che essi possano essere stati incisi e asportati dai processi erosivi responsabili dell'abbassamento del fondo alveo.

Nel tratto tra foce Taro e Borgoforte (a valle foce Oglio) il valore della portata solida al fondo è in costante diminuzione (mediamente circa -11.000 m^3/km anno). Tale circostanza è legata al fatto che le erosioni in atto nelle forme di fondo (barre e sponde) e gli apporti esterni (sia come carico di fondo che come carico in sospensione che sedimenta), sono inferiori ai depositi di barra (soprattutto a tergo dei pennelli di navigazione) e lungo il fondo alveo (associato all'apporto di materiale grossolano da parte degli affluenti appenninici che la corrente del Po non è in grado di trasportare verso valle, se non per tratti ridotti e in condizioni di piena).

Nel tratto tra Borgoforte e Ostiglia (a valle delle confluenze con Mincio e Secchia) si ha un incremento della portata solida al fondo (mediamente circa 26.000 m3/km anno) per effetto delle dinamiche interne al sistema (erosioni che superano i depositi). Si segnala che all'interno del tratto è in atto un approfondimento delle quote di fondo alveo e le opere di navigazione sono più contenute rispetto ai tratti di monte, pertanto i depositi di barra sono più limitati e si constata una certa ripresa della dinamica erosionale di sponda, soprattutto in corrispondenza della porzione terminale.

E' possibile che un incremento di portata solida da monte possa ridurre i processi erosivi in atto, soprattutto quelli che interessano il fondo alveo. E' necessario, inoltre, evitare che il trasporto solido proveniente da monte vada a depositarsi a tergo dei pennelli, per cui occorre ridurre l'altezza di tali opere, senza però interferire con le necessità di navigazione.

Il tratto tra Ostiglia (a valle delle foci di Mincio e Secchia) e Pontelagoscuro, non condizionato in modo diffuso da opere di difesa spondale e in assenza di opere di navigazione, risulta essere sostanzialmente in equilibrio dinamico (erosioni = depositi).

Il tratto tra Pontelagoscuro e l'incile del Delta presenta una portata solida al fondo in costante diminuzione lungo la progressiva (mediamente circa -33.000 m^3/km anno). La dinamica relativa alle forme di fondo perde importanza rispetto a quella che interessa il fondo dell'alveo. La dinamica in atto risulta essere associata al fenomeno di deposito in atto lungo il fondo alveo, correlato al fatto che nel decennio precedente a quello relativo alle analisi condotte (2005) si sono verificati tre eventi di piena straordinari (1994, 2000 e 2002) che indubbiamente hanno contribuito ad apportare notevoli quantità di materiale solido, il quale transita lentamente verso valle, a causa della progressiva perdita di energia verso la foce dovuta all'azione di rigurgito del mare.

16.5 TENDENZE EVOLUTIVE DEL FONDO ALVEO

L'analisi più aggiornata delle tendenze evolutive del fondo alveo è stata effettuata nell'ambito degli "Studi di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po" condotti per conto dell'Autorità di bacino del fiume Po.

I risultati conclusivi delle elaborazioni svolte permettono di avere le seguenti valutazioni relative ai diversi tratti omogenei in cui può essere suddivisa l'asta del corso d'acqua in studio:

- da valle di Isola Serafini a foce Parma risulta un continuo processo di erosione del fondo dell'alveo, soprattutto tra foce Adda e foce Arda; tale dinamica è legata alla presenza dello sbarramento di Isola Serafini, alla presenza delle opere di navigazione e alle attività estrattive condotte in passato;
- tra foce Parma e foce Oglio si è verificato un innalzamento delle quote di fondo, soprattutto nel periodo tra il 1979 e il 1999;
- tra foce Oglio e Bergantino (MN) si è verificato nell'intero periodo 1979÷2005 un abbassamento delle quote di fondo medio;
- tra Bergantino (MN) e Pontelagoscuro (FE) vi sono state condizioni di sostanziale stabilità;
- a valle di Pontelagoscuro (FE) il fondo alveo ha subito nell'intero periodo tra il 1979 e il 2005 un progressivo innalzamento, correlato sia all'azione di rigurgito ad opera del mare, sia all'apporto solido da monte in occasione delle piene del 1994, 2000 e 2002.

Dall'analisi delle altezze idrometriche minime annue registrate presso le stazioni di misura Cremona (dal 1868 al 2006) e Boretto (dal 1868 al 2006), si osserva una sostanziale invariabilità dei livelli di magra fino all'incirca al 1960; successivamente si ha una notevole riduzione dei livelli fino al 1990. Dopo il 1990 il fenomeno di abbassamento si è generalmente attenuato, fatta eccezione per i livelli relativi alle magre estive degli anni 2003, 2005 e 2006, i quali sono però correlati ad eventi di magra idrologica del tutto eccezionali.

Il fenomeno di abbassamento dei livelli tra il 1960 e il 1990 testimonia l'abbassamento generalizzato del fondo alveo del Po che si è verificato in tale periodo. Il fatto che dopo il 1990 la tendenza all'abbassamento risulti essere più contenuta rispetto al periodo precedente, è dovuta essenzialmente ai seguenti fattori:

- riduzione delle escavazioni dall'alveo inciso;
- maggior apporto solido in seguito agli eventi di piena straordinari che si sono verificati (1994, 2000 e 2002).

La dinamica erosiva in atto a valle di Isola Serafini è legata alla presenza dello sbarramento, alla presenza delle opere di navigazione e alle attività estrattive condotte prima degli anni '90. Indubbiamente lo sbarramento e la gestione della centrale idroelettrica determinano un rallentamento della corrente a monte e quindi condizioni medie che favoriscono il deposito sul fondo, mentre a valle dello sbarramento l'insieme di diversi fattori (deflusso "povero" di sedimento, sponde "corazzate" dalle opere di difesa, presenza di opere di navigazione che inducono l'incanalamento della corrente di morbida e di piena ordinaria nell'alveo di magra) favoriscono l'erosione del fondo alveo. L'insieme di queste azioni ha comportato, verosimilmente, la progressiva asportazione locale del substrato grossolano, corazzato, attualmente "sospeso" di qualche metro rispetto al fondo alveo. Attualmente l'erosione del fondo alveo interessa depositi prevalentemente sabbiosi, relativamente antichi.

16.6 CARATTERISTICHE DELLA FALDA FREATICA SUPERFICIALE

Per la caratterizzazione dell'interazione della falda freatica superficiale con il sistema fluviale del Po si è fatto riferimento a studi geologici-idrogeologici e pubblicazioni sulle acque sotterranee, ai Piani di Tutela delle Acque delle regioni rivierasche, ai Rapporti annuali relativi allo stato delle acque

sotterranee riguardante gli aspetti quantitativi e qualitativi redatti dalle ARPA regionali sulla base della rete di monitoraggio.

In particolare è stata raccolta e analizzata la seguente documentazione:

Per la Regione Lombardia:

- Geologia degli acquiferi padani (Regione Lombardia-ENI Divisione Agip, 2001)
- Stato delle acque sotterranee della Provincia di Lodi (ARPAL, 2012);
- Stato delle acque sotterranee della Provincia di Cremona (ARPAL, 2012);
- Stato delle acque sotterranee della Provincia di Mantova (ARPAL, 2012);

Per la Regione Emilia Romagna:

Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998);

Report sullo stato delle acque sotterranee triennio 2010-2012;

- Supporto tecnico alla Regione Emilia Romagna per la ricostruzione del quadro conoscitivo relativo ai principali acquiferi freatici di pianura (ARPA - RER , 2010);
- Definizione del modello geologico e idrogeologico della zona arginale del fiume Po in destra idrografica da Boretto (RE) a Ro (FE) (Servizio geologico, sismico e dei suoli, Regione Emilia Romagna, 2013);
- Studio idrogeologico dell'acquifero freatico e del primo acquifero confinato prospicienti la sponda destra del fiume Po - Analisi dei dati raccolti nel 2013 e 2014 (Servizio geologico, sismico e dei suoli, Regione Emilia Romagna, 2014)
- L'acquifero freatico costiero della regione Emilia-Romagna: modello geologico e stato di salinizzazione (Luciana Bonzi, Lorenzo Calabrese, Paolo Severi, Valentina Vincenzi, Il Geologo dell'Emilia Romagna, 2010-39).

Per la Regione Veneto:

- Le acque sotterranee della pianura veneta (ARPAV, 2008).

A seguito della Direttiva 2000/60/CE e dei decreti nazionali di recepimento della stessa (D.Lgs.30/2009 che ha modificato il D.Lgs. 152/06), le Regioni hanno individuato, sulla base di criteri geologici/ idrogeologici i corpi idrici significativi sotterranei, valutando gli impatti determinati dalle pressioni antropiche sia per quanto riguarda gli aspetti quantitativi che qualitativi delle risorse idriche sotterranee.

Sulla base dell'interpretazione e analisi di numerose linee sismiche, stratigrafie di pozzi di esplorazione petrolifera e a uso idropotabile e irriguo, di indagini geognostiche è stato possibile ricostruire l'assetto idrogeologico del bacino sedimentario padano.

L'identificazione di quattro superfici di discontinuità stratigrafica di estensione regionale, rappresentanti limiti di Sequenze Deposizionali, corrispondenti a delle tappe fondamentali nell'evoluzione del bacino, ha consentito di individuare e attribuire quattro unità stratigrafiche informalmente denominate A, B, C e D, a partire dal piano campagna.

Le unità A, B, C, D sono state equiparate a corpi geologici di notevole estensione areale che costituiscono un dominio dello spazio fisico in cui ha sede un sistema idrogeologico distinto. Nel complesso, l'insieme delle unità idrostratigrafiche principali costituisce una successione di corpi sedimentari acquiferi (definiti Gruppi Acquiferi).

Il Gruppo Acquifero "A" è attualmente sfruttato in modo intensivo, ancorché spesso interessato da fenomeni di inquinamento; i Gruppi Acquiferi B e C sono sfruttati nelle aree di margine del bacino. Il Gruppo Acquifero D, isolato rispetto alla superficie per gran parte della sua estensione, è sfruttato solo localmente.

L'acquifero superficiale padano è dunque costituito da un sistema multistrato formato, nell'area interessata dal progetto, da alternanze di livelli limosi argillosi semipermeabili o impermeabili e da livelli limo-sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi.

Tali livelli rispecchiano rispettivamente una sedimentazione avvenuta in aree golenali/palustri e di lanca, queste ultime caratterizzate dalla presenza di torba, in condizioni di corrente lenta e bassi tiranti idrici, o lungo l'alveo attivo con corrente e tiranti idrici maggiori.

Si tratta in pratica di un sistema multifalda, in cui il grado di confinamento cresce con la profondità. La profondità del primo livello impermeabile varia anche nell'ambito di distanze brevi, in una fascia che spazia da circa 15 a 50 m. Allo stesso modo l'acquifero superficiale presenta una potenza che può variare da 10 a 40 m. Tale condizione non deve stupire in quanto nella piana alluvionale si hanno depositi sabbiosi ove corre l'alveo attivo e limoso argillosi nelle aree golenali. La persistenza dell'alveo lungo un certo tracciato determina la variazioni della potenza dei vari livelli che comunque, in un modo o nell'altro, sono pressoché sempre interconnessi. Questo non toglie che le perdite di carico e i prelievi facciano sì che, tra falde superficiali e profonde, vi siano differenze significative nei livelli piezometrici e nei tempi di risposta al regime idrologico del Po.

A questo proposito deve essere tenuto presente che, nella simulazione degli effetti di barriere impermeabili, è fondamentale la definizione della permeabilità verticale, che nei mezzi isotropi viene generalmente stimata inferiore di un ordine di grandezza rispetto a quella orizzontale, ma nel caso specifico in cui si hanno alternanze di livelli molto diversi dal punto di vista granulometrico, la differenza tra le due componenti può essere ancora più elevata.

Per contro, ove sia garantita sufficiente continuità, è possibile attestare gli elementi di "disconnessione" direttamente su livelli impermeabili o semipermeabili, riducendo così in misura sostanziale i deflussi a carico della rete di drenaggio esistente nella porzione di territorio interessato.

Gli abbassamenti consistenti del fondo alveo del Po, che si sono manifestati negli ultimi 50 anni, hanno provocato un analogo abbassamento dei profili idrici in condizioni di regime ordinario e, di conseguenza, hanno indotto anche un sensibile abbassamento della superficie freatimetrica, specialmente nelle zone golenali e, localmente, anche nelle aree extra-golenali più prossime all'alveo stesso.

Solo in occasione di eventi di piena ordinaria e straordinaria, la falda freatica viene alimentata dal Po, invertendo la direzione di flusso per una porzione di area nelle vicinanze dell'alveo.

Occorre poi considerare che, di frequente, ai rilevati arginali sono associati diaframmi destinati a prevenire il rischio di sifonamento. Si tratta quindi di opere che, pur finalizzate a scopi diversi, sono destinate a svolgere la funzione di barriere. Anche per tale aspetto è quindi fondamentale identificare le opere idrauliche esistenti onde tenere conto degli effetti da esse prodotti sul deflusso di falda e sulle condizioni dell'acquifero freatico.

Poiché non sono previste caratterizzazioni dell'acquifero più approfondite per mezzo di indagini geotecniche dirette, è stata acquisita una descrizione il più possibile precisa della struttura del sottosuolo sulla base dei dati di letteratura, delle stratigrafie disponibili e di altre informazioni utilizzabili.

Sulla base dell'analisi della documentazione disponibile è di seguito descritto in dettaglio il sistema idrogeologico a nord e a sud de Po e nell'area del Delta.

16.6.1 Settore idrogeologico a nord del Po

A nord del Po il territorio che costituisce la bassa pianura lombardo-veneta è suddivisibile in due aree principali: la prima, da confluenza Adda a confluenza Oglio, la seconda da confluenza Oglio a confluenza Mincio.

Da una recente suddivisione da parte di ARPA – Regione Lombardia sono stati identificati i seguenti gruppi acquiferi per i settori lungo la fascia del fiume Po:

- Corpi idrici sotterranei in acquifero superficiale di bassa pianura:

GWB ISS BPPO - Corpo idrico sotterraneo superficiale di Bassa pianura Bacino Po

- Corpi idrici sotterranei in acquifero intermedio di bassa pianura:

GWB ISI BPPO - Corpo idrico sotterraneo intermedio di Bassa pianura Bacino Po

Il settore di pianura alluvionale da confluenza Adda a confluenza Oglio degrada dolcemente verso sud-est; i processi di deposizione ed erosione generati dalle acque correnti, le divagazioni e le valli fluviali sia dei fiumi attuali sia di quelli relitti arricchiscono il terreno di lievi ondulazioni, piccole depressioni e scarpate, profonde pochi metri, con alcune eccezione legate agli alti morfologici strutturali sepolti.

La geomorfologia del territorio e la grande disponibilità di acque hanno fortemente condizionato l'insediamento umano e l'uso del suolo, alimentatrice e rigeneratrice del reticolo irriguo, la cui influenza sull'acquifero si fa sentire in termini di innalzamento periodico della superficie piezometrica. La fitta ed estesa rete di canali possiede per la stragrande maggioranza alvei in terra che, oltre ad assolvere la propria funzione irrigua e di bonifica, danno luogo a un intenso interscambio con la sottostante falda freatica.

Il passaggio tra l'unità idrogeologica della medio-alta pianura con quella della media-bassa pianura è incerto, caratterizzato da una lenta transizione fra questi due gruppi di unità e i corpi alluvionali dei grandi corsi d'acqua, in specie del fiume Po ma anche dell'Adda e dell'Oglio, che rende particolarmente difficoltosa una rappresentazione di dettaglio della distribuzione delle diverse unità.

Lo spessore complessivo dei sedimenti interessati dalla ricostruzione della struttura idrogeologica è generalmente intorno ai 200 m.

Buona parte di questo settore di territorio è formata da depositi di media trasmissività (intorno ai 10-2 m2/s), e il coefficiente di infiltrazione tra 0,2 e 0,3, appaiono discretamente produttivi, soprattutto per l'alimentazione da monte degli acquiferi più profondi. I depositi del fiume Po coprono una fascia di 4-5 km di larghezza a settentrione dell'alveo del fiume.

Nella parte orientale della medio- bassa pianura, predominano i depositi fini, anche in prossimità del fiume Oglio, anch'esso evidentemente deviato nel suo corso durante le ultime fasi dell'evoluzione della pianura dal delinearsi progressivo della dorsale di Romanengo- Soresina. La deviazione è avvenuta in senso opposto rispetto a quella del Serio, lasciando un distinto paleoalveo posto ad ovest dell'attuale solco del fiume, diretto all'incirca da nord a sud.

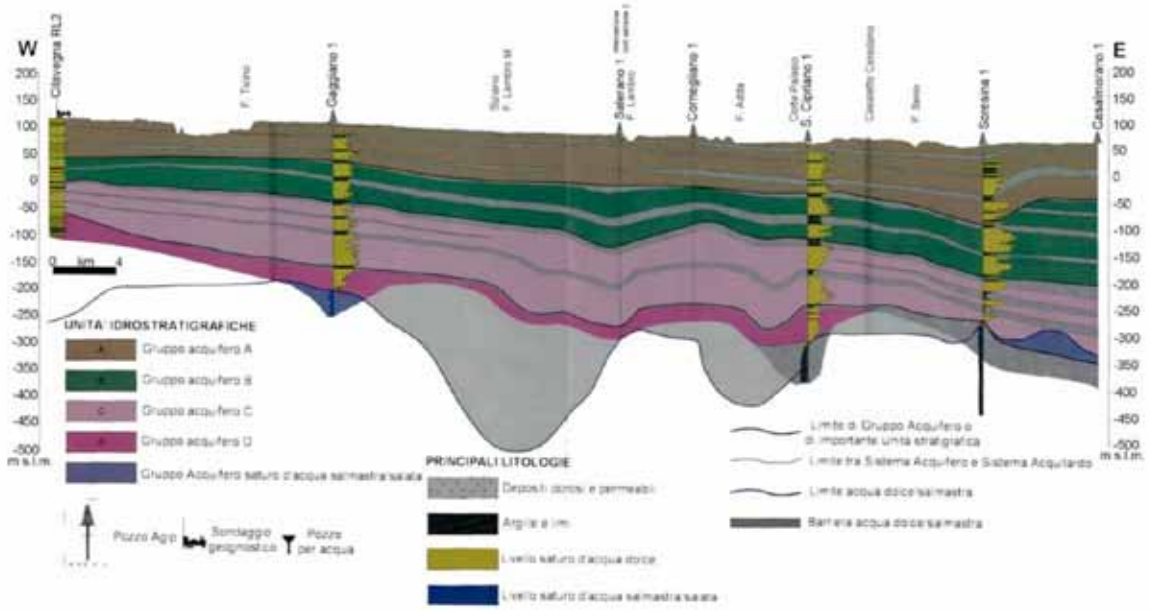


Figura 350 - Sezione W-E della pianura lombarda dal fiume Ticino all'Oglio e caratterizzazione delle unità idrostratigrafiche principali (da Geologia degli acquiferi padani, Regione Lombardia-ENI Divisione Agip, 2001)

Sulla base dei dati rilevati da ARPAL – Regione Lombardia, gli andamenti piezometrici dell'anno 2012, che riguardano la prima falda, monitorata con periodicità mensile complessivamente in 23 punti (20 piezometri e 3 pozzi), hanno evidenziato, nelle misurazioni eseguite su 16 piezometri e 2 pozzi, uno stato di sofferenza quantitativa della risorsa nel periodo compreso tra febbraio e giugno,

causato dalle scarse precipitazioni meteoriche. Nei mesi da febbraio a maggio per molti piezometri si sono misurate le soggiacenze statiche massime di tutto lo storico delle misurazioni.

Il settore di pianura lombarda che va da confluenza Oglio a confluenza Mincio nella zona della bassa pianura, in prossimità del fiume Po, presenta quote variabili tra i 10 e i 20 m s.m., con depositi prevalentemente argillosi-limosi. Il sistema acquifero di monte si interdigita a sud con l'acquifero alimentato dal fiume Po. La base dell'acquifero è delimitata dalle acque salate, che se nella parte a nord del Po sembra attestarsi a profondità tra i 500 m e i 700 m, a sud del fiume può salire anche a profondità di 100 m dal p.c.

La falda superficiale risente fortemente del regime idrico del Po, che influenza comunque anche le falde più profonde, frequentemente in pressione.

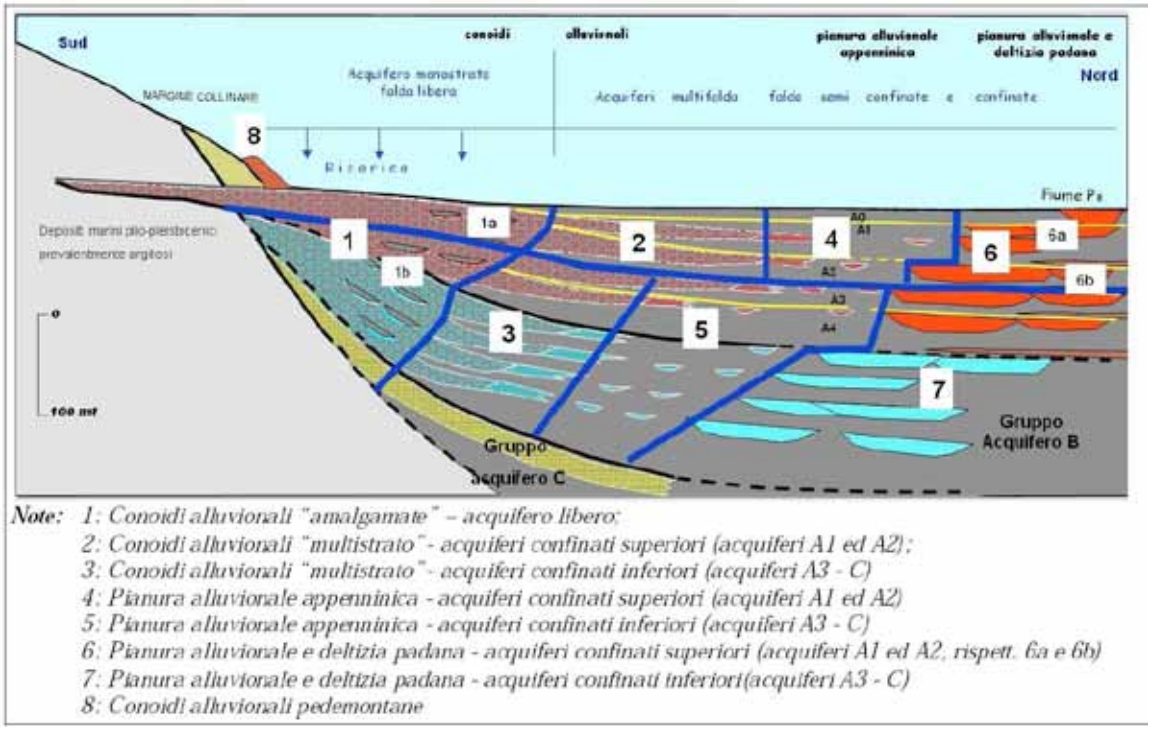
In questa unità idrogeologica il regime piezometrico presenta complessivamente due periodi di magra (una, più accentuata, in marzo e un'altra in settembre) e due di piena (un prima, più accentuato, in giugno e un secondo in dicembre). Negli acquiferi fino a 100 m di profondità i minimi piezometrici si rilevano generalmente in marzo e in rari casi in settembre; i massimi si verificano sempre, con grande uniformità, in giugno.

Negli acquiferi oltre i 100 m di profondità i minimi piezometrici si hanno generalmente in settembre o, in subordine, a marzo; i massimi si rilevano in genere a giugno e più raramente in dicembre (nelle zone estreme occidentale e orientale).

Rispetto ai regimi pluviometrico e idrologico, che pure presentano due fasi di magra (estate e inverno) e due fasi di piena (primavera e autunno), il regime piezometrico presenta sfasamenti temporali di circa un mese per gli acquiferi più superficiali, di 1-2 mesi per quelli più profondi.

16.6.2 Settore idrogeologico a sud del Po

Il settore a sud del Po, che caratterizza la pianura emiliano romagnola, è definito da acquiferi costituiti principalmente dai depositi di origine alluvionale presenti nella porzione più superficiale della pianura, per uno spessore di circa 400-500 m e, in minima parte, da depositi marino marginali. La distribuzione di questi corpi sedimentari nel sottosuolo è schematicamente rappresentata nella sezione che attraversa tutta la pianura da Sud a Nord, ovvero dal margine appenninico, che separa gli acquiferi montani da quelli di pianura, fino al fiume Po.



Note: 1: Conoidi alluvionali "amalgamate" – acquifero libero;
2: Conoidi alluvionali "multistrato" - acquiferi confinati superiori (acquiferi A1 ed A2);
3: Conoidi alluvionali "multistrato" - acquiferi confinati inferiori (acquiferi A3 - C)
4: Pianura alluvionale appenninica - acquiferi confinati superiori (acquiferi A1 ed A2)
5: Pianura alluvionale appenninica - acquiferi confinati inferiori (acquiferi A3 - C)
6: Pianura alluvionale e deltizia padana - acquiferi confinati superiori (acquiferi A1 ed A2, rispett. 6a e 6b)
7: Pianura alluvionale e deltizia padana - acquiferi confinati inferiori(acquiferi A3 - C)
8: Conoidi alluvionali pedemontane

Figura 351 - Sezione geologica schematica del sottosuolo della pianura emiliano-romagnola con indicazione degli acquiferi individuati ai sensi della Direttiva 2000/60/CE (Regione Emilia Romagna, Servizio Geologico)

Il substrato della pianura emiliano-romagnola è caratterizzato da pieghe, causate da spinte tangenziali con direzione E-W, provocate dall'innalzamento delle catene alpina ed appenninica, oggetto ultimamente di fenomeni di riattivazione che hanno generato i recenti eventi sismici nell'area modenese e ferrarese.

Le fonti di alimentazione delle falde profonde sono individuabili nell'area pedemontana appenninica, mentre le falde superficiali sono alimentate dal fiume Po e dai suoi affluenti principali, dalle perdite di subalveo del reticolo idrografico superficiale e dagli apporti meteorici.

Procedendo verso nord si passa alla pianura alluvionale e deltizia del fiume Po, costituita dall'alternanza di corpi sabbiosi molto estesi e sedimenti fini. Le sabbie derivano dalla sedimentazione del fiume e sono presenti in strati amalgamati tra loro a formare livelli anche di alcune decine di metri di spessore ed estesi per svariati chilometri.

Nella parte occidentale della Regione questi depositi hanno sempre un'origine alluvionale, mentre verso est rappresentano i diversi apparati deltizi che il Po ha sviluppato nel corso del Pleistocene. I sedimenti fini che si alternano a questi strati sabbiosi sono formati da limi più o meno argillosi, argille, sabbie limose e più raramente sabbie. Anche nella pianura alluvionale del Po ci sono presenti dei depositi argillosi ricchi in sostanza organica che fungono da livelli guida.

Dal punto di vista idrogeologico i depositi della pianura alluvionale e deltizia del Po costituiscono degli acquiferi confinati molto permeabili e molto estesi e dunque molto importanti.

Le strutture morfo-idrauliche originate dal divagare dei fiumi che hanno costruito per sedimentazione la pianura sono la matrice principale dell'assetto del territorio. La presenza di alti strutturali condiziona l'assetto idrogeologico, come ad esempio la "dorsale ferrarese", che ha fortemente influenzato la formazione dell'acquifero profondo.

Nel tratto ferrarese del fiume Po la prima falda freatica, potente da 2 a 10 m, è localizzata a profondità limitata, in vaste aree a meno di due metri sotto il piano-campagna.

In questo settore si nota la tendenza delle isopieze a diminuire da ovest verso est, parallelamente al corso del fiume, e da nord verso sud; viene quindi confermato che nel territorio ferrarese il flusso idrico è diretto dal fiume verso l'esterno; il Po alimenta quindi le falde idriche sotterranee più superficiali nei momenti di alto idrometrico.

Il settore dei territori del Po di Primaro e Po di Volano presenta caratteristiche morfologiche particolari e un tessuto idraulico complesso.

Procedendo da ovest ad est il territorio è caratterizzato dall'alto ferrarese a sud-ovest di Ferrara che degrada verso levante, sbarrato dal Po di Primaro, dal settore a nord e a sud del Po di Volano, con i margini rilevati costituiti dalla fascia costiera e dai corsi d'acqua a essi esterni con depressioni interne al di sotto del livello del mare.

La falda freatica è alimentata prevalentemente dai corsi d'acqua, dall'infiltrazione diretta di acque meteoriche e dalle irrigazioni per le finalità agricole; l'acquifero freatico (A0) risulta generalmente confinato al letto.

Al di sotto di tale letto si rinviene una falda confinata (A1) di solito sia al tetto che al letto, che in vicinanza dell'area golenale del Po può risultare localmente semiconfinata per presenza di lenti impermeabili discontinue.

In quest'ultima situazione risulta possibile un interscambio sia pure lento e ridotto, fra la falda freatica e quest'ultima. Questa particolarità in prossimità degli argini maestri, porta a evidenziare come in questo acquifero vi possa essere la presenza anche di transfert di massa, legati agli apporti più superficiali che localmente possono entrare nei livelli sottostanti. Comunque, i transfert di pressione quali risposte impulsive alle periodiche piene del Po e alle precipitazioni intense, sono in questo acquifero nettamente prevalenti sul transfert di massa.

Il livello di massima escursione della falda freatica viene raggiunto nel periodo maggio-giugno, mentre la fase di magra si verifica nel periodo settembre-ottobre. La differenza di livello della falda tra il periodo di piena e quello di magra risulta valutabile in 1,5-2,0 m.

L'acquifero A1-I è quello di maggiore interesse nel territorio ferrarese poiché viene sfruttato per uso acquedottistico (Campo pozzi di Ro Ferrarese e impianto di potabilizzazione di Pontelagoscuro), con oscillazioni annuali della soggiacenza, dell'ordine di circa 2 m, nelle immediate vicinanze al fiume Po. Le variazioni piezometriche sono legate alle modalità di sfruttamento delle risorse idriche sotterranee e alle variazioni del livello idrometrico del fiume Po. Infatti, localmente, tra il livello idrometrico del fiume e quello piezometrico della falda, esiste una correlazione positiva che indica la comunicazione idraulica tra il fiume Po e l'acquifero.

Dalla distribuzione media annuale della piezometria si evidenzia come il flusso idrico sia diretto dal fiume verso l'esterno, rappresentando l'alimentazione del Po e dei suoi rami alle falde idriche più superficiali. All'interno di questo trend relativamente omogeneo e morfologicamente appiattito, sono inseriti alcuni "disturbi" costituiti da coni di depressione localizzati che potrebbero dipendere da elevati prelievi per uso irriguo-idropotabile.

Il sistema acquifero più superficiale è in contatto diretto col fiume, da cui viene ricaricato, mentre quelli più profondi ricevono una ricarica remota che viene in parte dallo stesso fiume e in parte dalle zone di ricarica appenniniche, poste molto più a sud rispetto all'asse del Po.

Al di sopra dei depositi descritti, si trova l'acquifero freatico di pianura A0, un sottile livello di sedimenti prevalentemente fini che prosegue verso nord su tutta la pianura. Si tratta dei depositi di canale fluviale, argine e pianura inondabile in diretto contatto con i corsi d'acqua superficiali e con gli ecosistemi che da essi dipendono, oltre che con tutte le attività antropiche, data la litologia prevalentemente fine e lo spessore modesto (nell'ordine dei 10 m).

In prima approssimazione l'acquifero freatico di pianura è stato suddiviso in due distinti corpi idrici:

A) l'acquifero freatico fluviale,

B) l'acquifero freatico costiero.

Il primo è costituito prevalentemente dai depositi fluviali attuali e di paleoalveo, mentre il secondo dalle sabbie costiere affioranti (depositi di pianura costiera che identificano la fascia allineata Nord – Sud che costeggia il Mar Adriatico) che è stato recentemente caratterizzato dal Servizio Geologico della Regione Emilia Romagna (Severi, Bonzi, Calabresi e Vincenzi, R.E.R. 2010).

Nell'interfaccia terra-mare l'acquifero freatico costiero ha un tetto, laddove non affiorante, posto in corrispondenza del contrasto di facies tra depositi fini alluvionali e costieri superficiali e le prime sabbie che si sviluppano estesamente sia in profondità (da 2 a oltre 20 m di spessore) che lateralmente (da 1 a oltre 30 km); la base dell'acquifero costiero è stata tracciata in corrispondenza del netto passaggio di facies tra questa successione prevalentemente sabbiosa e massiva e i depositi stratificati, prevalentemente limosi sottostanti e laterali che costituiscono un importante contrasto e barriera di permeabilità.

Entrambi costituiscono il primo strato di tutta la porzione di pianura del territorio regionale per uno spessore che al massimo raggiunge i 20-25 m e la sola porzione sabbiosa può arrivare a una ventina di metri di spessore.

La falda freatica è alimentata prevalentemente dall'infiltrazione diretta di acque meteoriche e dalle irrigazioni per le finalità agronomiche; l'acquifero freatico risulta confinata al letto.

La funzione di monitoraggio è svolta da una rete piezometrica che insiste sull'acquifero freatico di pianura fluviale (ARPA Regione Emilia-Romagna) mentre per l'acquifero freatico costiero sono installati 26 piezometri con sonde in continuo per la misura del livello piezometrico e del profilo di conducibilità elettrica (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna).

Eseguendo una campagna di screening quali-quantitativo sull'intero sistema freatico di pianura è stato costruito un primo quadro conoscitivo dell'acquifero freatico.

I valori delle soggiacenze massime (basso idrogeologico) sono compresi fra 0,5 e 7 m e presentano una distribuzione variabile, ma abbastanza uniforme a scala di tutta la regione Emilia-Romagna.

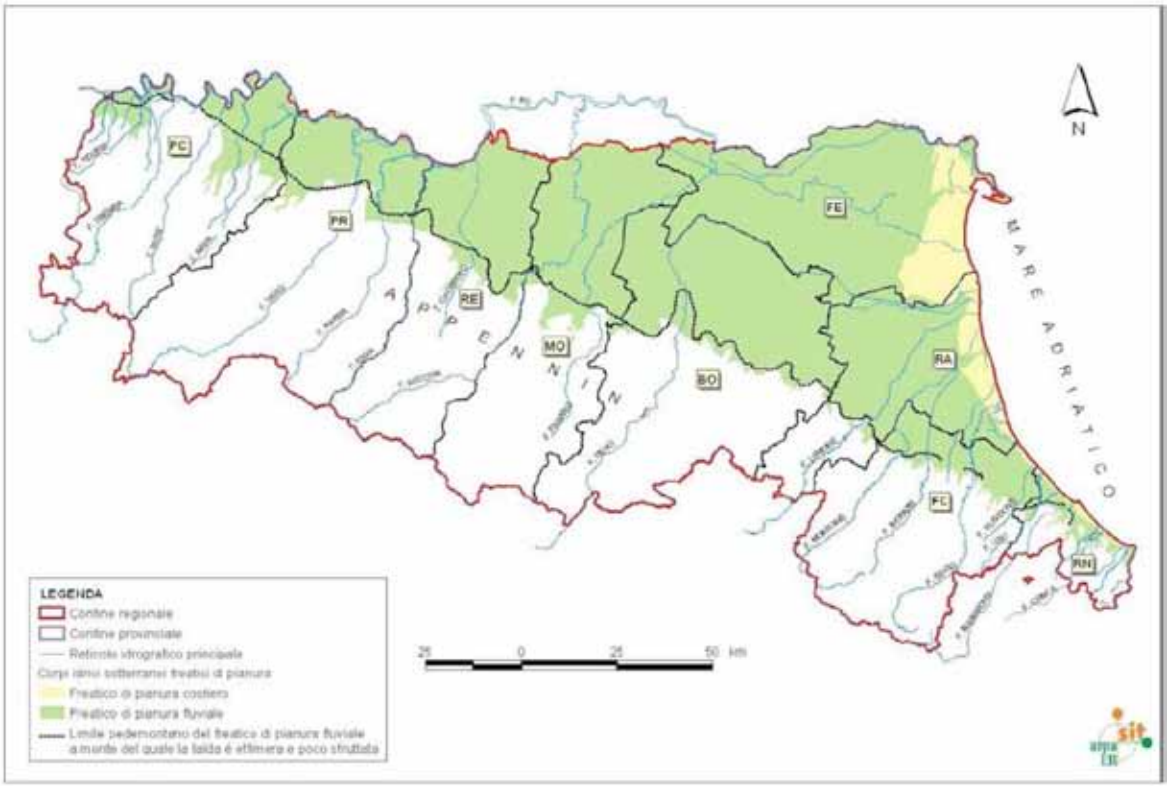


Figura 352 - Caratterizzazione dell'acquifero freatico di pianura fluviale e di pianura costiero (ARPA Emilia Romagna)

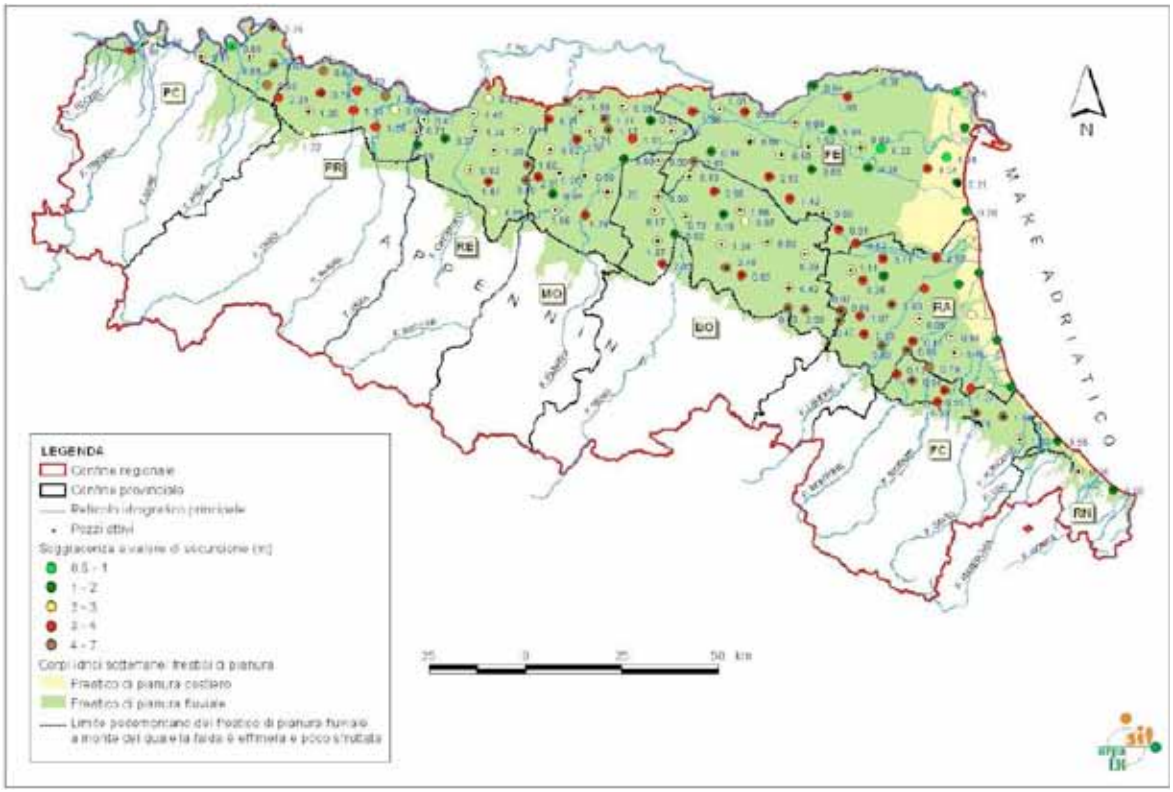


Figura 353 - Soggiacenza e valore di escursione della rete piezometrica di monitoraggio dell'acquifero freatico di pianura fluviale e costiero (ARPA Emilia Romagna e Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna)

La classe di valori di soggiacenza più presente (39%) è quella relativa all'intervallo di 2-3 m e interessa prevalentemente le province comprese fra Reggio Emilia, Bologna e la porzione centro-occidentale di Ferrara, oltre alla porzione centrale di Piacenza e a quella sud-orientale di Ravenna.

Valori più elevati di soggiacenza variabili da 3-4 m (25%) a 4-5 m (12%) fino a 5-7 metri (4%) si riscontrano:

- nel territorio compreso fra la porzione orientale della provincia di Piacenza e quella centro-orientale di Parma;
- fra la parte sud-orientale di Reggio Emilia e quella nord-occidentale di Modena;
- in grossa parte dell'acquifero freatico fluviale ravennate;
- infine nelle porzioni settentrionali e meridionali della provincia di Ferrara.

I pozzi con soggiacenze più vicine al piano campagna, variabili da 0,5-1 m (3%) a 1-2 m (16%) sono meno numerosi e interessano principalmente gran parte dell'acquifero freatico costiero, oltre ad alcuni punti ubicati nel ferrarese ed altri distribuiti sporadicamente più o meno in tutto il territorio regionale.

16.6.3 Settore idrogeologico del Delta del Po

Il sistema idrogeologico del Delta Po è un "sistema complesso", influenzato dalla notevole diversità di tessitura dei corpi acquiferi, da un territorio in gran parte soggiacente al livello medio del mare, mantenuto da un complesso sistema di opere di bonifica, condizionato dai prelievi a uso idropotabile e irriguo, dalla presenza di rami principali e di una rete secondaria di canali pensili con livello idrometrico superiore al piano campagna, regimati da opere di difesa arginale.

Non trascurabile è l'interazione con il sistema acquifero costiero e le opere di difesa a mare, la progressiva regressione del cuneo salino favorita da una subsidenza naturale e artificiale e il progressivo innalzamento del livello medio del mare.

L'evoluzione morfologica di questa porzione di territorio è stata condizionata da numerosi eventi naturali e artificiali (rotta di Ficarolo nel 1152, taglio artificiale di Porto Viro nel 1600, alluvione del Polesine del 1951, subsidenza per estrazione del metano dal 1930, erosione costiera e innalzamento del livello medio del mare, innalzamento delle opere di difesa fluviale e a mare, diminuzione del trasporto solido, etc..) che hanno modificato in modo irreversibile l'assetto del territorio.

Oggi il Delta Po è caratterizzato morfologicamente da una fascia di cordoni litoranei sabbiosi a prevalente orientamento NE-SO lungo la linea degli abitati di Rosolina, Porto Viro, Contarina, Taglio di Po e Monticelli, da un sistema di rami principali e dalla rete di canali secondari intercalati da territori bonificati e colmati nel tempo dai depositi alluvionali.

I paleoalvei e i ventagli di esondazione fluviale dalle antiche rotte fluviali, sono costituiti generalmente da sabbie o sabbie limose, legati ad ambienti di maggior energia e rappresentano le principali direttrici di flusso idrico sotterraneo.

I terreni presentano una permeabilità variabile in base alla tessitura granulometrica dei depositi (elevata nelle zone a prevalente matrice sabbiosa limosa, a zone a maggiore impermeabilità, costituite da argille e torbe delle aree depresse paludose), con presenza di una falda freatica frequentemente correlata alle escursioni dei livelli idrici dei rami deltizi e dei canali principali che attraversano il territorio in modo pensile.

L'altimetria dei luoghi degrada progressivamente da ovest verso est e, nel settore prossimo alla foce, presenta quote quasi interamente al di sotto del livello medio del mare, raggiungendo valori di due, tre metri negativi, con punte, in alcune zone interne, di quattro metri. Le zone a maggior rilievo rappresentano i paleoalvei e i corpi dunosi litoranei, sede oggi della rete viaria principale e di molti abitati.

La soggiacenza media della falda freatica è dell'ordine di 1,0-1,2 m sotto il piano campagna nei

terreni rivieraschi ai rami principali (Po di Venezia, Po di Goro e Po di Gnocca), di 1,3-1,5 m nelle zone più interne, di 0,8-0,6 m nelle zone più depresse a limitata estensione.

In generale l'andamento nel deflusso idrico sotterraneo è diretto dal fiume verso la campagna, in corrispondenza dei principali corsi d'acqua (Po di Venezia, Po di Maistra, Po di Tolle, Po di Gnocca, Po di Goro), lungo l'asse delle dune in corrispondenza degli abitati di Volto, Rosolina, Taglio di Po verso Ariano Polesine con aree di ristagno d'acqua in corrispondenza dell'Isola di Ariano.

16.7 QUALITÀ DELL'ACQUA

Al fine di ricostruire un quadro conoscitivo aggiornato dello stato della qualità delle acque superficiali del fiume Po e degli obiettivi qualitativi previsti, è stato preso come riferimento il Piano di Gestione del distretto idrografico del fiume Po - riesame e aggiornamento al 2015 (PdG Po 2015), adottato con deliberazione n. 7/2015 dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del fiume Po in data 17 dicembre 2015, nel rispetto della scadenza fissata dalla Direttiva 2000/60/CE, denominata Direttiva Quadro delle Acque (DQA) e in attuazione del D.lgs 152/06 e ss.mm.ii.

Il PdG Po 2015 costituisce il nuovo quadro generale per il ciclo di pianificazione per la gestione delle acque 2015-2021, a cui tutte le Amministrazioni e gli Enti pubblici devono fare riferimento per qualsiasi attività che possa prefigurarsi come coinvolta con i contenuti del Piano, in particolare con gli obiettivi di qualità e le misure di intervento previste dallo stesso.

La normativa nazionale sulle acque superficiali ha come principale riferimento il citato D.lgs 152/2006 e i suoi diversi decreti attuativi emanati successivamente al 2010 e, per quanto riguarda competenze e responsabilità, dal D. lgs 219/2010. La recente legge 116/2014 apporta, inoltre, ulteriori modifiche e integrazioni al D. lgs 152/06 in merito a contenuti specifici in attuazione della DQA.

Per l'attuazione delle DQA, sono inoltre state emanate ulteriori direttive concernenti le acque superficiali e sotterranee, che impongono una loro attuazione coordinata e/o integrata con gli obiettivi generali definiti dalla stessa DQA.

In particolare:

Direttiva 2006/118/CE "sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento", recepita a livello nazionale con il D. lgs n. 30/09, che istituisce misure specifiche per prevenire e controllare l'inquinamento delle acque sotterranee e in particolare definisce criteri per valutarne il buono stato chimico, per individuarne le tendenze e determinarne i punti di partenza per le inversioni di tendenza;

Direttiva 2008/105/CE "relativa a standard di qualità nel settore della politica delle acque.." (recepita a livello nazionale con il D. lgs n. 219/10, successivamente modificata con la direttiva 2013/39/UE, recepita recentemente con D. lgs.172/2015) che fissa l'elenco delle sostanze prioritarie e i loro standard di qualità per definire lo stato chimico dei corpi idrici;

Direttiva 2008/56/CE "che istituisce un quadro per l'azione comunitaria nel campo della politica per l'ambiente marino".(direttiva Strategia Marina, recepita dall'Italia con D. lgs. n. 190/10) che pone come obiettivo agli Stati membri di raggiungere entro il 2020 il buono stato ambientale;

Direttiva 2007/60 CE, "relativa alla valutazione e alla gestione del rischio di alluvioni" (direttiva Alluvioni, recepita a livello nazionale con D. lgs. n. 49/10), che pone l'esigenza di operare con politiche integrate per ridurre i rischi di alluvione e tutelare le risorse idriche, trovando tutte quelle sinergie necessarie ad evitare conflitti rispetto agli obiettivi di settore che dovranno essere fissati e raggiunti per ciascun corpo idrico.

Direttiva 2014/80/UE, che modifica l'Allegato II della direttiva 2006/118/CE sulla "protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento".

DIRETTIVE EUROPEE	NORME NAZIONALI DI RECEPIMENTO
• Direttiva 2000/60/CE: Istituzione di un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque • Direttiva 2008/105/CE: Standard di qualità ambientale nel settore della politica delle acque • Direttiva 2008/56/CE: Istituzione di un quadro per l'azione comunitaria nel campo della politica per l'ambiente marino • Direttiva 2009/90/CE: Specifiche tecniche per l'analisi chimica e il monitoraggio dello stato delle acque • Direttiva 2013/39/UE: Modifica le direttive 2000/60/CE e 2008/105/CE per quanto riguarda le sostanze prioritarie nel settore della politica delle acque	• D.Lgs. 152/2006: Norme in materia ambientale • Decreto 131/2008: Regolamento recante i criteri tecnici per la caratterizzazione dei corpi idrici (tipizzazione, individuazione dei corpi idrici, analisi delle pressioni) • Decreto 56/2009: Regolamento recante i criteri tecnici per il monitoraggio dei corpi idrici e l'identificazione delle condizioni di riferimento • Decreto 260/2010: Regolamento recante i criteri tecnici per la classificazione dello stato dei corpi idrici superficiali • Decreto 219/2010: Attuazione della Direttiva 2008/105/CE relativa a standard di qualità ambientale nel settore della politica delle acque • D:Lgs. 190/2010: Attuazione della direttiva 2008/56/CE che istituisce un quadro per l'azione comunitaria nel campo della politica per l'ambiente marino. • Decreto 156/2013: Regolamento recante i criteri tecnici per l'identificazione dei corpi idrici artificiali e fortemente modificati per le acque fluviali e lacustri, per la modifica delle norme tecniche del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante Norme in materia ambientale, predisposto ai sensi dell'art. 75, comma 3, del medesimo decreto legislativo. • Legge 116/2014: Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 24 giugno 2014, n. 91, recante disposizioni urgenti per il settore agricolo, la tutela ambientale e l'efficientamento energetico dell'edilizia scolastica e universitaria, il rilancio e lo sviluppo delle imprese, il contenimento dei costi gravanti sulle tariffe elettriche, nonché per la definizione immediata di adempimenti derivanti dalla normativa europea • D.Lgs. 172/2015: Attuazione della direttiva 2013/39/UE che modifica le direttive 2000/60/UE per quanto riguarda le sostanze prioritarie nel settore delle politiche delle acque

Tabella 116 - Direttive europee e norme nazionali di recepimento per il monitoraggio e la classificazione dello stato delle acque superficiali (fonte PdG Po 2015)

Il PdG Po 2015 contiene l'aggiornamento sullo stato dei corpi idrici del distretto idrografico del fiume Po a seguito dei monitoraggi effettuati dalle Regioni e dal Sistema delle Agenzie Ambientali (ARPA e APPA) ai sensi del D.Lgs.152/06 e ss.mm.ii.

A partire dal 2009 tutte le Regioni del distretto hanno adeguato i programmi di monitoraggio preesistenti per il territorio di competenza nel rispetto della normativa nazionale e con il PdG Po 2015 è possibile fornire un nuovo quadro sullo stato dei corpi idrici del distretto, definito dallo stato ecologico e stato chimico di tutti i corpi idrici superficiali, in piena conformità con quanto disposto dalla DQA.

Si è fatto inoltre riferimento ai report di stato delle acque superficiali redatti da ARPA Lombardia, Emilia Romagna e Veneto e ai Piani di Tutela delle Acque (PTA) regionali. In particolare:

- ARPA LOMBARDIA: Stato delle acque superficiali – Bacini asta Po, Rapporto annuale 2012 e 2013;
- ARPA EMILIA ROMAGNA: Valutazione dello stato delle acque superficiali fluviali anno 2010-2013,
- ARPAV VENETO: Stato delle acque superficiali anno 2012, 2013 e 2014;

La Regione Lombardia, con l'approvazione della L.R. 26/2003, e s.m.i. ha indicato il Piano di Tutela delle Acque come strumento per la pianificazione della tutela qualitativa e quantitativa delle acque. Il Piano è redatto in coerenza con gli atti di pianificazione di distretto idrografico. Il PTA è costituito da un atto di indirizzi e da un Programma di tutela ed uso delle acque (PTUA). Con D.G.R. n. 4596 del

17/12/2015 è stato approvato il contributo di Regione Lombardia alla revisione e aggiornamento del Piano di gestione del Distretto idrografico del Fiume Po per il ciclo di pianificazione 2016/21.

In vista dell'adozione degli aggiornamenti del PdG Po 2015, la Regione Emilia-Romagna, di recente, ha deliberato le revisioni prodotte con le DGR 1781/2015 e 2067/2015 (Aggiornamento del quadro conoscitivo di riferimento: carichi inquinanti, bilanci idrici e stato delle acque) ai fini del riesame dei Piani di Gestione Distrettuali 2015-2021, che aggiornano la DGR 350/2010; in data 22/12/2015.

La Regione Veneto con DGR 1856 del 12/12/2015 ha approvato la *"Classificazione qualitativa delle acque superficiali interne regionali: corsi d'acqua e laghi, quadriennio 2010 – 2013. Direttiva 2000/60/CE, D. lgs. 152/2006, D.M. 260/2010, Deliberazione/CR n. 83 del 9/10/2015".*

Per la descrizione dello stato delle acque superficiali si è fatto riferimento alle seguenti definizioni contenute nel PdG Po 2015:

- ***stato delle acque superficiali****: espressione complessiva dello stato di un corpo idrico superficiale, determinato dal valore più basso del suo stato ecologico e chimico". Dalla definizione derivano le due distinte classificazioni dello stato ecologico e chimico per ciascuna tipologia di corpo idrico superficiale (fiumi, laghi, acque di transizione e acque marino-costiere). Le due classificazioni vengono poi confrontate, derivando lo stato complessivo del corpo idrico superficiale.*
- ***buono stato delle acque superficiali****: lo stato raggiunto da un corpo idrico superficiale qualora il suo stato, tanto sotto il profilo ecologico quanto sotto quello chimico, possa essere definito almeno buono;*
- ***stato ecologico****: espressione della qualità della struttura e del funzionamento degli ecosistemi acquatici associati alle acque superficiali, classificato a norma dell'allegato V della DQA;*
- ***buono stato ecologico****: stato di un corpo idrico superficiale classificato in base all'allegato V della DQA;*
- ***buon potenziale ecologico****: stato di un corpo idrico artificiale o fortemente modificato, così classificato in base alle disposizioni pertinenti dell'allegato V della DQA;*
- ***buono stato chimico delle acque superficiali****: stato chimico richiesto per conseguire gli obiettivi ambientali per le acque superficiali fissati dall'articolo 4, sottocapitolo 1, lettera a), ossia lo stato raggiunto da un corpo idrico superficiale nel quale la concentrazione degli inquinanti non supera gli standard di qualità ambientali fissati dall'allegato IX, e in forza dell'articolo 16, sottocapitolo 7 della DQA e di altre normative comunitarie pertinenti che istituiscono standard di qualità ambientale a livello comunitario.*

Per i corpi idrici superficiali definiti come artificiali o fortemente modificati non si definisce lo stato ecologico, ma il potenziale ecologico che rappresenta quello stato che deve essere perseguito tenuto conto degli impatti determinati dall'uso antropico del corpo idrico che, per tale ragione, non può essere identificato come "naturale".

*Per la DQA il "**buono stato ecologico**" dei corpi idrici superficiali deve basarsi su una classificazione degli elementi biologici (fitoplancton, macroalghe, angiosperme, diatomee, macrofite, macroinvertebrati bentonici e pesci), degli elementi a supporto idromorfologici e chimico e fisicochimici e degli inquinanti specifici non prioritari. Agli elementi biologici si riconosce, pertanto, un'estrema importanza in quanto essi sono in grado di riflettere la qualità delle acque in cui vivono e gli eventuali effetti dei fattori di disturbo ambientali e antropici presenti.*

La classificazione dello stato/potenziale ecologico viene espressa attraverso 5 giudizi o classi: elevato, buono, sufficiente, scarso e cattivo.

*Lo **stato ecologico elevato** è assegnato ai corpi idrici dove la qualità biologica, chimica e morfologica è associata ad una condizione di assenza o basse pressioni antropiche. Questa condizione è anche definita come "condizione di riferimento", cioè il miglior stato raggiungibile.*

La condizione di riferimento è tipo specifica e può essere differente tra le diverse categorie di acqua, ma anche tra i diversi elementi biologici.

*In un corpo idrico classificato in **stato ecologico buono** la condizione degli elementi di qualità biologica e chimico-fisici si discosta solo lievemente da quella di riferimento e quindi, anche qualora fossero presenti pressioni antropiche, esse non comportano distorsioni significative dello stato rispetto anche a quello misurato per un corpo idrico in uno stato elevato. Quello che può risultare*

determinante per passare da uno stato elevato a uno buono è principalmente dovuto agli elementi di qualità idromorfologica.

I giudizi inferiori allo stato di buono misurano livelli progressivi di alterazione della qualità del corpo idrico dovuta all'attività antropica rispetto alla condizione presente in un corpo idrico superficiale definito inalterato.

*Gli **elementi di qualità biologica** richiesti per la stima dello stato ecologico sono definiti e comuni per tutti i distretti europei e sono:*

per i fiumi e i laghi: fitoplancton, fitobenthos, macrofite, macrobenthos e i pesci;

per le acque di transizione e marino- costiere: fitoplancton, macroalghe, angiosperme, macrobenthos e i pesci (solo per le acque di transizione).

*Gli **elementi di qualità chimica e fisico-chimica** da monitorare sono definiti come gli elementi di supporto alle biocenosi. In termini generici si intendono per le acque superficiali ad esempio: trasparenza (non per i fiumi), condizioni termiche e di ossigenazione, i nutrienti, l'alcalinità ecc.*

Per questi elementi lo stato ecologico elevato corrisponde a condizioni in cui le variazioni possibili sono normalmente associate ad ambienti indisturbati. Per lo stato ecologico buono si richiede che questi elementi di qualità corrispondano agli standard stabiliti da ciascun Stato Membro per mantenere il funzionamento dell'ecosistema acquatico e per raggiungere le condizioni necessarie a supporto degli elementi di qualità biologica di un buono stato ecologico.

*Ogni Stato Membro deve inoltre definire lo stato ecologico di un corpo idrico sulla base della presenza/assenza di **inquinanti specifici**, cioè di quegli inquinanti di origine antropica che possono essere scaricati in quantità significative nelle acque. Per un corpo idrico in stato ecologico buono, gli standard di qualità fissati per tutti gli inquinanti specifici non devono mai essere superati, presupponendo che il valore dello standard di qualità corrisponda alla quantità immessa che non produce impatti sulle comunità acquatiche animali e vegetali.*

Per poter classificare un corpo idrico in stato elevato, la DQA richiede che non siano presenti alterazioni degli elementi di qualità idromorfologica, se non ad un livello minimo non impattante.

Per i corpi idrici artificiali e designati come fortemente modificati non si richiede che venga raggiunto lo stato ecologico buono, ma quello di buon potenziale ecologico, definito in funzione dei possibili impatti irremovibili degli usi sociali ed economici presenti e che risultano essere significativi sulle condizioni idromorfologiche del corpo idrico così designato.

Il potenziale ecologico è, quindi, definito dagli standard degli elementi di qualità utilizzati per definire lo stato ecologico dei corpi idrici naturali, ma dopo che sono stati rivisti e corretti sulla base dell'entità degli impatti delle pressioni idromorfologiche che hanno portato a definire i corpi idrici in artificiali e/o fortemente modificati o in funzione delle misure di mitigazione prese per mitigare gli impatti di altre eventuali misure.

*Lo **stato chimico** di tutti i corpi idrici superficiali è basato sulla presenza delle sostanze chimiche definite come sostanze prioritarie (metalli pesanti, pesticidi, inquinanti industriali, interferenti endocrini,ecc.) ed elencate nella Direttiva 2008/105/CE, aggiornata di recente con la Direttiva 2013/39/UE. Queste sostanze chimiche sono distinte in base alla loro pericolosità in tre categorie, prioritarie, pericolose prioritarie e altri inquinanti. Per ognuna di esse sono fissati degli standard di qualità ambientali (SQA) distinti per le matrici di analisi (acqua, sedimenti, biota) dove possono essere presenti o accumularsi.*

Il non superamento degli SQA fissati per ciascuna di queste sostanze implica l'assegnazione di "stato chimico buono" al corpo idrico, altrimenti il giudizio è "non raggiungimento dello stato di buono". Un corpo idrico che presenta almeno un superamento degli SQA fissati per le sostanze prioritarie non potrà mai essere classificato in uno stato buono, a prescindere dal giudizio assegnato allo stato ecologico, perché l'assegnazione del giudizio finale sulla qualità ambientale del corpo idrico deve basarsi sul giudizio peggiore tra lo stato ecologico e lo stato chimico.

16.7.1 Reti di monitoraggio

Per i diversi tipi di monitoraggio, rispetto a quanto richiesto dalla DQA, le norme nazionali (D.lgs.152/06 e ss.mm.ii) forniscono ulteriori livelli di specificazione delle finalità che devono essere perseguite e di come tali monitoraggi debbano essere condotti.

Nella seguente Tabella 117 sono riportate le tipologie di monitoraggio previste.

TIPO MONITORAGGIO	OGGETTO	FREQUENZA	OBIETTIVI/CONTESTO OPERATIVO
SORVEGLIANZA	Su tutti gli elementi di qualità utilizzati per la classificazione	minima 6 anni	• integra e valida le procedure di valutazione iniziali dello stato condotte ai sensi dell'All. II • supporta la progettazione dei futuri programmi di monitoraggio • valuta le variazioni a lungo termine (di origine naturale o risultanti da una diffusa attività di origine antropica)
OPERATIVO	si applica ai corpi idrici a rischio di fallire l'obiettivo, e solo per i fattori critici	minima 3 anni	• valuta il successo delle misure attuate per migliorare la situazione
INDAGINE	da condurre solamente in aree problematiche	da definire	• qualora non si abbiano informazioni adeguate sulle cause del degrado di un corpo idrico (e/o del non raggiungimento degli obiettivi di qualità) • valuta la magnitudine dei fenomeni di inquinamento accidentale
AREE PROTETTE	Aree protette di cui all'art. 6 della DQA	da definire in funzione della tipologia di area protetta	• valuta la conformità delle aree protette in funzione dei requisiti specifici di ciascuna tipologia

Tabella 117 - Tipi di monitoraggio (fonte PdG Po 2015)

Per il fiume Po e i rami principali (Po di Venezia, Po di Maistra, Po di Tolle, Po di Gnocca e Po di Goro) si è fatto riferimento alle stazioni di monitoraggio riportate in Tabella 118.

PROG. KM	ID STAZIONE	REGIONE	ROVINCIA	LOCALITÀ	IPO STAZIONE	MONITORAGGIO
361,3	N00815ir	Lombardia	Lodi	Castelnuovo Bocca d'Adda	Operativo	Chimico-Ecologico
374,3	N00816ir1	Lombardia	Cremona	Cremona	Operativo	Chimico-Ecologico
402,6	01000300	Emilia Romagna	Parma	Ragazzola-Roccabianca	Operativo - Area protetta - Dir. Habitat	Chimico-Ecologico
438,3	N00817ir1	Lombardia	Mantova	Viadana	Operativo	Chimico-Ecologico
439,6	01000500	Emilia Romagna	Reggio Emilia	Boretto	Operativo - Area protetta - Dir. Habitat	Chimico-Ecologico
471,7	N00818ir1	Lombardia	Mantova	Borgoforte	Operativo	Chimico-Ecologico
528,6	N00819ir1	Lombardia	Mantova	Sermide	Operativo	Chimico-Ecologico
529,6	193	Veneto	Rovigo	Castelmassa	Operativo-Sorveglianza-Rete nucleo	Chimico
543,5	01000600	Emilia Romagna	Ferrara	Stellata-Bondeno	Operativo - Area protetta - Dir. Habitat	Chimico-Ecologico
562,9	01000700	Emilia Romagna	Ferrara	Pontelagoscuro-Ferrara	Operativo -Area protetta per uso potabile-Area protetta - Dir. Habitat	Chimico-Ecologico
595,6	229	Veneto	Rovigo	Canalnovo	Operativo-Sorveglianza/ rete nucleo-Area protetta per uso potabile	Chimico-Ecologico
603,2	01000900	Emilia Romagna	Ferrara	Serravalle - Berra	Operativo -Area protetta per uso potabile-Area protetta - Dir. Habitat	Chimico-Ecologico
607,9	227	Veneto	Rovigo	Sabbioni-Presa Acquedotto Delta Po	Operativo -Area protetta per uso potabile	Chimico
633,1	347	Veneto	Rovigo	Ponte Molo-Presa Acquedotto Delta Po	Operativo	Chimico-Ecologico
13,6	230	Veneto	Rovigo	Boccasette c/o Imbarcadero	Operativo	Chimico
1,8	232	Veneto	Rovigo	Polesine Camerini-Ponte	Operativo	Chimico
16,4	233	Veneto	Rovigo	S. Rocco-Imbarcadero	Operativo	Chimico
41,8	234	Veneto	Rovigo	Gorino-P.t di Barche	Operativo	Chimico

Tabella 118 - Stazioni di monitoraggio lungo il tratto di fiume Po oggetto di studio



Figura 354 - Ubicazione delle stazioni di monitoraggio lungo il tratto di fiume Po oggetto di studio

Le diverse reti di monitoraggio attivate dalle Regioni nel periodo 2009-2014 hanno consentito di classificare tutti i corpi idrici individuati, sulla base anche della possibilità di raggrupparli.

Il corpo idrico rappresenta l'unità di base gestionale prevista dalla DQA. E' una parte di corso d'acqua omogenea per tipologia, pressioni e stato. La DQA prevede che un corpo idrico debba appartenere ad un unico tipo fluviale; sulla base di ciò, tutti i tratti fluviali tipizzati possono essere considerati corpi idrici. All'interno di ogni tratto tipizzato sarà quindi possibile prevedere un'eventuale suddivisione in più corpi idrici sulla base dei seguenti criteri:

- caratteristiche fisiche naturali,
- pressioni prevalenti,
- stato di qualità.

I corpi idrici del fiume Po di interesse ricadono nei tipi fluviali "06SS5T" (Decreto n. 131 del 16/6/2008) tutti classificati come "naturale" secondo la Tabella 119.

IDRO-ECOREGIONI HER		ORIGINE		DISTANZA SORGENTE		INFLUENZA BACINO MONTE IBM	
1-9	PERENNI	SS	Scorrimento Superficiale	1	<5 km	T	Nulla o trascurabile
		GL	Grandi Laghi	2	5-25 km	D	Debole
		SR	Sorgenti	3	25-75 km	F	Forte
		AS	Acque Sotterranee	4	75-150 km	N	Non applicabile
		GH	Ghiacciai	5	>150 km		
				6	<10 km		

Tabella 119 - Tipi fluviali

Nella Figura 355 e nella Tabella 120 sono rappresentati e descritti i corpi idrici del fiume Po e del Delta Po e le stazioni di monitoraggio di riferimento per ogni tratto.



Figura 355 - Individuazione dei corpi idrici lungo il tratto di fiume Po oggetto di studio

CORPO IDRICO	REGIONE	STAZIONI DI MONITORAGGIO DI RIFERIMENTO	TRATTO
N00815IR	Emilia-Romagna - Lombardia	N00815ir1 - N00816ir1 ARPA Lombardia	Fiume Po da Isola Serafini a confluenza Ongina
N00816IR	Emilia-Romagna - Lombardia	01000300 ARPA Emilia Romagna	Fiume Po da confluenza Ongina a confluenza Taro
N00817IR	Emilia-Romagna - Lombardia	N00817ir ARPA Lombardia; 01000500 ARPA Emilia Romagna	Fiume Po da confluenza Taro a confluenza Oglio
N00818lo	Lombardia	N00818ir1 ARPA Lombardia	Fiume Po da confluenza Oglio a confluenza Mincio
N00819IR	Emilia-Romagna – Lombardia - Veneto	01000600 – 01000700 – 01000900 ARPA Emilia Romagna; N00819ir1 ARPA Lombardia; 193 - 229 ARPA Veneto	Fiume Po da confluenza Mincio a incile Po di Goro
53560ve	Veneto	227 – 347 ARPAV Veneto	Fiume Po di Venezia
54550ve	Veneto	230 ARPAV Veneto	Fiume Po di Maistra
55550ve	Veneto	232 ARPAV Veneto	Fiume Po di Tolle
56350ve	Veneto	233 ARPAV Veneto	Fiume Po di Gnocca
56450IR	Emilia Romagna - Veneto	234 ARPAV Veneto	Fiume Po di Goro

Tabella 120 - Corpi idrici lungo il tratto di fiume Po oggetto di studio

Le reti di monitoraggio regionali possono differire essenzialmente rispetto a:

- programmazione del monitoraggio operativo e di sorveglianza: nel distretto padano le Regioni hanno previsto monitoraggi articolati su trienni/sessenni diversi: la Regione Emilia Romagna e Veneto hanno una programmazione sessennale 2010-2015 con trienni 2010-2012 e 2013-2015;
- la Regione Lombardia ha una programmazione sessennale 2009-2014 suddivisa nei trienni: 2009-2011 e 2012-2014.
- per i corpi idrici a rischio, per il monitoraggio degli elementi di qualità biologici, idromorfologici, degli inquinanti specifici e delle sostanze prioritarie: la scelta dei parametri da monitorare è stata fatta in funzione delle specificità territoriali e delle pressioni e impatti presenti, che possono differire da regione a regione.

16.7.2 Stato ecologico

Lo stato ecologico del fiume Po da Cremona alla foce, definito nel Pdg Po 2015, è caratterizzato da una classificazione "sufficiente" ad eccezione del tratto "scarso" compreso tra confluenza Mincio e incile del Po di Goro.



Figura 356 - Stato ecologico dei corpi idrici lungo il tratto di fiume Po oggetto di studio (fonte dati PdG Po 2015)

In particolare per le stazioni di monitoraggio lombarde si ha il dettaglio di Tabella 121.

PROG. KM	ID STAZIONE	REGIONE	ROVINCIA	LOCALITÀ	STATO ECOLOGICO (2009-2011)	LEMENTO CHE DETERMINA LA CLASSIFICAZIONE
361,3	N00815ir	Lombardia	Lodi	Castelnuovo Bocca d'Adda	SUFFICIENTE	diatomee - LIMeco AMPA - glifosate - metolachlor
374,3	N00816ir1	Lombardia	Cremona	Cremona	SUFFICIENTE	LIMeco
438,3	N00817ir1	Lombardia	Mantova	Viadana	SUFFICIENTE	macroinvertebrati
471,7	N00818ir1	Lombardia	Mantova	Borgoforte	SUFFICIENTE	macroinvertebrati
528,6	N00819ir1	Lombardia	Mantova	Sermide	SUFFICIENTE	macroinvertebrati AMPA - glifosate

Tabella 121 - Stato ecologico del triennio 2009-2011 per le stazioni di monitoraggio lombarde

Il trend nelle stazioni di monitoraggio lombarde dell'indice LIMeco del 2012-2013 porta un miglioramento al 2013 per la EQB delle diatomee per tutte le stazioni, come indicato in Tabella 122.

PROG. KM	ID STAZIONE	REGIONE	ROVINCIA	LOCALITÀ	LIMECO 2012	LIMECO 2013
361,3	N00815ir	Lombardia	Lodi	Castelnuovo Bocca d'Adda	N.D.	N.D.
374,3	N00816ir1	Lombardia	Cremona	Cremona	SUFFICIENTE	BUONO
438,3	N00817ir1	Lombardia	Mantova	Viadana	BUONO	BUONO
471,7	N00818ir1	Lombardia	Mantova	Borgoforte	BUONO	BUONO
528,6	N00819ir1	Lombardia	Mantova	Sermide	BUONO	BUONO

Tabella 122 - Indice LIMeco 2012-2013 per le stazioni di monitoraggio lombarde

Per quanto riguarda le stazioni di monitoraggio dell'Emilia Romagna lo stato ecologico nel triennio 2010 -2012 è riportato nella Tabella 123.

PROG. KM	ID STAZIONE	REGIONE	ROVINCIA	LOCALITÀ	STATO ECOLOGICO 2010 - 2012	LEMENTO CHE DETERMINA LA CLASSIFICAZIONE
402,6	01000300	Emilia Romagna	Parma	Ragazzola-Roccabianca	SUFFICIENTE	LIMeco - MacroBenthos
439,6	01000500	Emilia Romagna	Reggio Emilia	Boretto	SUFFICIENTE	LIMeco - MacroBenthos
543,5	01000600	Emilia Romagna	Ferrara	Stellata-Bondeno	SCARSO	MacroBenthos
562,9	01000700	Emilia Romagna	Ferrara	Pontelagoscuro-Ferrara	SCARSO	MacroBenthos
603,2	01000900	Emilia Romagna	Ferrara	Serravalle - Berra	SCARSO	

Tabella 123 Stato ecologico nel triennio 2010-2012 per le stazioni di monitoraggio del fiume Po in Emilia Romagna

Il trend del monitoraggio 2013 LIMeco delle stazioni dell'Emilia Romagna conferma quello del triennio 2010-2012.

Per le stazioni di monitoraggio della Regione Veneto lungo il fiume Po e i rami deltizi del Po di Maistra, Tolle, Gnocca e Goro lo stato ecologico del triennio 2010-2012 è descritto nella Tabella 124.

PROG. KM	ID STAZIONE	REGIONE	ROVINCIA	LOCALITÀ	STATO ECOLOGICO 2010 - 2012	LEMENTO CHE DETERMINA LA CLASSIFICAZIONE
529,6	193	Veneto	Rovigo	Castelmassa	SCARSO	EQB Macroinvertebrati
595,6	229	Veneto	Rovigo	Canalnovo	SCARSO	EQB Macroinvertebrati
607,9	227	Veneto	Rovigo	Sabbioni-Presa Acquedotto Delta Po	SUFFICIENTE	LIMeco
633,1	347	Veneto	Rovigo	Ponte Molo-Presa Acquedotto Delta Po	SUFFICIENTE	LIMeco
13,6	230	Veneto	Rovigo	Boccasette c/o Imbarcadero	SUFFICIENTE	LIMeco
1,8	232	Veneto	Rovigo	Polesine Camerini-Ponte	SUFFICIENTE	LIMeco
16,4	233	Veneto	Rovigo	S. Rocco-Imbarcadero	SUFFICIENTE	LIMeco
41,8	234	Veneto	Rovigo	Gorino-P.t di Barche	SUFFICIENTE	LIMeco

Tabella 124 - Stato ecologico nel triennio 2010-2012 per le stazioni di monitoraggio del fiume Po in Veneto

Il monitoraggio 2013-2014 registra un trend positivo dell'indice LIMeco per le stazioni 227 e 347, mentre si mantiene la classificazione LIMeco "sufficiente" per le altre stazioni (Tabella 125).

PROG. KM	ID STAZIONE	REGIONE	ROVINCIA	LOCALITÀ	LIMECO 2013	LIMECO 2014
529,6	193	Veneto	Rovigo	Castelmassa	SUFFICIENTE	SUFFICIENTE
595,6	229	Veneto	Rovigo	Canalnovo	SUFFICIENTE	SUFFICIENTE
607,9	227	Veneto	Rovigo	Sabbioni-Presa Acquedotto Delta Po	SUFFICIENTE	BUONO
633,1	347	Veneto	Rovigo	Ponte Molo-Presa Acquedotto Delta Po	SUFFICIENTE	BUONO
13,6	230	Veneto	Rovigo	Boccasette c/o Imbarcadero	SUFFICIENTE	SUFFICIENTE
1,8	232	Veneto	Rovigo	Polesine Camerini-Ponte	SUFFICIENTE	SUFFICIENTE
16,4	233	Veneto	Rovigo	S. Rocco-Imbarcadero	SUFFICIENTE	SUFFICIENTE
41,8	234	Veneto	Rovigo	Gorino-P.t di Barche	SUFFICIENTE	SUFFICIENTE

Tabella 125 - Indice LIMeco 2013-2014 per le stazioni di monitoraggio del fiume Po in Veneto

16.7.3 Stato chimico

Lo stato chimico del tratto in esame di fiume Po, definito dal PdG Po 2015, è classificato "buono" ad eccezione del tratto compreso tra confluenza Mincio e incile Po di Goro, classificato "non buono".



Figura 357 - Stato chimico dei corpi idrici lungo il tratto di fiume Po oggetto di studio (fonte dati PdG Po 2015)

In particolare per le stazioni di monitoraggio lombarde si ha il dettaglio di Tabella 126

PROG. KM	ID STAZIONE	REGIONE	ROVINCIA	LOCALITÀ	STATO CHIMICO (2009-2011)
361,3	N00815ir	Lombardia	Lodi	Castelnuovo Bocca d'Adda	BUONO
374,3	N00816ir1	Lombardia	Cremona	Cremona	BUONO
438,3	N00817ir1	Lombardia	Mantova	Viadana	BUONO
471,7	N00818ir1	Lombardia	Mantova	Borgoforte	BUONO
528,6	N00819ir1	Lombardia	Mantova	Sermide	BUONO

Tabella 126 - Stato chimico del triennio 2009-2011 per le stazioni di monitoraggio in Lombardia

Il trend dello stato chimico per le stazioni lombarde negli anni 2012 e 2013 è descritto in Tabella 127, e mette in evidenza un peggioramento nella stazione di Sermide.

PROG. KM	ID STAZIONE	REGIONE	ROVINCIA	LOCALITÀ	STATO CHIMICO 2012	STATO CHIMICO 2013
361,3	N00815ir	Lombardia	Lodi	Castelnuovo Bocca d'Adda	ND	ND
374,3	N00816ir1	Lombardia	Cremona	Cremona	BUONO	BUONO
438,3	N00817ir1	Lombardia	Mantova	Viadana	BUONO	BUONO
471,7	N00818ir1	Lombardia	Mantova	Borgoforte	BUONO	BUONO
528,6	N00819ir1	Lombardia	Mantova	Sermide	BUONO	NON BUONO

Tabella 127 - Stato chimico-2012-2013 per le stazioni di monitoraggio in Lombardia

Per quanto riguarda le stazioni di monitoraggio dell'Emilia Romagna lo stato chimico nel triennio 2010 -2012 è riportato nella Tabella 128.

PROG. KM	ID STAZIONE	REGIONE	ROVINCIA	LOCALITÀ	STATO CHIMICO 2012	ELEMENTO CRITICO
402,6	01000300	Emilia Romagna	Parma	Ragazzola-Roccabianca	BUONO	
439,6	01000500	Emilia Romagna	Reggio Emilia	Boretto	NON BUONO	Difenileteri Bromati
543,5	01000600	Emilia Romagna	Ferrara	Stellata-Bondeno	BUONO	
562,9	01000700	Emilia Romagna	Ferrara	Pontelagoscuro-Ferrara	BUONO	
603,2	01000900	Emilia Romagna	Ferrara	Serravalle - Berra	BUONO	

Tabella 128 - Stato chimico del triennio 2010 - 2012 per le stazioni di monitoraggio lungo il fiume Po in Emilia Romagna

Il monitoraggio 2013 ha confermato lo stato chimico del triennio precedente ad eccezione della stazione di Boretto, con un miglioramento dello stato chimico da "non buono" a buono (Tabella 129).

PROG. KM	ID STAZIONE	REGIONE	ROVINCIA	LOCALITÀ	STATO CHIMICO 2012	ELEMENTO CRITICO
402,6	01000300	Emilia Romagna	Parma	Ragazzola-Roccabianca	BUONO	
439,6	01000500	Emilia Romagna	Reggio Emilia	Boretto	BUONO	
543,5	01000600	Emilia Romagna	Ferrara	Stellata-Bondeno	BUONO	
562,9	01000700	Emilia Romagna	Ferrara	Pontelagoscuro-Ferrara	BUONO	
603,2	01000900	Emilia Romagna	Ferrara	Serravalle - Berra	BUONO	

Tabella 129 - Stato chimico 2013 per le stazioni di monitoraggio lungo il fiume Po in Emilia Romagna

Per le stazioni di monitoraggio della Regione Veneto lungo il fiume Po e i rami deltizi di Maistra, Tolle,

Gnocca e Goro lo stato chimico nel periodo 2010-2013 è riportato in Tabella 130.

PROG. KM	ID STAZIONE	REGIONE	ROVINCIA	LOCALITÀ	STATO CHIMICO (2010-2013)
529,6	193	Veneto	Rovigo	Castelmassa	NON BUONO
595,6	229	Veneto	Rovigo	Canalnovo	NON BUONO
607,9	227	Veneto	Rovigo	Sabbioni-Presa Acquedotto Delta Po	BUONO
633,1	347	Veneto	Rovigo	Ponte Molo-Presa Acquedotto Delta Po	BUONO
13,6	230	Veneto	Rovigo	Boccasette c/o Imbarcadero	BUONO
1,8	232	Veneto	Rovigo	Polesine Camerini-Ponte	BUONO
16,4	233	Veneto	Rovigo	S. Rocco-Imbarcadero	BUONO
41,8	234	Veneto	Rovigo	Gorino-P.t di Barche	BUONO

Tabella 130 - Stato chimico del triennio 2010 - 2013 per le stazioni di monitoraggio lungo il fiume Po in Veneto

Per il 2014 si è riscontrata almeno una presenza al di sopra del limite di quantificazione degli standard SQA dell'elenco di priorità indicate dalla tabella 1/A, Allegato 1 del Decreto 260 Ministeriale n. 260 dell- 8 novembre 2010 dei valori di Nichel per tutte le stazioni e dei valori di Piombo per le stazioni 229, 247, 347.

16.7.4 Stato ambientale

Per i corpi idrici superficiali è previsto che lo "stato ambientale", espressione complessiva dello stato del corpo idrico, derivi dalla valutazione attribuita allo "stato ecologico" e allo "stato chimico" del corpo idrico secondo lo schema riportato in Figura 358.

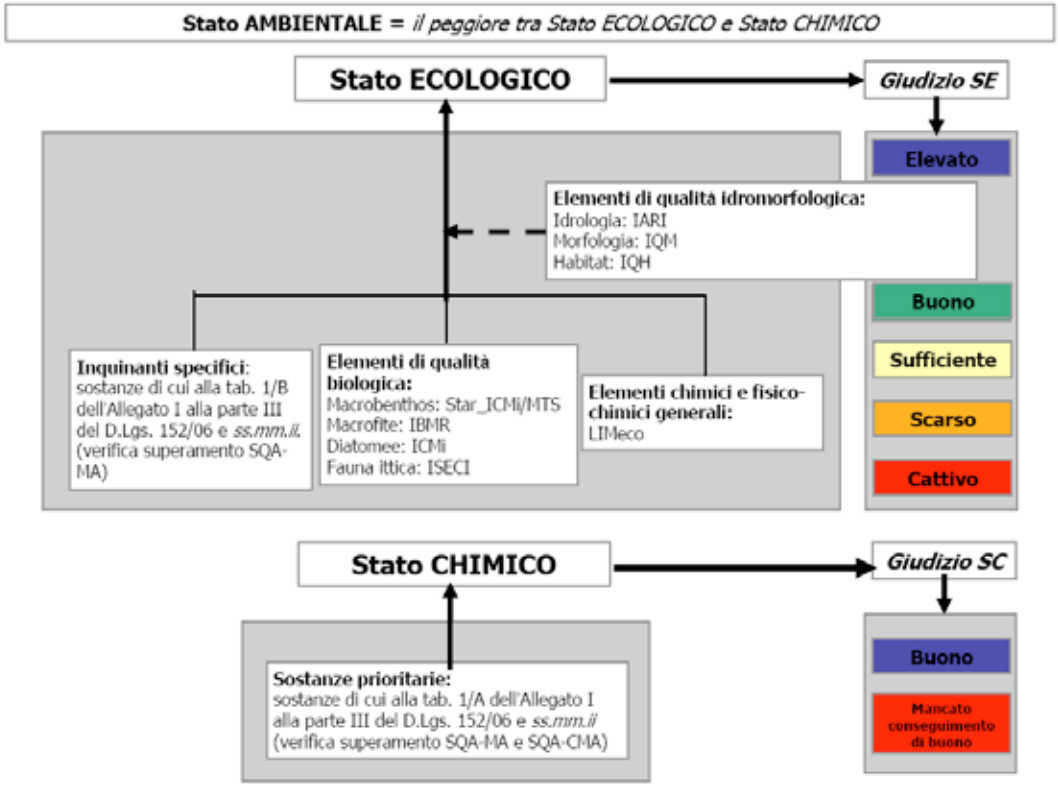


Figura 358 - Schema di classificazione dello stato dei corpi idrici fluviali naturali ai sensi del D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii (fonte PdG Po 2015)

Lo stato ambientale, sulla base di quanto definito per lo stato ecologico e chimico nel PdG Po 2015, è classificato "non buono" per tutto il tratto oggetto di studio.

16.7.5 Obiettivo di stato ecologico e chimico del PdG Po 2015

Per l'obiettivo ecologico la classificazione "buono" è prevista per il 2021 nel tratto da confluenza Oglio a confluenza Mincio e per il 2027 nei rimanenti tratti (Figura 359).



Figura 359 - Obiettivo ecologico previsto nel PdG Po 2015

Per l'obiettivo chimico la classificazione "buono" è prevista per il 2021 per il tratto da confluenza Mincio a incile Po di Goro e nel 2015 nei rimanenti tratti (Figura 360).



Figura 360 - Obiettivo chimico previsto nel PdG Po 2015

16.8 CUNEO SALINO

L'espressione "cuneo salino" indica la risalita dell'acqua di mare sul fondo dell'alveo lungo i tratti terminali dei fiumi che si presenta quando la velocità di deflusso scende al di sotto di un valore critico. Il fenomeno è dunque sempre presente nel tratto focivo di un corso d'acqua e la sua estensione verso monte dipende da numerosi fattori e processi che derivano normalmente dalla combinazione di fenomeni naturali e antropici sia a scala locale che di intero bacino idrografico.

Nel Delta del Po l'intrusione salina lungo i rami del Delta ha mostrato un netto trend ad estendersi negli ultimi decenni e le cause principali vengo fatte risalire ai seguenti fenomenti:

- l'abbassamento dei terreni deltizi a causa sia della subsidenza naturale sia, soprattutto, della subsidenza di origine antropica, prevalentemente nel periodo che va dagli anni '50 agli anni '70 del secolo scorso;
- la variazione del regime pluviometrico sul bacino idrografico, con la riduzione del valore complessivo delle precipitazioni annue e la tendenza alla concentrazione delle stesse in alcuni periodi dell'anno, che determina piene più rapide e prolungati periodi di portate basse;
- l'aumento delle derivazioni per diversi usi lungo l'asta del Po;
- le modifiche nel regime della produzione di energia idroelettrica dai bacini artificiali alpini, che spesso non coincide con l'esigenza di sostenere i periodi di magra del Po;

- il minore rilascio dai grandi laghi alpini per evitare carenze di disponibilità nei periodi siccitosi;
- l'abbassamento dell'alveo del Po per le diverse azioni antropiche che influenzano o hanno influenzato in modo negativo l'equilibrio del trasporto solido;
- le opere di adeguamento delle foci del Po (es. ansa di Volta Vaccari, del Po di Pila e la nuova foce Po- Busa Storiona-Po di Tolle) che hanno migliorato il deflusso a mare delle piene ma anche facilitato l'entrata dell'acqua di mare nelle fasi di alta marea.

Sul fiume Po il fenomeno è dunque quasi sempre presente, è più o meno pronunciato nei vari periodi dell'anno e interessa, con diverse intensità, i rami del Delta; negli anni '50-'60 del secolo scorso si estendeva a non più di 2-3 km dalla foce, nel 1970-80 arrivava già a circa 10 km di distanza, negli anni recenti la sua estensione è stata rilevata a oltre 20 km dal mare.

A questo riguardo, sono molto chiari i dati sistematicamente accertati nel periodo 2003-2006 caratterizzato da magre estive eccezionali: nel 2003 il periodo continuativo di portata inferiore a 330 m^3/s a Pontelagoscuro (16 giorni in luglio e 9 in agosto), fu sufficiente per mettere in crisi il sistema irriguo locale; nel 2005 il periodo critico iniziò il 15 giugno e terminò il 12 agosto con brevi interruzioni, per un totale di 35 giorni, nel 2006, già dal 9 giugno la magra di Po ha causato l'intrusione dell'acqua salata fino ad oltre 20 km dal mare per 60 giorni complessivi e la portata minima a Pontelagoscuro ha raggiunto 156 m^3 /s (la minima storica precedente, aprile del 1949, è stata di 275 m3/s).

Una portata a Pontelagoscuro variabile fra i 250 e i 330 m^3/s determina ora nell'area deltizia l'ingressione del cuneo salino fino all'incile del Po di Gnocca (20 km dal mare) e la conseguente impossibilità di irrigare i terreni in tutto il territorio di Porto Tolle e a sud di Ca' Vendramin, nell'Isola di Ariano.

Per portate ulteriormente inferiori, comprese fra i 190 e i 250 m^3/s, l'ingressione del cuneo salino supera l'incile del Po di Gnocca fino a una distanza dalla foce di 25-30 km con l'impossibilità di irrigare in tutta l'Isola di Ariano fino alla SS Romea e nel territorio di Porto Viro a sud del Collettore Padano - Polesano.

Gli effetti negativi del fenomeno nell'area del Delta del Po riguardano quindi in sintesi:

- la modifica delle caratteristiche biologiche dei tratti terminali con variazioni della catena trofica e conseguenti effetti sulla fauna ittica anche superiore sino ad interessare le attività di pesca;
- l'interruzione delle derivazioni irrigue, con gravi inconvenienti per l'attività agricola (quando la salinità dell'acqua derivata supera l'1,5-2,0% è dannoso irrigare: soltanto la risaia può superare di poco il 3%);
- l'interruzione degli approvvigionamenti acquedottistici della parte più orientale del Polesine, dove le centrali di potabilizzazione non sono in grado di desalinizzare l'acqua;
- la salinizzazione delle falde; è un fenomeno in progressivo aumento e difficilmente reversibile.

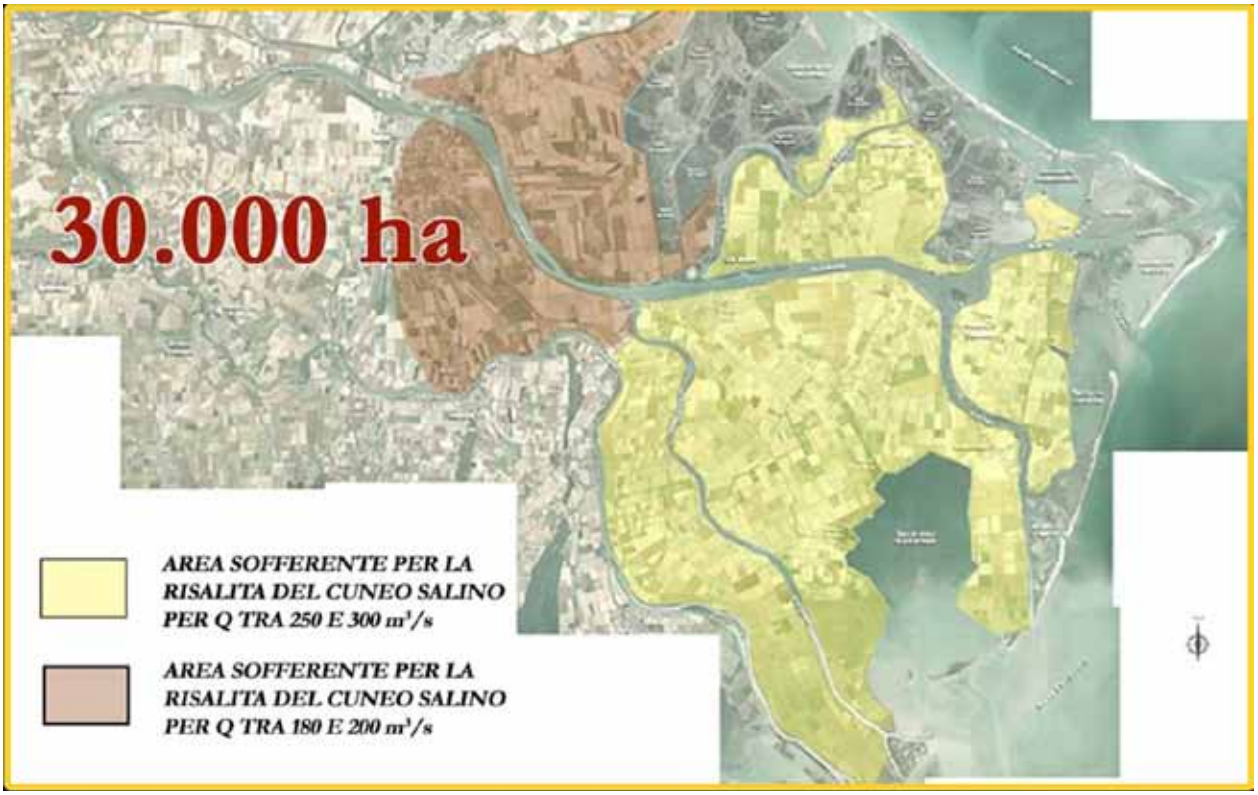


Figura 361 - Aree convolte dagli effetti di risalita del cuneo salino (da "Attività e studi propedeutici relativi alla regimazione del Po nel tratto tra Cremona e Foce Mincio – AIPO/Provincia di Rovigo – 2011).

Il fenomeno, che ha prodotto impatti estremi durante le gravi crisi idriche delle estati 2003 e 2006, è attentamente monitorato dalle ARPA regionali e dalla Provincia di Ferrara. I dati di monitoraggio disponibili.

Di fronte a tale fenomeno per il territorio del Delta sono stati definiti da tempo i rimedi da attuare, sia a scala di bacino idrografico sia quella locale; i primi hanno come obiettivo di fondo di impedire, salvo casi statisticamente veramente molto rari, che la portata di magra a Pontelagoscuro scenda al di sotto di 330 m^3/s. A scala di bacino idrografico del Po, le azioni riguardano:

- l'aumento dei rilasci dagli invasi idroelettrici;
- l'aumento dei rilasci dai grandi laghi;
- la riduzione dei prelievi a valle dei grandi laghi;
- la verifica dei rilasci per garantire nel Po il deflusso minimo vitale;
- il controllo degli attingimenti precari.

I rimedi strutturali individuati a scala locale sono sostanzialmente i seguenti:

- la realizzazione di barriere antisale;
- la realizzazione di bacini di accumulo in aree golenali fluviali;
- la realizzazione di bacini di accumulo in aree umide residuali in prossimità delle zone di utilizzo non destinate all'agricoltura;
- lo spostamento delle derivazioni più a monte, più al sicuro dal cuneo salino;
- l'utilizzo del Po di Goro quale vettore e bacino di acqua dolce.

Oltre agli interventi sopra ipotizzati, da realizzare nel medio termine, si possono attivare una serie di altre azioni, alcune delle quali richiedono tempi brevi, tra cui:

- la ricalibratura delle reti irrigue, per consentire l'utilizzo di maggiori portate d'acqua allo scopo di contrastare la salinizzazione della falda;

- il collegamento delle opere irrigue con la rete di bonifica, per assicurare nei momenti di emergenza una minima disponibilità di acqua dolce;
- il recupero delle acque di scarico delle idrovore, con la formazione di vasche di accumulo e il loro collegamento con la rete irrigua e promiscua (bonifica + irrigazione);
- l'utilizzo delle acque reflue, d'idonea qualità, provenienti dagli impianti di depurazione;
- il rinforzo delle difese costiere per contrastare, rallentandone il flusso, le filtrazioni da mare.

Tra le ipotesi di intervento un ulteriore approfondimento può essere fornito per le barriere antisale e ai bacini di accumulo che hanno maggiore attinenza allo studio in quando riguardano direttamente l'asta fluviale.

16.8.1 Barriere antisale

Le prime barriere antisale, furono realizzate sul Po di Gnocca nel Delta del Po e sul canale Taglio in comune di Caorle (VE) con finanziamenti del Ministero dell'Agricoltura come progetti pilota per sperimentarne il funzionamento, l'efficacia e le conseguenze. Secondo le indicazioni fornite da un'apposita Commissione tecnico-scientifica e dagli organi statali e regionali competenti, sui fiumi oggetto d'intervento si doveva garantire:

- il regolare deflusso delle acque e l'equilibrio del fondo del fiume;
- la navigazione;
- il flusso migratorio delle specie ittiche;
- la totale mobilità della struttura, che avrebbe potuto occupare solo parzialmente la sezione d'alveo.

Per i motivi di cui sopra la soluzione prevedeva una struttura costituita da paratoie mobili modulari in modo tale da adattarsi alla configurazione morfologica dell'alveo. Ciascun modulo è formato da una struttura fissa e una mobile. La struttura fissa è composta da una solida base (taglione) in acciaio inossidabile infisso nel fondo ed ancorato ai pali per evitare fenomeni di infiltrazioni d'acqua alla base degli argini (sifonamento). Sopra il taglione vi è una trave fissa di sostegno, sempre agganciata ai pali, dotata di una serie di alette (flaps), incernierate in favore di corrente. Attraverso tali flaps, l'incremento locale della velocità garantisce il passaggio di sedimenti e ne impedisce l'accumulo. La struttura mobile è incernierata a un palo e vincolata all'altro palo con due perni sacrificali opportunamente dimensionati in modo tale da "sganciare" la porta ad una ben determinata "spinta" sia verso monte che verso valle.

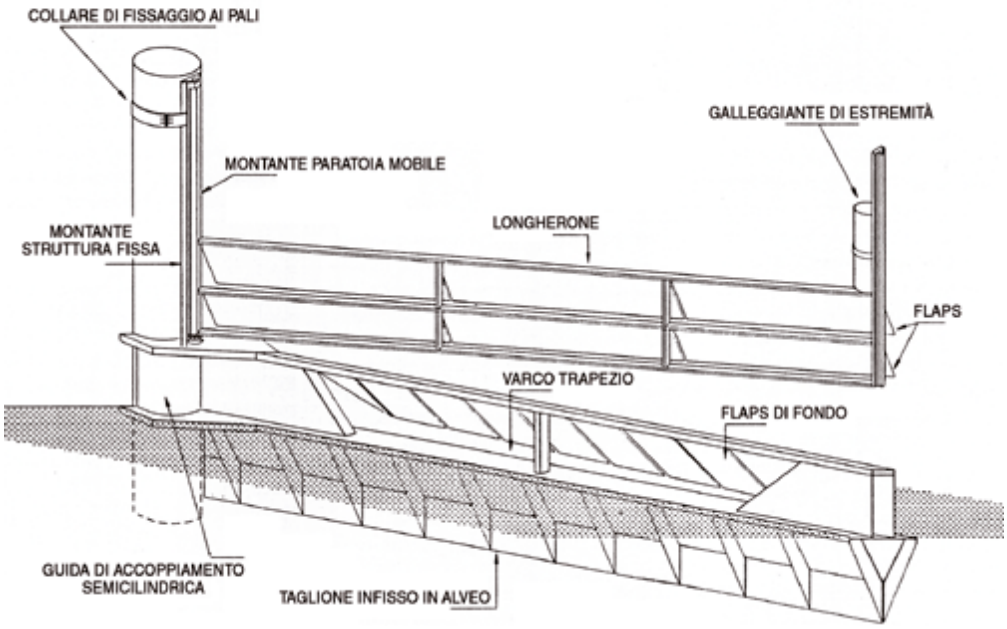


Figura 362 - Barriera antisale: disegno dei componenti di un modulo

La parte mobile è costituita da una griglia composta da una serie di travi orizzontali, ad interasse di circa 85 cm, che sostengono i flaps e sono collegate tra di loro da montanti intermedi che rendono la porta sufficientemente rigida. Tutte le travi della griglia sono a profilo scatolare, realizzate con una struttura stagna, in modo da ridurre il peso apparente della porta immersa e ridurre quindi anche le sollecitazioni sulla struttura di sostegno. Per lo stesso motivo, sui montanti di estremità, sono stati previsti dei galleggianti. Sulla porta centrale è previsto un "franco" di oltre 2 m per la normale navigazione fluviale mentre sui rimanenti moduli il franco è di circa un metro. I flaps unidirezionali sono costituiti da pannelli in acciaio inossidabile, incernierati superiormente alle travi orizzontali della griglia. In tale modo viene consentito il normale deflusso dell'acqua dolce da monte verso valle mentre viene impedito il passaggio dell'acqua nella direzione opposta in quanto i flaps si chiudono man mano che il cuneo salino aumenta di spessore.

La realizzazione della barriera antisale sul Po di Gnocca iniziò nel luglio del 1985. I lavori furono completati nel 1987. La sua funzionalità fu verificata con misure in loco e con l'utilizzo di salinometri fissi installati a monte ed a valle dello sbarramento. Sulla base dell'esperienza positiva di questa struttura furono successivamente finanziati e realizzati altri due sbarramenti antisale alla foce del Po di Tolle ed alla foce dell'Adige. La fase di gestione degli sbarramenti "mobili" antisale ha dimostrato che il contenimento del cuneo salino è efficace per portate fluviali anche inferiori a quelle prese a riferimento in fase di progetto (450 m³/s a Pontelagoscuro) fino a circa a 330 m³/s nella sezione di Pontelagoscuro.

I costi di manutenzione sono tutt'altro che trascurabili e dovrebbero essere ripartiti tenendo conto che la funzione dello sbarramento non è solo irrigua, ma a servizio anche di altri usi (acquedotti) e porta un beneficio ambientale generale

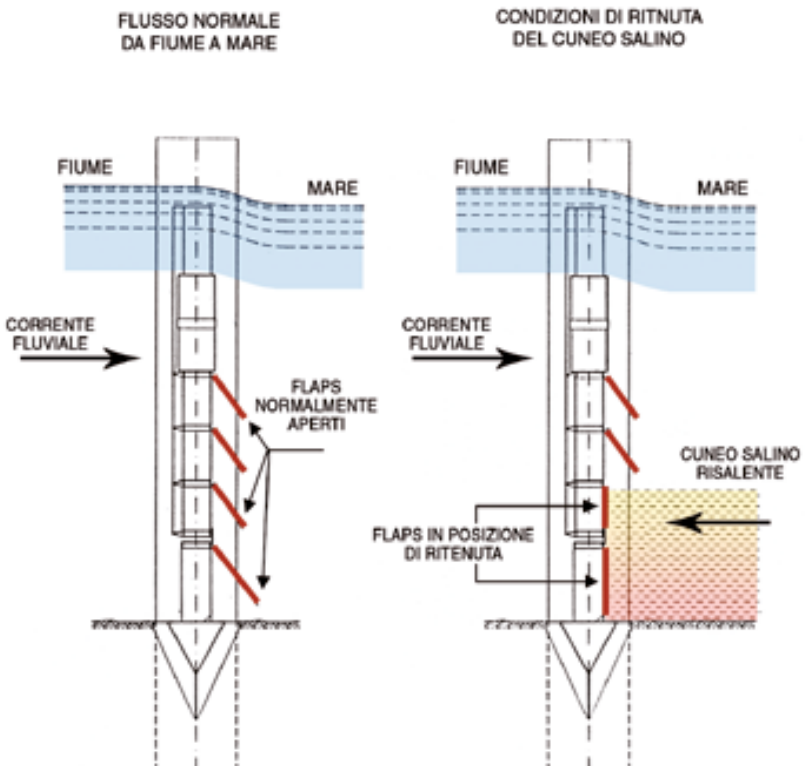


Figura 363 - Barriera antisale: schema di funzionamento

L'aspetto che incide in maniera negativa sulla funzionalità degli sbarramenti antisale è rappresentato dalle magre eccezionali, come quelle del 2003, 2005, 2006 e 2007, con valori di portata minima Po al di sotto di 330 m3/s. Di fronte a tali eventi e in concomitanza di stagioni particolarmente siccitose, l'efficacia delle barriere si riduce di molto soprattutto in fase di alta marea, durante la quale l'azione di contrasto del flusso entrante dell'acqua di mare è insufficiente.

16.8.2 Bacini di accumulo in aree golenali fluviali - Area dell'ex ansa di Volta Vaccari

Alla fine degli anni '80 del secolo scorso, il Magistrato per il Po ha provveduto a correggere l'ansa di Volta Vaccari, al fine di aumentare la portata del Po di Pila; l'alveo del Po ha abbandonato il vecchio tracciato che, racchiuso tra due argini, si presta ad essere utilizzato come bacino di acqua dolce.

Con una superficie di circa 50 ha, già chiuso su tre lati (due lati dall'argine e la sezione a ovest da una scogliera), ha un volume utile di circa 1.000.000 m3, tenendo conto solamente del valore derivabile per gravità da quota 0.00 a quota -2,00 m s.m. Essendo la superficie da irrigare di 2.476 ha, la disponibilità d'acqua è assicurata per circa 15 giorni, con una dotazione da 0,35 l/s per ettaro e per un servizio a domanda 24 ore su 24. Razionalizzando il servizio sulle 10-12 ore giornaliere, la disponibilità garantisce la possibilità di utilizzo dell'acqua dolce per circa un mese.

La realizzazione del bacino richiede la costruzione di un argine di chiusura presso la sezione di confluenza a valle tra il vecchio ed il nuovo corso del Po di Pila. La captazione d'acqua dolce avviene dal Po di Pila mediante una soglia sfiorante, contenuta nel nuovo argine. L'abbassamento delle paratoie e il conseguente ingresso di acqua è subordinato al contenuto salino riscontrato nel Po.



Figura 364 - Eliminazione dell'ansa di Volta Vaccari ('90)



Figura 365 - Chiusura dell'ansa di Volta Vaccari

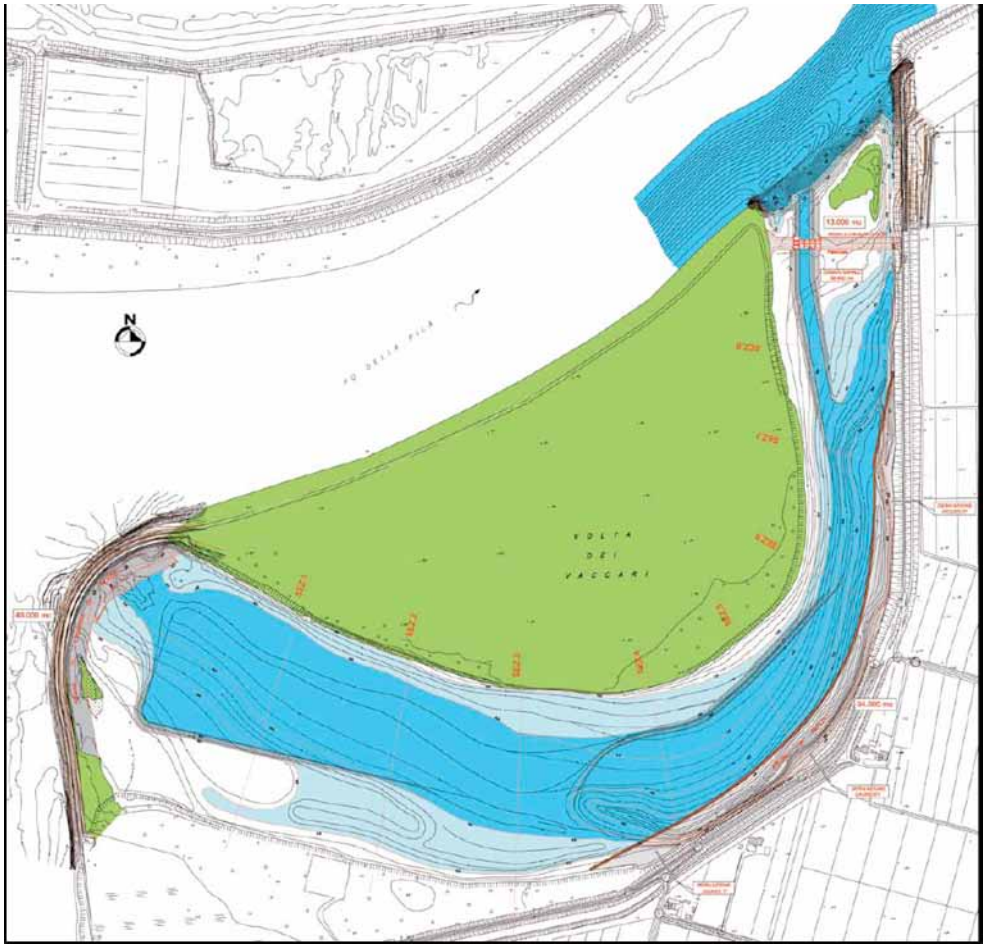


Figura 366 - Planimetria di progetto della chiusura dell'ansa di Volta Vaccari

16.9 UTILIZZAZIONI IDRICHE IN ATTO

In termini di utilizzazione idriche dirette dall'alveo del Po, la situazione attuale è caratterizzata dai seguenti elementi.

L'utilizzo potabile è limitato ad alcune prese nel tratto terminale del corso d'acqua a servizio dell'Acquedotto Medio Polesine, dell'Acquedotto Delta Po e dell'Acquedotto di Ferrara che alimentano in parte le reti acquedottistiche in sponda destra e sinistra.

Le derivazioni potabili da Po in sinistra sono costituite da tre prese dirette:

- Canalnuovo, in Comune di Villanuova Marchesana, costruita nel 1968, con portata massima derivata di 60 l/s,
- Corbola, in località Sabbioni, in sponda destra, costruita nel 1962, con portata massima 240 l/s,
- Ponte Molo, nel Comune di Taglio di Po, alla confluenza del Po di Donzella, costruita nel 1986 con portata massima 100 l/s.

In sponda destra, l'approvvigionamento potabile della Provincia di Ferrara avviene grazie a quattro centrali di potabilizzazione, di cui tre sono ubicate in prossimità del Po, che rappresenta la principale fonte di approvvigionamento; solo la centrale di Ro tratta esclusivamente acqua di pozzo. Partendo dal confine occidentale si incontra la centrale di Stellata (Bondeno), che tratta acque di subalveo, quella di Pontelagoscuro, che tratta sia acque superficiali che di subalveo, la centrale di Ro Ferrarese, e infine la centrale di Serravalle (Berra), che tratta acque superficiali da Po.

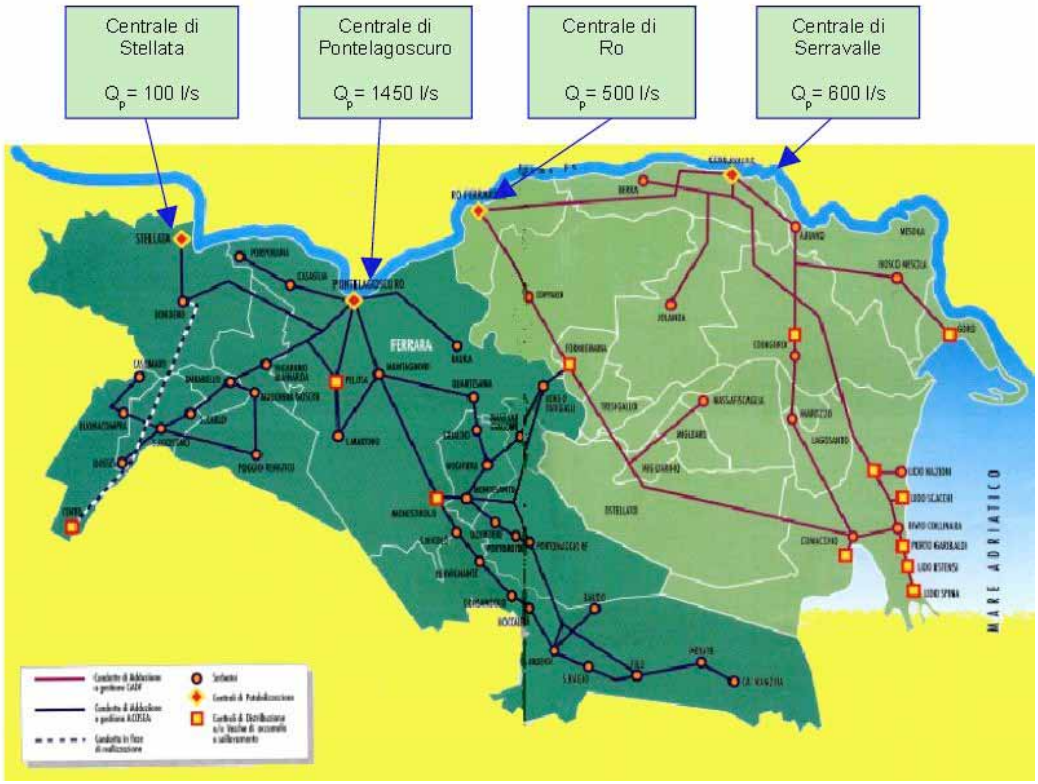


Figura 367 - Schema delle captazioni per approvvigionamento potabile della Provincia di Ferrara in prossimità del Po

L'uso irriguo delle acque dell'asta del Po è molto importante per tutte le aree rivierasche che ricadono in territorio lombardo, emiliano e veneto.

Risale al 1921 l'inizio della costruzione delle prime grandi opere di derivazione di acqua dal Po nella Regione Emilia-Romagna, per irrigare i terreni del comprensorio della bonifica, in modo da esplicare un'azione complementare alla bonifica idraulica stessa, indispensabile per l'affermarsi dell'agricoltura.

Gli impianti di derivazione principali dall'asta del Po sono di seguito elencati.

- l'impianto irriguo di Foce Morbasco, a Gerre dei Caprioli (CR), con una portata di concessione di 12.000 l/s.
- l'impianto di sollevamento a Casino di Colorno, realizzato fra il 1929 e il 1932 dal Consorzio di bonifica Parmense, seguito poi dalle stazioni di pompaggio, sempre sul Po, di Sissa e Trecasali.
- l'impianto idrovoro di Isola Pescaroli (CR) con una portata di concessione di 8.300 l/s.
- l'impianto idrovoro di Casalmaggiore (CR), con una portata di concessione di 10.000 l/s.
- l'impianto di Boretto, realizzato tra il 1928 e il 1930 a gravità, con portata massima derivata di 27,5 m3/s. Dopo i lavori di sistemazione dell'alveo di magra del Po e il conseguente abbassamento di fondo e dei livelli idrici del fiume, si rese necessaria la realizzazione di un sollevamento, che venne progettato nel 1949 per una derivazione massima complessiva di 60 m3/s, dei quali 35 m3/s per il Consorzio Parmigiana-Moglia, 5 m3/s per il Consorzio Bentivoglio e 20 m3/s per i due consorzi di bonifica lombardi di Revere (6 m3/s) e dell'Agro mantovano-reggiano (14 m3/s). L'impianto entrò in funzione nel 1958, insieme ad altre opere d'irrigazione a servizio dei quattro consorzi associati. Occorre inoltre accennare ai canali di risalita costruiti o adattati dai due consorzi emiliani, di cui il canale allacciante Cartoccio della Parmigiana-Moglia è, per la sua mole, senza dubbio il più importante. L'impianto è lungo 18 km e convoglia 22 m3/s, cioè la maggior parte della dotazione irrigua del consorzio stesso; collega la botte sotto il Crostolo con l'impianto di sollevamento del Cartoccio (presso Novellara) che immette le acque di Po nel canale di risalita di Reggio Emilia.

- l'impianto irriguo di Sabbioncello, progettato nel 1949 dal Consorzio interprovinciale di bonifica della Burana, con sollevamento dal Po, presso Quingentole, in provincia di Mantova. Attualmente l'opera deriva 20 m3/s di acqua per l'irrigazione del territorio delle Province di Mantova e di Modena.
- l'impianto idrovoro di Pilastresi, iniziato nel 1929, presso Stellata in provincia di Ferrara. Ultimato nel 1949, realizza la duplice funzione dello smaltimento in Po dell'acqua di scolo e del sollevamento dal fiume di 47 m3/s di acqua per l'irrigazione; 3 m3/s sono destinati al Consorzio interprovinciale per la bonifica di Burana e 44 m3/s al Consorzio generale di Ferrara;
- l'impianto del Consorzio di bonifica del Canale Emiliano-Romagnolo (CER), costituito dalle opere di presa dal fiume Po al Palantone e dalla botte sotto il fiume Reno del Consorzio di bonifica di II grado del Canale Emiliano-Romagnolo (CER). Le opere più importanti del sistema sono:
  - l'impianto di derivazione dal Po in località Palantone di Bondeno (11 m3/s), subito a monte dello scarico in Po del Cavo Napoleonico;
  - la chiavica di presa dal Cavo Napoleonico;
  - la botte sifone sotto il fiume Reno.

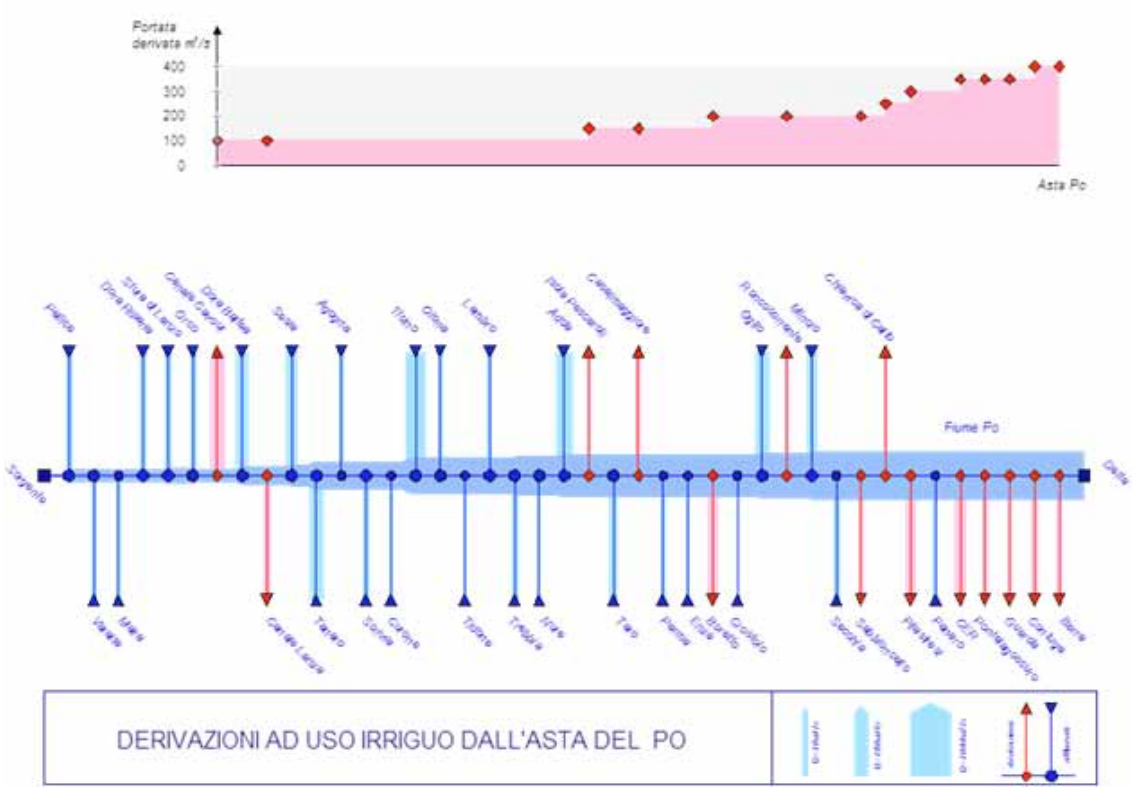


Figura 368 - Schema delle derivazioni ad uso irriguo lungo l'asta del fiume Po

L'asta del Po, infine, è interessata da derivazioni per uso idroelettrico e termoelettrico. L'uso idroelettrico è rappresentato dall'impianto di Isola Serafini, già citato, che è localizzato in corrispondenza dell'estremo di monte del tratto in studio e deriva una portata massima di circa 6.000 m3/s.

Il principale tipo di centrale termica è quello tradizionale, con turbina a vapore, in cui il raffreddamento dell'acqua dei condensatori viene effettuato a circuito aperto con restituzione delle acque riscaldate poco più a valle della presa; il prelievo idrico, stimato in rapporto alla potenza media prodotta, è pari a 35 m3/s per un modulo da 1.000 MW. Le centrali termiche esistenti sono localizzate rispettivamente a Ostiglia, Moglia (Sermide) e Porto Tolle.

16.10 RETICOLO IDROGRAFICO MINORE

Il reticolo idrografico minore della fascia di pianura che recapita direttamente nel Po ha subito nel tempo consistenti interventi di trasformazione; si tratta prevalentemente di un reticolo artificiale che nasce, in una porzione significativa, come rete di bonifica, a cui si è sovrapposta – in genere successivamente – la funzione irrigua, che avviene in parte utilizzando la stessa rete di bonifica (le funzioni irrigue e di drenaggio delle acque meteoriche avvengono attraverso lo stesso reticolo idrografico, che viene adeguatamente gestito in funzione delle due esigenze) e in parte con reti separate.

Per la funzione di smaltimento delle acque meteoriche il recapito finale è costituito, nella porzione di territorio di nostro interesse, principalmente dall'alveo del Po in via diretta e il collegamento tra collettore e ricettore è sempre realizzato attraverso un'opera idraulica – chiavica – che permette la disconnessione tra Po e rete afferente per tutte le condizioni di piena. Nelle chiaviche principali lo scarico delle acque meteoriche può avvenire attraverso impianti di sollevamento meccanico che permettono quindi il funzionamento anche in condizioni di piena di Po. In assenza di sollevamento meccanico, la chiusura della chiavica comporta per forza di cose l'invaso degli afflussi nelle porzione della rete prossima agli argini o in apposite vasche di accumulo.

Nelle aree della bassa pianura il sollevamento meccanico è necessario anche per lo smaltimento delle acque meteoriche in condizioni ordinarie dei livelli di Po.

Ai fini delle successive valutazioni degli effetti degli interventi sul sistema idrico secondario, la prima fase dello studio consiste in una ricognizione dettagliata del sistema per definirne le caratteristiche di interesse per lo studio.

La Figura 369 rappresenta l'intero tracciato del reticolo idrografico minore, suddiviso tra corsi principali e secondari e localizzazione delle chiaviche lungo gli argini di Po.

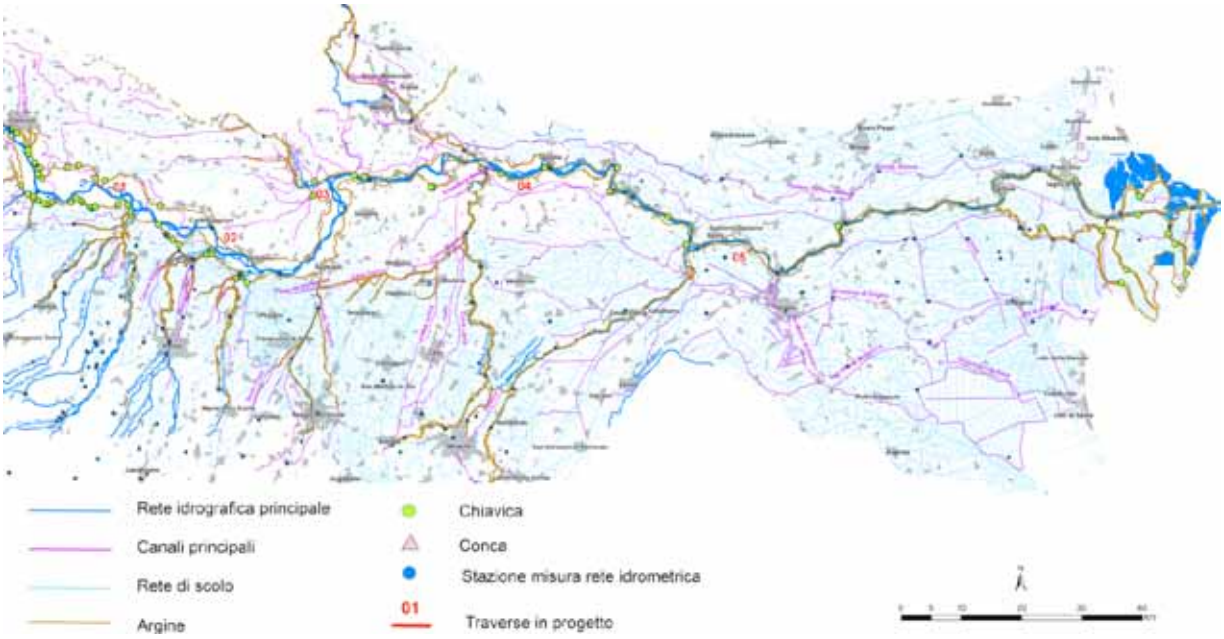


Figura 369 - Rete idrografica secondaria, naturale e artificiale, lungo la fascia di pianura afferente all'alveo del fiume Po

Le modalità di scarico della acque meteoriche per le porzioni di sottobacini drenati che sono di interesse nell'ambito del presente studio sono pertanto suddivisibili nelle seguenti due tipologie:

regolamentate da chiaviche, con scarico naturale in condizioni di acque basse di Po e con scarico meccanico in condizioni di acque alte (o di assenza di scarico);

regolamentate da chiaviche sempre dotate di sollevamento meccanico con idrovore (sollevamento continuo).

Nella seguente Tabella 131 sono riportate le principali opere di derivazione irrigua e di scolo della rete di bonifica dei consorzi di bonifica rivieraschi al fiume Po.

CONSORZIO DI BONIFICA	OPERA	PROG. (KM)	SPONDA	TIPOLOGIA
Dugali Naviglio Adda Serio	Foce Morbasco Gerre dei Caprioli	378,3	SX	Derivazione irrigua a gravità e sollevamento meccanico
Ronchi di San Giuliano	Ronchi di San Giuliano (PC)	382,6	DX	Scolo a gravità
Piacenza	Sistema di bonifica afferente alla chiavica "Soarza"	384,4	DX	Scolo a gravità In fase di progettazione Impianto di sollevamento
Piacenza	Canale di scolo "Arda Vecchia"	385,3	DX	Scolo a gravità
Parmense	Ongina presollevamento e Ongina Centrale	386,5	DX PO e DX ONGINA	Derivazione irrigua a sollevamento meccanico
Navarolo-Agro-Mantovano	Impianto Isola Pescaroli	388,8	SX	Derivazione irrigua a sollevamento meccanico
Dugali Naviglio Adda Serio	Canale di scolo "Fossadone"	389,7	SX	scolo a gravità
Dugali Naviglio Adda Serio	Canale di scolo "Dosolo Pozzolo"	398,4	SX	scolo a gravità
Parmense	Canali di scolo afferenti al "Canale di Busseto"	394-402,5	DX	scoli a gravità
Parmense	Sistema di bonifica Cavo Ramelli e Cavo Viglioli	405,7-407,2	DX	scoli a gravità
Dugali Naviglio Adda Serio	Sistema di bonifica afferente al canale "Riolo di Sopra"	408,8	SX	scolo a gravità
Parmense	Sistema di bonifica afferente al canale "Traversante"	412,5	DX	scolo a gravità
Navarolo – Agro Cremonese Mantovano	Sistema di bonifica afferente al "Colatore Riolo" Chiavica beretta	416,5	SX	scolo a gravità
Parmense	Canali di scolo afferenti alla "Fossetta dell'Argine"	418,8	DX	scoli a gravità
Navarolo – Agro Cremonese Mantovano	Impianto idrovoro di Casalmaggiore	424,6	SX	Derivazione irrigua a sollevamento meccanico
Emilia centrale	Canalazzo di Brescello	435,7	DX ENZA CONFL. DX PO	Scolo a gravità
Emilia centrale e Terre dei Gonzaga in Destra Po	Sistema di bonifica afferente al canale derivatore di Boretto	438,7	DX	Derivazione irrigua e scolo a sollevamento meccanico
Emilia centrale	Impianto di Torrione (Gualtieri) lungo il T. Crostolo	446,8	SX CROSTOLO CONFL. DX PO	Scolo a sollevamento meccanico
Navarolo – Agro Cremonese Mantovano	Sistema di bonifica afferente al fiume Oglio (impianti San Matteo delle Chiaviche, Roncole)	461,8	DX OGLIO CONFL. SX PO	Scoli a gravità e sollevamenti meccanici
Territori del Mincio	mpianto idrovoro Cesole Marcaria Loiolone (17,90 m s.m.), Degana (17,90 m s.m.).	463,2	SX OGLIO CONFL. SX PO	Derivazione irrigua a gravità fino a 18,50 e sollevamento meccanico se inferiore e scolo a gravità e sollevamento meccanico se inferiore a 16,9
Territori del Mincio	Sistema di bonifica afferente all'impianto "Roncocorrente" Borgoforte	468,5	SX	Scolo a gravità e sollevamento meccanico se >15 m
Terre dei Gonzaga in destra Po	Sistema di bonifica afferente all'impianto "Gorgo" Digagnola Po morto	485,8	DX	Scolo a sollevamento meccanico
Territori del Mincio	Impianto della Travata di Bagnolo San Vito in dx Mincio dei canali Bissi-Fossegone (11,80 m s.m.), Bolognina (14,90 m s.m.) e Gherardo (15,30 ms.m.)	493	DX MINCIO CONFL. SX PO	Derivazione a gravità e sollevamento meccanico < 16,5 Scolo a gravità e sollevamento meccanico se <14,20
Emilia Centrale	Impianto di San Siro, nel comune di Quistello, in sx Secchia	496,4	X SECCHIA CONFL. DX PO	Scolo a gravità e sollevamento meccanico
Burana	mpianto di Sabbioncello	499,1	DX	Derivazione irrigua a sollevamento meccanico
Terre dei Gonzaga in destra Po	Sistema di bonifica afferente agli impianti posti a "Moglia di Sermide"	526,6	DX	Scolo a sollevamento meccanico
Adige Po	Impianto di Golena Cibo	529,8	SX	Derivazione irrigua a sollevamento meccanico
Adige Po	Impianto Chiavica di Calto	537,4	SX	Derivazione irrigua a gravità e sollevamento meccanico
Adige Po	Impianto idrovoro di Ficarolo	543,8	SX	Derivazione irrigua a gravità e sollevamento meccanico
Burana	Sistema di bonifica afferente all'impianto "Pilastresi" (Pilastresi=5,5, sussidiario 1=4,6 , sussidiario 2=5)	544,6	DX	Derivazione irrigua a gravità e sollevamento meccanico – Scolo a gravità e sollevamento meccanico

Tabella 131 - Opere di derivazione irrigua e di scolo della rete di bonifica dei consorzi di bonifica rivieraschi al fiume Po

In sinistra e in destra Po sono sempre i comprensori più orientali a essere gravati dalla necessità di un sollevamento in continuo; in sinistra si tratta dei comprensori a sud-ovest di Mantova, in Lombardia, e Padano-Polesano e Delta Po-Adige in Veneto. Parimenti in destra il sollevamento continuo riguarda i comprensori più orientali (Vecchio Reno, 1° e 2° Circondario di Ferrara) e, nella parte centrale del bacino, il Bentivoglio Enza.

Gli altri comprensori, centrali e occidentali, eccettuata una modesta zona dei bacini piacentini di levante, hanno necessità di un sollevamento meccanico sporadico, solo in condizioni di piena di Po, quindi con oneri ridotti rispetto ai precedenti.

Le portate degli impianti idrovori, espresse come capacità di portata massima delle pompe funzionanti con pieno adescamento nella vasca di carico, variano nell'ordine di qualche m3/s nella maggior parte degli impianti, ma possono raggiungere le decine di m3/s nei più importanti e andare oltre i 50 m3/s nelle bonifiche del Ferrarese, della Parmigiana Moglia, del Navarolo - Agro Cremonese e della Polesana.

L'epoca di costruzione della maggior parte degli impianti risale agli anni '20-'30 del secolo scorso e ciò non depone a favore della loro funzionalità, in ragione della necessità di un ammodernamento e potenziamento dovuti a vari fattori.

Tale fatto è di particolare importanza in quanto una porzione significativa della difesa idraulica della pianura rispetto al rischio di piena non risiede nelle opere di difesa sui corsi d'acqua principali ma piuttosto nelle difficoltà connesse al funzionamento della rete scolante minore, come si è avuto modo di constatare in numerose piene recenti.

A questa situazione va inoltre aggiunta la considerazione che, rispetto al periodo di progettazione e di costruzione di questi impianti, i bacini drenati hanno notevolmente aumentato i contributi al deflusso, a parità di intensità delle precipitazioni, in ragione dell'intensa urbanizzazione del territorio di pianura drenato e del conseguente aumento dell'impermeabilizzazione del suolo.

A questo quadro vanno inoltre aggiunti gli effetti del cambiamento climatico che mostrano, oramai con buona evidenza, un incremento della gravosità degli eventi di precipitazione intensa, a parità di frequenza dell'evento stesso, ovvero una frequenza nettamente maggiore di eventi intensi.

Per il territorio in destra Po (Regione Emilia-Romagna), una buona descrizione delle caratteristiche di funzionalità del reticolo idrografico minore è data dalla cartografia (Figura 370) allegata al Piano Territoriale Regionale (PTR) che contiene la seguente suddivisione dei bacini idrografici drenati dal reticolo minore di bonifica in funzione delle modalità di scolo:

- acque alte a scolo solo naturale con origine in terreni a pendenza media maggiore del 10%;
- acque alte a scolo solo naturale con origine in terreni con pendenza media minore del 10%;
- acque alte a scolo solo naturale con origine in terreni con pendenza media minore del 10%, che in casi di emergenza non scolano nel ricettore ma sono regolati da chiaviche, con possibilità di invaso nella rete a monte o in casse di espansione;
- acque a scolo alternato (naturale e meccanico) con prevalenza di scolo naturale su quello meccanico;
- acque a scolo alternato con aggiunta di idrovore di pre-sollevamento;
- acque a scolo alternato con prevalenza di scolo meccanico su quello naturale;
- acque a scolo alternato con aggiunta di idrovore di pre-sollevamento;
- acque basse a scolo solo meccanico;
- acque basse a scolo solo meccanico con aggiunta di idrovore di pre-sollevamento.

Il criterio di prevalenza è riferito ai tempi di funzionamento delle idrovore in situazione di piena e la suddivisione tra "acque alte" e "basse" indica che solo i corsi d'acqua che raccolgono queste ultime convergono agli impianti di sollevamento.

Il reticolo irriguo, strettamente interconnesso a quello di drenaggio, ha caratteristiche funzionali

diversificate in relazione alla conformazione morfologica delle aree servite e alle fonti di approvvigionamento.

L'area della pianura lombarda ha una rete di canali irrigui importante, in grado di sfruttare abbondanti risorse idriche supportate dalla regolazione dei grandi laghi e dalla presenza di numerosi fontanili, lungo la fascia che va dal Ticino al Mincio, nella parte mediana della pianura; i punti di derivazione sono quindi nella parte media e alta della pianura dai corsi d'acqua principali (Ticino, Adda, Chiese, Oglio e Mincio) e l'andamento del reticolo irriguo deriva di conseguenza. Unica eccezione è rappresentata dalla derivazione diretta dal Po a Casalmaggiore, con il Canale Navarolo.

La pianura emiliana ha una rete irrigua di sviluppo più recente, sostanzialmente successivo alla bonifica idraulica; le derivazioni più diffuse e importanti sono dai corsi d'acqua superficiali, rappresentati direttamente dal Po e dai suoi affluenti. Le derivazioni dai corsi d'acqua appenninici sono a gravità mentre quelle dal Po, a causa del minor livello dell'alveo rispetto ai comprensori irrigui, sono attuate mediante sollevamenti meccanici.

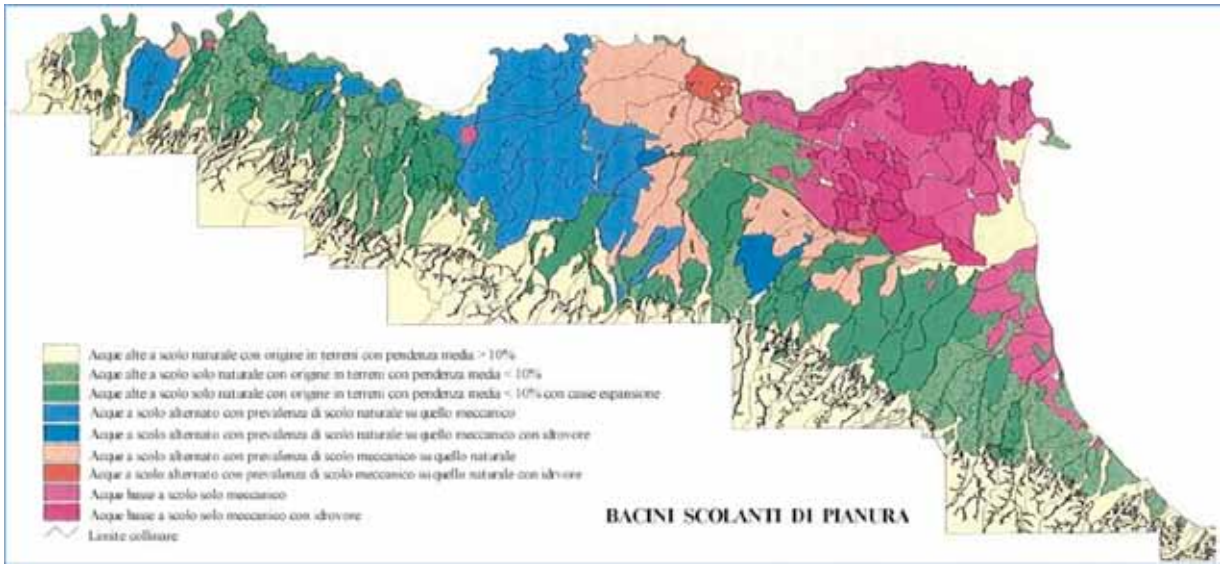


Figura 370 - Perimetrazione dei bacini idrografici scolanti verso l'alveo del Po nel territorio della Regione Emilia-Romagna (da Piano Territoriale Regionale - PTR)

17 OPZIONI DI INTERVENTO IN PROGETTO PER LA SISTEMAZIONE DELL'ALVEO DEL FIUME PO

Il progetto riguarda il tratto di fiume Po compreso tra il Porto di Cremona e il Delta e considera due diverse opzioni di sistemazione dell'alveo di magra, costituite rispettivamente:

a. dalla sistemazione dell'alveo tramite l'inserimento di opere di regimazione, con l'obiettivo di migliorare radicalmente le condizioni di navigabilità e di recupero morfologico dell'alveo;

b. dal completamento della sistemazione a corrente libera dell'alveo nel tratto tra Cremona e foce Mincio e dalla sistemazione del tratto a valle fino al Delta con soluzioni strutturali che fanno ancora riferimento a opere di sponda e pennelli.

La prima opzione prevede la realizzazione di traverse opportunamente localizzate lungo l'intero tronco, in grado di regolare il profilo idrico di magra e di controllare l'abbassamento del fondo alveo che si è manifestato negli ultimi cinquant'anni risolvendone le criticità.

Rispetto alla due opzioni di base sopra elencate, è possibile anche una soluzione intermedia, costituita dalla sistemazione di parte del corso d'acqua con opere trasversali di regimazione e con opere longitudinali a corrente libera per la restante parte.

Si rimanda a quanto definito dal Servizio 1 per una descrizione dettagliata delle opzioni d'intervento per la sistemazione dell'alveo.

17.1 PROGETTO DI SISTEMAZIONE A CORRENTE LIBERA

Si riprendono in sintesi le caratteristiche principali che viene ad assumere l'assetto dell'asta del Po nel tratto oggetto di studio nel caso in cui venga realizzata l'ipotesi di sistemazione denominata "opzione a corrente libera".

Come detto in premessa, tale configurazione di progetto costituisce una delle due alternative rispetto alle quali sono state condotte le analisi e le verifiche comparative che costituiscono l'oggetto delle attività.

Il progetto di sistemazione a corrente libera è rappresentato:

- per il tratto tra Cremona e foce Mincio, dal *"Progetto definitivo degli interventi relativi alla sistemazione a corrente libera del fiume Po nella tratta compresa tra Isola Serafini e foce Mincio"* già predisposto da AIPO;
- tra foce Mincio e l'incile del Po di Goro, dagli interventi individuati nell'ambito del Servizio n. 1 che ne costituiscono il completamento, con criteri di progetto analoghi a quelli adottati per il tratto di monte.

Il progetto redatto da AIPO rappresenta la sistemazione definitiva per il tratto tra Isola Serafini e foce Mincio, in cui gran parte delle opere di regolazione dell'alveo sono state già realizzate secondo il progetto originale e punta a risolvere strutturalmente i principali problemi di inadeguatezza della morfologia dell'alveo di magra rispetto alla navigabilità.

Il progetto prevede 17 interventi di carattere strutturale in altrettanti tratti critici (costituiti da pennelli, difese radenti e adeguamenti di opere esistenti) e 9 interventi non strutturali, che affidano il

mantenimento dell'assetto dell'alveo ai periodici interventi di manutenzione.

I criteri e i parametri adottati per la progettazione delle opere sono riassumibili principalmente nei seguenti punti:

- privilegiare la realizzazione di pennelli trasversali, rispetto alle opere longitudinali, in quanto forniscono un maggior grado di flessibilità soprattutto in fase di esercizio;
- adozione di una portata di progetto pari alla magra ordinaria (400 m^3/s) per l'intero tratto considerato, a cui corrisponde una durata variabile tra 353 gg/anno a Cremona e 359 gg/anno a Pontelagoscuro;

impostazione della quota di sommità delle opere in progetto a 1,50 m al di sopra del profilo di magra ordinaria corrispondete alla portata indicata (livello che corrisponde a una portata defluente di 800 m^3/s;

assenza di un valore univoco della larghezza del canale di magra, ma ricerca di riprodurre tronco per tronco le condizioni di trasporto solido del tratto di monte.

L'estensione del progetto al tratto a valle di foce Mincio è impostato sulla base di criteri di sistemazione definiti dal gruppo di lavoro (Servizio 1) ad esso dedicato in funzione delle caratteristiche idrodinamiche e morfologiche dell'alveo, che si differenziano rispetto a quelle relative alle parti a monte.



Figura 371 - Basso di Polesine Parmense

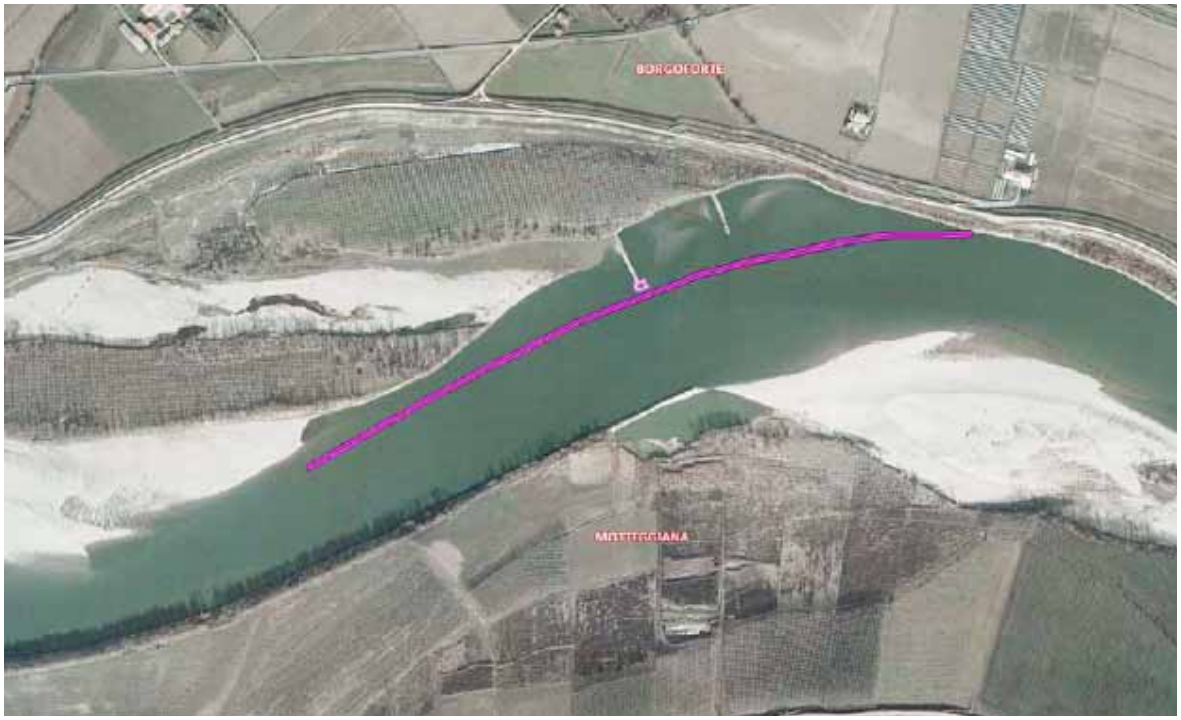


Figura 372 - Basso di Scorzarolo

Il tratto di fiume Po tra foce Mincio e il Delta, di lunghezza pari a circa 127 km, costituisce la cerniera di collegamento tra i porti interni (Cremona e Mantova) e gli sbocchi a mare, in sinistra, attraverso la conca di Volta Grimana (a 30 km a monte della foce) da cui hanno origine il Po di Levante, che esce in mare a Porto Levante, e il canale Po-Brondolo, che sbocca nella Laguna Veneta presso il porto di Chioggia; in destra attraverso la conca di Pontelagoscuro (90 km dalla foce) che immette nell'Idrovia Ferrarese che, seguendo il canale Boicelli, il Po di Volano e il canale Migliarino-Ostellato-Comacchio, giunge a Porto Garibaldi dopo un percorso di 70 km.

Oltre la conca di Volta Grimana, il Po è ancora navigabile verso la foce principale del Delta per altri 29 km circa, sino a Pila; lo sbocco a mare è invece impedito dalle barre sabbiose che si formano alla foce.

Sul tratto è stato redatto in passato un progetto preliminare di regimazione per migliorare le condizioni di navigabilità, applicando sostanzialmente gli stessi criteri utilizzati per la definizione delle opere realizzate a monte; il progetto ha individuato 25 opere longitudinali (difese radenti e pennelli); alcune di esse, in tratti limitati, sono state realizzate più o meno parzialmente con finalità di protezione della sponda e di regolarizzazione del deflusso (es. . curve di Ostiglia, Bergantino e Pontelagoscuro).

Tra foce Mincio e Pontelagoscuro, 68 km, si manifestano i maggiori problemi per la navigabilità dell'intero tratto a causa dell'instabilità dell'alveo di magra, a cui gli interventi di dragaggio possono porre rimedio solo in parte, e permane quindi la difficoltà di ottenere condizioni di fondali equivalenti a quelle del tronco di monte.

Le caratteristiche dell'alveo sono rappresentate della larghezza dell'alveo di piena molto più contenuta, a causa del tracciato degli argini maestri e dallo sviluppo trasversale molto modesto delle golene per lungi tratti; inoltre la sinuosità "naturale" dell'alveo di magra attuale è generalmente limitata con curvature modeste. L'alveo è caratterizzato a tratti dalla presenza di meandri ben pronunciati e a tratti da un percorso pressoché rettilineo; in entrambe le situazioni il canale navigabile divaga frequentemente, non riuscendo a raggiungere una condizione stabile per la continua formazione e migrazione dei bassi fondali.

I fattori indicati impediscono in molti casi di realizzare, con opere longitudinali, uno sviluppo di curve del canale di magra con raggi di curvatura adatti, in analogia al tipo di regimazione realizzato a monte, che consente la stabilizzazione dell'alveo e la creazione dei fondali necessari.

I punti più critici per queste condizioni si creano frequentemente nei tratti rettilinei e in quelli di raccordo tra curve successive: foce Secchia, Quingentole, Bonizzo, Bergantino, Calto, Streggia, Gaiba, Ravalle, Ca' Prinella, Isola Bianca, Paviole, S. Antonio, Crespino, Mazzorno.

A valle di Pontelagoscuro, i problemi di fondale sono invece abbastanza contenuti e la pendenza media longitudinale, dell'ordine dello 0,04‰, assai minore di quella dei tronchi a monte assicura sezioni idrauliche di grandi dimensioni e quindi più favorevoli alla navigazione.

Il progetto della sistemazione a corrente libera, definito dal Servizio 1, è stato condotto con riferimento alla necessità di garantire la navigabilità del fiume da foce Mincio al Po di Goro, con l'obiettivo di ottenere i seguenti valori di fondale minimi:

- fondale minimo di 2,00 m per una durata media annua di 340 giorni/anno (obiettivo che, come già detto, è uguale a quello fissato da AIPO nel progetto a sistemazione libera del tratto di monte da Cremona a foce Mincio);
- fondale minimo di 2,80 m per una durata media annua di 300 giorni/anno.

Il tratto a valle di foce Mincio e fino a Po di Goro interessato dalla sistemazione a corrente libera si estende dalla chilometrica 495 alla 595 per un'estensione totale pari a circa 100 km.

Lungo l'intero tratto è stata ipotizzata una serie di opere sia di tipo longitudinale che trasversale che intervengo su un totale di 34 curve in modo tale da disegnare un alveo di magra che garantisca i tiranti necessari alla navigazione. Le opere si rifanno alle tipologie già utilizzate negli interventi effettuati in situazioni analoghe da AIPO e si caratterizzano per un'altezza tale da essere sormontate, nella maggior parte dei casi, per portate dell'ordine di 800 m3/s in modo da contenere le portate di magra del fiume, ma essere sormontate e sparire non appena le portate salgono a valori superiori. Tale conformazione garantisce la continuità delle dinamiche fluviali mantenendo i processi di trasporto solido nelle aree retrostanti con opere che sono sempre più basse delle aree golenali limitrofe.

I pennelli trasversali, come noto, hanno lo scopo di concentrare il filone del canale di navigazione in una zona determinata entro la quale far passare il percorso navigabile, favorendo al tempo stesso il deposito nelle zone comprese fra i pennelli e la sponda che risulta in tal modo protetta dai fenomeni erosivi.

Le difese spondali a loro volta vengono poste sull'esterno della curva di navigazione per disegnarne l'andamento planimetrico e innescare i fenomeni idrodinamici che permettono la formazione di un canale sufficientemente profondo per garantire i tiranti necessari al passaggio dei natanti.

17.2 PROGETTO DI SISTEMAZIONE CON REGOLAZIONE

Il progetto di sistemazione dell'alveo del Po, che già nel passato formò oggetto di numerosi studi e proposte tra le quali è da ricordare il noto "Progetto SIMPO 1984", è stato più recentemente ripreso nello Studio di Fattibilità "Attività e studi propedeutici relativi alla regimazione del Po nel tratto tra Cremona e foce Mincio – ipotesi, analisi e verifiche preliminari" (giugno 2009) condotto da AIPO e Infrastrutture Lombarde, successivamente integrato con lo Studio Integrativo (novembre 2009) condotto da AIPO.

Il criterio di base consiste nell'innalzare l'attuale livello idrico di magra del fiume Po riportandolo ai valori che si avevano negli anni '50 del secolo scorso, cioè prima dell'avvio del consistente fenomeno di abbassamento del fondo alveo che si è verificato successivamente e che ha portato alla configurazione morfologica attuale.

Il rialzo delle quote idriche di magra proposto rimane all'interno dell'alveo inciso, senza interessare le aree golenali e senza produrre quindi alcuna alterazione del regime idraulico di piena.

Tale intervento assume un ruolo fondamentale per il riassetto del fiume e per avviare il processo di recupero ambientale, in quanto attraverso di esso sarà possibile raggiungere i seguenti obiettivi:

- riequilibrio idraulico/morfologico dell'alveo: le forme di fondo (barre e canali secondari),

che oggi sono interessate dalla corrente solo nel corso di piene significative, verrebbero interessate dai deflussi anche in condizioni di magra e quindi parteciperebbero maggiormente alle dinamiche di trasporto solido, contribuendo a raggiungere l'obiettivo del riassetto morfologico dell'alveo. Inoltre, la riduzione della velocità media della corrente in condizioni ordinarie, legata agli effetti di rigurgito indotti dalle opere di regolazione, comporterebbe una diminuzione delle azioni erosive attualmente in atto sul fondo alveo, contribuendo in tal modo a ridurre l'attuale tendenza alla canalizzazione del fiume;

- miglioramento delle condizioni di navigabilità: l'innalzamento dei livelli idrici di magra potrà garantire le condizioni di navigabilità in classe V per tutto l'anno e il miglioramento delle condizioni di accesso al porto di Cremona;
- produzione di energia idroelettrica da fonte rinnovabile: la realizzazione delle traverse permetterà di ottenere, in corrispondenza delle stesse, dei dislivelli idrici che potranno essere utilizzati per produrre energia idroelettrica; tale produzione è assai rilevante sia in senso assoluto sia per il fatto che proviene dallo sfruttamento di risorse rinnovabili. Inoltre, tale produzione energetica è in grado di rendere l'intervento in oggetto economicamente auto sostenibile;
- miglioramento delle possibilità di derivazione a fini irrigui: l'innalzamento dei livelli idrici di magra potrà garantire migliori possibilità di prelievo idrico e risparmi energetici per il sollevamento delle acque. Inoltre, non sarà più necessario continuare a prevedere impianti di sollevamento sussidiari agli esistenti, che negli ultimi anni sono stati realizzati per far fronte al continuo approfondimento del livello idrico di magra, conseguente all'abbassamento dell'alveo del Po e al verificarsi di periodi estremamente siccitosi;
- innalzamento e stabilizzazione delle falde idriche: l'innalzamento dei livelli fluviali permetterà di incrementare i livelli delle falde;
- maggiore disponibilità di risorsa idrica da gestire durante i periodi siccitosi: il volume idrico invasabile sia all'interno dell'alveo inciso (circa 150 Mm3) sia nell'acquifero circostante potrà rendersi disponibile per incrementare la portata defluente nel tratto di Po a valle in occasione di periodi di magra eccezionali. Questo potrà indurre diversi benefici, tra cui: migliorare la funzionalità delle derivazioni idriche superficiali ad uso irriguo ed industriale (raffreddamento delle centrali termoelettriche di Ostiglia e Sermide), contrastare la risalita del cuneo salino nell'area del Delta;
- riqualificazione paesistica ed ambientale: con l'innalzamento del livello il fiume sarà invitato a rioccupare parte degli spazi che gli sono stati sottratti con l'opera di regolarizzazione del suo corso. Questo potrà essere guidato con estrema facilità alla creazione di zone umide, veri e propri biotopi artificiali, che col tempo potrebbero assumere un valore naturalistico proprio, da vedere in modo integrato con i SIC-ZPS esistenti.

In sintesi esso si basa sulla realizzazione di n. 5 nuove traverse di regolazione nel tratto da Cremona all'incile del Po di Goro, a valle di quella già da tempo esistente di Isola Serafini; le traverse sono ubicate nei pressi di:

1. Motta Baluffi (CR) e Roccabianca (PR);
2. Casalmaggiore (CR) e Mezzano (PR);
3. Viadana (MN) e Suzzara (MN);
4. Serravalle Po (MN) e Pieve di Coriano (MN) - Quingentole (MN);
5. Occhiobello (RO) e Ferrara (FE).



Figura 373 - Localizzazione delle 5 traverse definite dal Servizio 1

Sulla base delle quote e dei livelli di regimazione delle opere già individuati e ritenuti idonei per gli scopi prefissi e quindi qui confermati, il Servizio 1 ha proceduto a una verifica delle opere tesa a proporne le soluzioni ottimali nelle diverse parti strutturali che andranno a comporre le traverse.

La ricerca delle soluzioni ottimali è stata condotta con i seguenti criteri:

- verifica della soluzione 2009 e proposta/e di variante/i, pur restando nell'intorno dell'ubicazione prevista nello Studio del 2009 in modo da mantenerne il medesimo livello di regolazione, allo scopo di ottimizzare la funzionalità dell'opera nei riguardi della navigazione, in particolare garantendo manovrabilità degli accessi nei mandracchi della conca per navigli di classe Va;
- verifica della soluzione 2009 e proposta/e di variante/i, nei limiti suddetti, allo scopo di minimizzare l'impatto delle opere fisse (strutture fisse costitutive della conca, delle pile della traversa, della centrale idroelettrica e delle opere accessorie e di accesso e manutenzione) nei confronti dei regimi di piena;
- verifica della soluzione 2009 e proposta/e di variante/i, nei limiti suddetti, per rendere compatibili le opere con il regime degli affluenti, nei casi di prossimità con le corrispondenti foci, o con specifiche condizioni locali.

In particolare è stato definito quanto segue:

- per la traversa n. 1 a Motta Baluffi (CR) - Roccabianca (PR) si è studiata un'ubicazione posta poco più a monte rispetto a quella del progetto 2009, al fine di ottimizzare l'accesso dei navigli di classe Va alla conca di navigazione e ai relativi mandracchi di monte e di valle; nella nuova disposizione la traversa è posta in corrispondenza del ramo sostanzialmente rettilineo dell'alveo fluviale al contrario di quanto avviene con la posizione del progetto 2009. Inoltre nella nuova posizione è maggiore l'ampiezza complessiva dell'alveo di piena del Po con conseguente miglioramento complessivo del deflusso di piena e impatto trascurabile delle opere fisse della traversa;
- per la traversa n. 2 a Casalmaggiore (CR) - Mezzani (PR) la soluzione in variante, rispetto a quella del progetto 2009, prevede un'ubicazione a monte della foce del Parma in modo da evitarne il rigurgito in fase di piena tra Casalmaggiore e Mezzani;
- per la traversa n. 3 a Viadana (MN) - Suzzara (MN): avendo valutate le criticità della soluzione del progetto 2009 relative alla navigabilità del ramo curvilineo e ristretto di Borgoforte, dell'effetto di rigurgito lungo la foce Oglio, che avrebbe messo in crisi gli impianti idrovori di San Matteo delle Chiaviche in gestione al Consorzio Navarolo-Agro Cremonese Mantovano, (che garantiscono il drenaggio di tutto il settore in sinistra del basso Po da Isola Pescaroli a confluenza Oglio) è stata configurata una soluzione in variante ubicata a monte della confluenza Oglio all'altezza dell'abitato di Cizzolo (MN);
- per la traversa n. 4 a Pieve di Coriano (MN) - Quingentole (MN): a valle di foce Mincio nel progetto

2009 era stata studiata una posizione poco a valle di foce Secchia; sono state configurate due varianti: una ubicata a monte del Secchia e poco a valle di Sustinente, che prevede peraltro anche lo spostamento della foce di quest'ultimo verso valle e con andamento più opportuno, peraltro già previsti da AIPO; l'altra ancora a valle del Secchia e anche a valle di Quingentole, ma in condizioni più favorevoli rispetto alla navigabilità fluviale che è stata preferita alla soluzione precedente;

- per la traversa n. 5 a Ferrara (FE) – Occhiobello (RO): sono state configurate due varianti rispetto alla posizione delineata nello studio del 2009; una ubicata subito a valle in posizione più favorevole rispetto alla navigabilità fluviale; l'altra ancora poco più a valle in modo tale da facilitare con il rigurgito creato dalla traversa la navigabilità del difficile ramo curvilineo di Stienta, preferita alla soluzione precedente.

Per ogni traversa è stata definito il livello di regolazione e la portata massima di regolazione indicate nella Tabella 132.

TRAVERSA	COMUNI	PROGRESSIVA [KM]	LIVELLO MASSIMO DI REGOLAZIONE (QUOTA IN M S.M.)	PORTATA MASSIMA DI REGOLAZIONE (M^3/S)
1	MOTTA BALUFFI (CR) – ROCCABIANCA (PR)	401	30,00	1.500
2	CASALMAGGIORE (CR) – MEZZANI (PR)	427	24,20	1.500
3	VIADANA (MN) – SUZZARA (MN)	461	19,00	1.500
4	PIEVE DI CORIANO (MN)	503	14,20	1.500
5	FERRARA (FE) – OCCHIOBELLO (RO)	556	7,50	1.500

Tabella 132 - Livelli e portate massime di regolazione delle 5 traverse

Ciascuna delle cinque traverse è costituita da:

- uno sbarramento, attrezzato con paratoie mobili di regolazione;
- una conca di navigazione;
- un'opera specifica per il passaggio dell'ittiofauna.

Per la parte idroelettrica è stata ipotizzata la possibilità di inserire nella traversa degli elementi modulari contenenti il sistema turbina-alternatore sollevabili in caso di portate superiori ai 1.500/2.000 m^3/s, diminuendo l'impatto trasversale delle opere secondo lo schema di Figura 374.

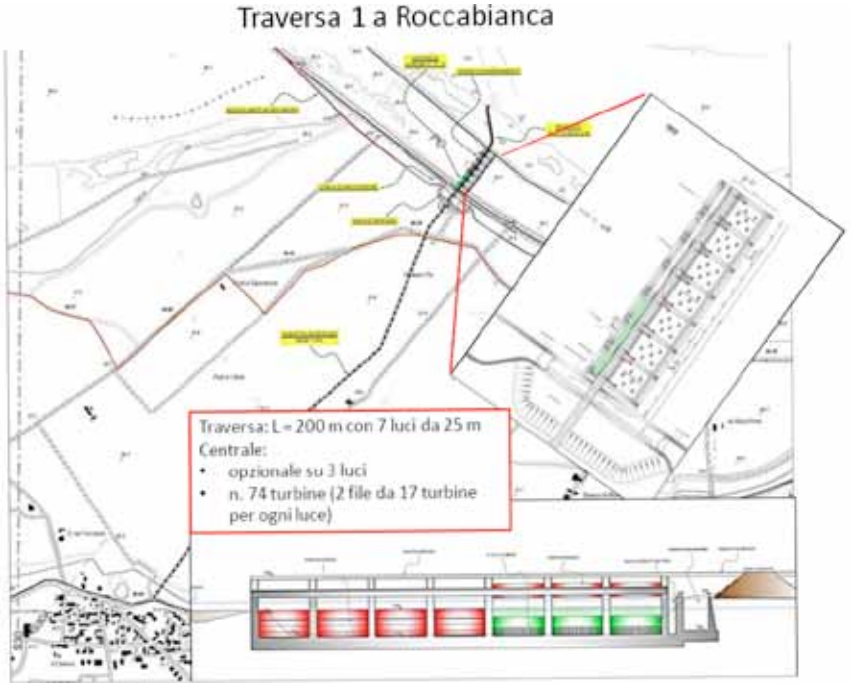


Figura 374 - Ipotesi installazione di moduli idroelettrici per la traversa 1

18 IMPOSTAZIONE METODOLOGICA GENERALE

Le analisi, su ciascuno dei tre temi indicati in premessa, sono impostate secondo i seguenti passi sequenziali:

- caratterizzazione dell'assetto attuale relativo alle diverse componenti del sistema idrico;
- valutazione degli effetti indotti sul sistema stesso rispettivamente dalle due opzioni di intervento a livello sia di specifiche componenti del sistema sia dell'assetto complessivo dello stesso.

Va osservato in proposito che la soluzione di intervento che prevede il completamento della sistemazione a corrente libera dell'intero tratto non comporta variazioni apprezzabili sulle tre componenti ambientali esaminate, in quanto gli effetti attesi si limitano a modeste variazioni morfologiche sull'alveo di magra – per lo più in corrispondenza delle nuove opere in alveo previste – che non danno luogo a variazioni significative dei profili idrici o per le diverse portate, ipotizzando che non inducano abbassamenti generalizzati del fondo. La caratterizzazione dell'assetto attuale e degli eventuali trend evolutivi riferiti ad esso è pertanto rappresentativa anche dell'assetto di progetto relativo alla sistemazione a corrente libera.

A titolo di esempio, in riferimento al primo tema su cui vengono condotti gli approfondimenti necessari per la valutazione degli effetti ambientali delle due opzioni alternative di sistemazione, le componenti principali che determinano il sistema idrico coinvolto sono rappresentate da:

- il regime idrometrico dell'alveo del Po, rappresentato essenzialmente dall'escursione dei livelli idrici in funzione della portate defluente, con riferimento ai valori ordinari e di magra (a partire dalle portate di piena ordinaria gli effetti indotti dagli interventi sono in pratica non più apprezzabili in quanto il deflusso inizia a coinvolgere in modo significativo l'alveo di piena);
- il regime della falda freatica nelle aree rivierasche, in rapporto alle sue interazioni con quello idrometrico del Po;
- il reticolo idrografico minore, naturale e artificiale, gestito dai Consorzi di bonifica, che recapita nel Po le acque meteoriche provenienti dal drenaggio minuto del territorio della pianura; le modalità di scarico avvengono attraverso chiaviche inserite lungo gli argini maestri, che permettono la disconnessione idraulica tra reticolo e livelli idrici del Po;
- gli impianti di derivazione idrica, riferiti prevalentemente a usi irrigui che derivano tramite sollevamento meccanico;
- gli impianti di derivazione, da alveo o da subalveo, per uso potabile e, in soli due casi, per raffreddamento a servizio di impianti di produzione termoelettrica;
- gli ambienti ripariali che costituiscono una fascia di interfaccia tra l'alveo e il piano campagna retrostante, normalmente ad utilizzazione agricola; occupano una parte o l'intera golena aperta e hanno estensione trasversale più o meno significativa; le comunità vegetali che le costituiscono rivestono un ruolo importante sotto l'aspetto ecologico e idraulico (stabilità delle sponde incise) e sono strettamente correlate al regime idrologico dei livelli idrici dell'alveo e ai corrispondenti livelli della falda superficiale;
- le condizioni di uso del suolo esterne alla fascia ripariale; si differenziano a loro volta tra quelle presenti nella porzione dell'alveo di piena costituita dalle golene aperte, quelle nelle golene chiuse (delimitate da argini golenali, in alcuni casi di più ordini) in cui sono presenti utilizzi agricoli più importanti e infine nella porzione di territorio a tergo degli argini maestri; naturalmente, man mano che ci si allontana dell'alveo si riducono progressivamente gli effetti connessi a eventuali modifiche delle condizioni di regime idrometrico di magra.

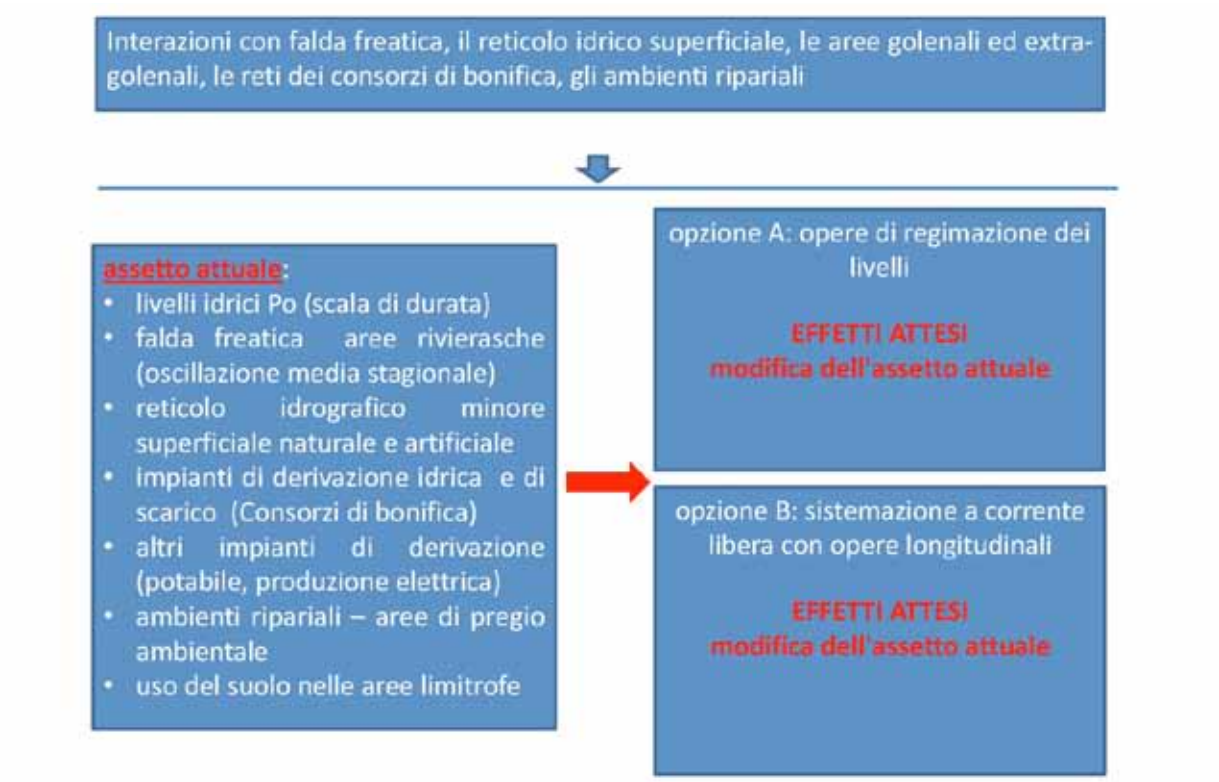


Figura 375 - Schema a blocchi dell'approccio metodologico per la valutazione degli effetti ambientali delle opzioni di sistemazione dell'alveo del fiume Po, con riferimento al sistema idrico costituito dalla falda freatica e dal reticolo idrico superficiale

Per ciascuna di tali componenti è stata svolta una caratterizzazione dell'assetto attuale - sulla base degli elementi conoscitivi disponibili – tenendo conto, ove significativo – dei possibili trend evolutivi; rispetto ad esso vengono stimati gli effetti attesi conseguenti alla realizzazione delle opere in progetto, in modo tale da permettere una valutazione in rapporto alle stesse componenti presenti nella regione fluviale.

19 CARATTERISTICHE IDRODINAMICHE DELL'ALVEO ATTIVO IN CONDIZIONI DI MAGRA E ORDINARIE – SIMULAZIONI IDRAULICHE DELL'ASSETTO ATTUALE E DI PROGETTO

La caratterizzazione idrodinamica dell'alveo attivo è stata effettuata con lo scopo di costituire uno strumento in grado di fornire i parametri idraulici di base rispetto ai quali impostare le valutazioni degli effetti sulle diverse componenti in studio del sistema: falda freatica, reticolo idrico superficiale, aree golenali ed extra-golenali, risalita del cuneo salino, qualità delle acque.

E' stato messo a punto un modello monodimensionale costruito con il codice di calcolo MIKE 11 - DHI, per mezzo del quale è stato possibile ottenere una rappresentazione delle condizioni di deflusso, riferite ai diversi stati idrologici, in termini di velocità media, profondità della corrente e livelli idrici.

Gli scenari geometrici implementati riguardano la configurazione di stato di fatto e di progetto per il tratto compreso tra Cremona e il mare.

L'implementazione della geometria dell'alveo è stata particolarmente approfondita per l'alveo attivo (portate di magra e ordinarie) attraverso l'utilizzo delle sezioni AIPO 2004–2005, i dati batimetrici ottenuti dal rilievo AIPO 2011 per il tratto Cremona-Mincio, e AIPO 2005 per il tratto Mincio-foce.

Il funzionamento idraulico delle traverse, nelle rispettive localizzazioni, è stato imposto in modo da mantenere un livello di ritenuta costante assegnato fino alla portata di 2.000 m3/s; al di sopra di tale valore è simulata l'apertura totale del dispositivo di ritenuta, che riporta il profilo idrico a coincidere sostanzialmente con quello corrispondente all'assetto geometrico attuale. L'implementazione numerica è stata fatta utilizzando la routine "weir" del codice MIKE11.

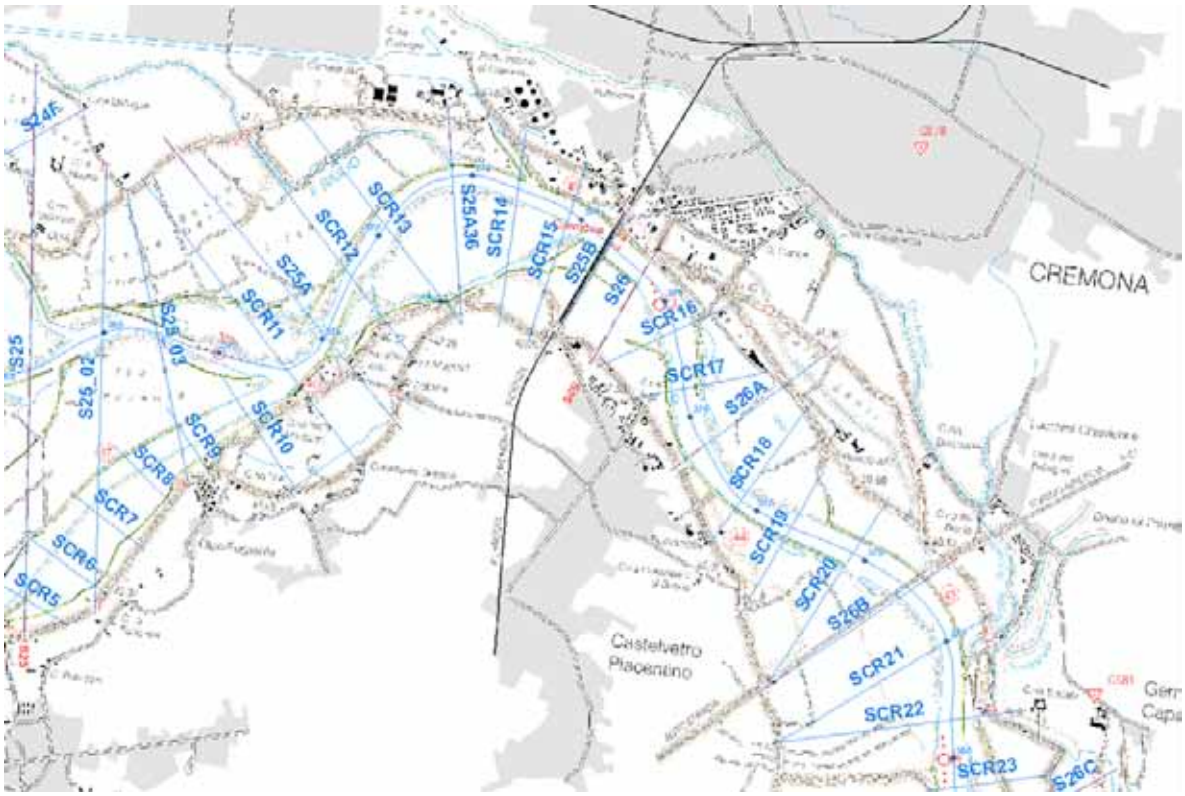


Figura 376 - Geometria dell'alveo del Po in corrispondenza della stazione idrometrica di Cremona implementata sul modello di simulazione idraulica

Le operazioni di taratura sono state effettuate considerando le più recenti scale di portata disponibili nelle stazioni idrometriche principali lungo l'asta: Cremona (S26), Boretto (S37), Borgoforte (S42), Sermide (S57) e Pontelagoscuro (S65).

Per le portate di deflusso si è acquisito per le stazioni citate, la serie storica delle portate medie giornaliere per il periodo 2000-2013.

TRAVERSA	PROGRESSIVA [km]	QUOTA SFIORO [m s.m.]
1	401	30,0
2	427	24,2
3	461	19,0
4	503	14,2
5	556	7,5

Tabella 133 - Quota del livello idrico regolato per ogni traversa di regimazione

Le condizioni al contorno assegnate per l'esecuzione delle simulazioni idrodinamiche sono:

- condizione al contorno di monte (sez. 25A): idrogramma di portata o portata costante relativa allo scenario da analizzare;
- condizione al contorno di valle: imposizione della quota idrometrica alla foce.

Gli scenari di simulazione implementati sono i seguenti:

Configurazione di stato di fatto:

a. simulazioni in moto permanente per la taratura - configurazione di stato di fatto;
b. simulazione in moto permanente per le portare caratteristiche delle curve di durata delle portate calcolate a partire dalle serie storiche di misura degli ultimi 10 anni (2003÷2013) delle portate medie giornaliere - configurazione di stato di fatto e di progetto;
c. simulazione in moto vario dell'anno 2003 (finalizzata all'implementazione del modello 3D per lo studio della qualità delle acque in corrispondenza della traversa 3 all'altezza circa di Borgoforte) - configurazione di stato di fatto e di progetto;
d. simulazione in moto vario dell'anno 2011, assunto come rappresentativo dell'anno medio, finalizzata all'implementazione del modello 3D per la stessa traversa) - configurazione di stato di fatto e di progetto;
e. simulazione idraulica della minima magra del 2003 nell'ipotesi di apertura programmatica delle traverse per il sostegno delle portate minime a valle delle traverse stesse.

Come detto in precedenza i valori caratteristici delle curve di durata delle portate sono stati calcolati con riferimento al periodo 2003÷2013, particolarmente rappresentativo per i numerosi episodi di magra estiva particolarmente gravosa.

GIORNI	PONTELAGOSCURO (S65)	SERMIDE (S57)	BORGOFORTE (S42)	BORETTO (S37)	CREMONA (S26)
	PORTATA (m^3/s)				
10	4.030	4.827	4.501	3.398	3.101
30	2.803	3.072	2.943	2.267	1.999
60	2.006	2.382	2.242	1.647	1.453
91	1.653	1.937	1.839	1.340	1.183
135	1.348	1.554	1.487	1.081	970
182	1.133	1.322	1.239	877	804
274	854	1.002	925	665	624
355	612	809	753	476	479

Tabella 134 - Curve di durata delle portate per le stazioni di misura lungo l'alveo del Po

Come condizione idrologica rappresentativa dell'anno medio è stato assunto nella stazione idrometrica di Cremona l'anno 2011, sulla base del confronto con le curve di durata delle portate relative all'intero periodo considerato nella stessa stazione e la curva di durata media calcolata per l'intero decennnio (Figura 377).

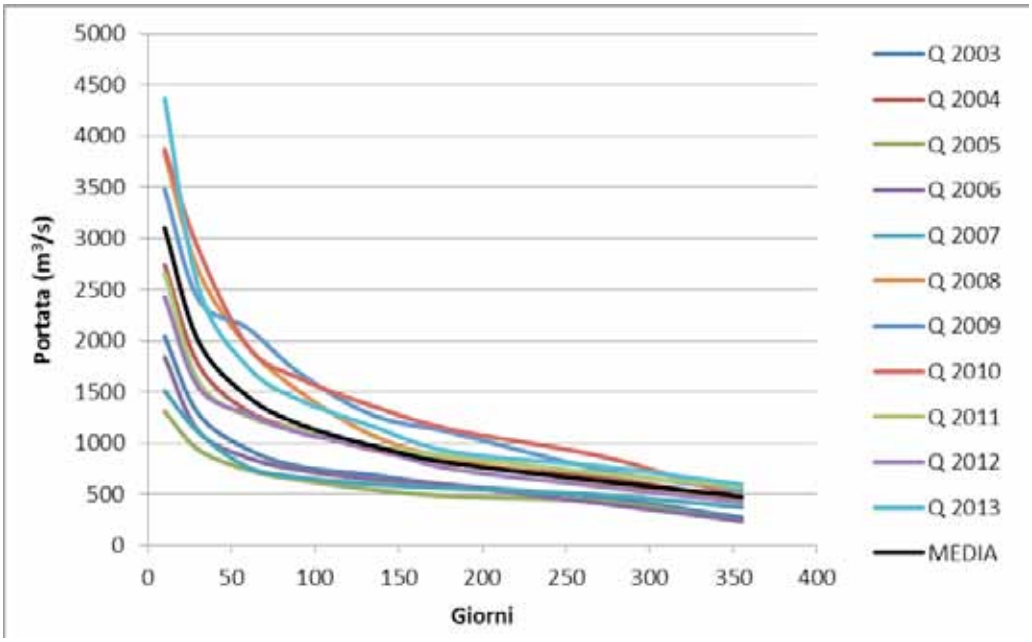


Figura 377 - Curve di durata delle portate nella stazione idrometrica di Cremona

19.1 MESSA A PUNTO DEL MODELLO DI SIMULAZIONE (IMPLEMENTAZIONE E TARATURA)

Il processo di taratura è stato condotto confrontando i risultati delle simulazioni con le scale di deflusso delle sezioni di controllo opportunamente selezionate per la rappresentazione del tratto in esame: Cremona (S26), Boretto (S37), Borgoforte (S42), Sermide (S57) e Pontelagoscuro (S65).

La procedura è stata effettuata per un campo di valori di portata compresi tra 500 e 4.000 m3/s, che rappresenta l'intervallo di interesse per tutte le simulazioni.

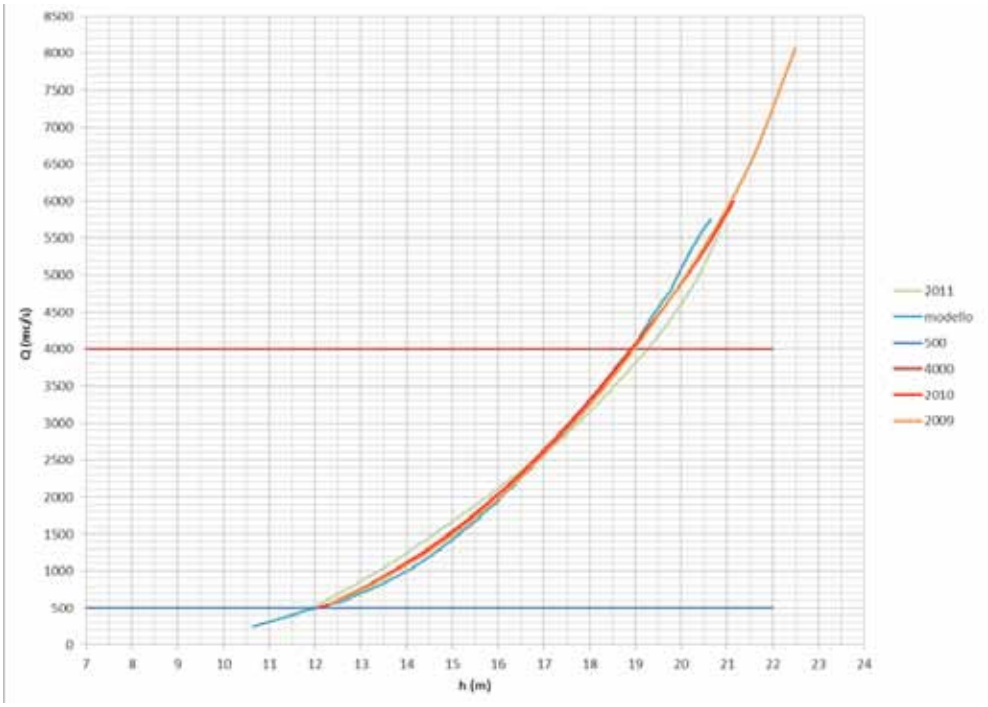


Figura 378 - Risultati del processo di taratura nella stazione di Borgoforte (sezione S42); scale di deflusso misurate e valori simulati

19.2 PROFILI IDRICI PER LE PORTATE CARATTERISTICHE (STATO ATTUALE E DI PROGETTO)

Si riportano nel seguito i profili idrici lungo l'asta del Po derivanti dalle simulazioni effettuate relative ai due scenari, rispettivamente di progetto (traverse di regolazione) e dello stato di fatto, per le diverse portate caratteristiche.

Per le durate più elevate, e quindi valori di portata più bassi, la regolazione dei livelli comporta un innalzamento del profilo rispetto alla condizione non regolata a cui corrisponde la formazione di un volume di invaso; a titolo indicativo, l'ordine di grandezza del volume di invaso a monte creato da ciascuna traversa è rappresentato dal triangolo delimitato tra il profilo rosso (regolato) e quello azzurro (stato di fatto).

Con la diminuzione della durata e quindi l'aumento del valore delle portate caratteristiche, il volume di invaso delle traverse diminuisce, annullandosi completamente o quasi al raggiungimento della massima portata di regolazione di 2.000 m3/s, valore oltre il quale si ha il ritorno del profilo idraulico relativo alla configurazione di progetto a coincidere con quello dello stato attuale.

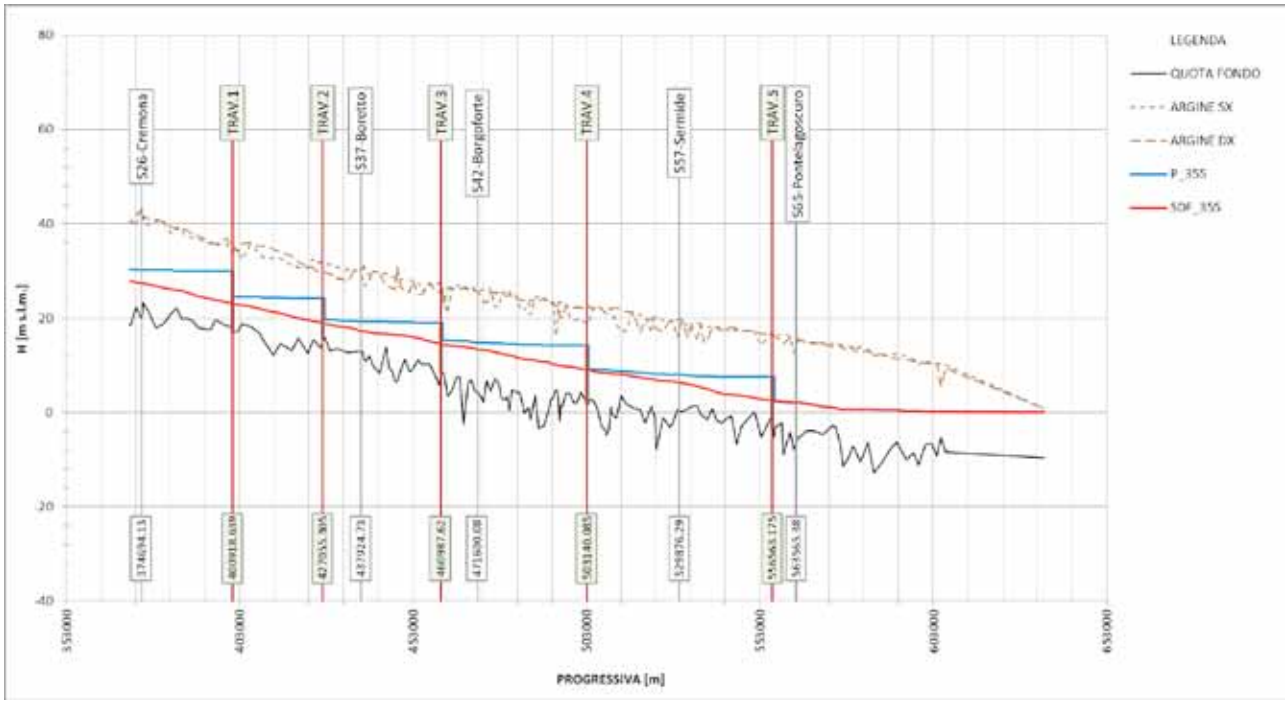


Figura 379 - Profili idraulici relativi alle configurazioni di progetto e di stato di fatto (per la portata caratteristica di 355 giorni)

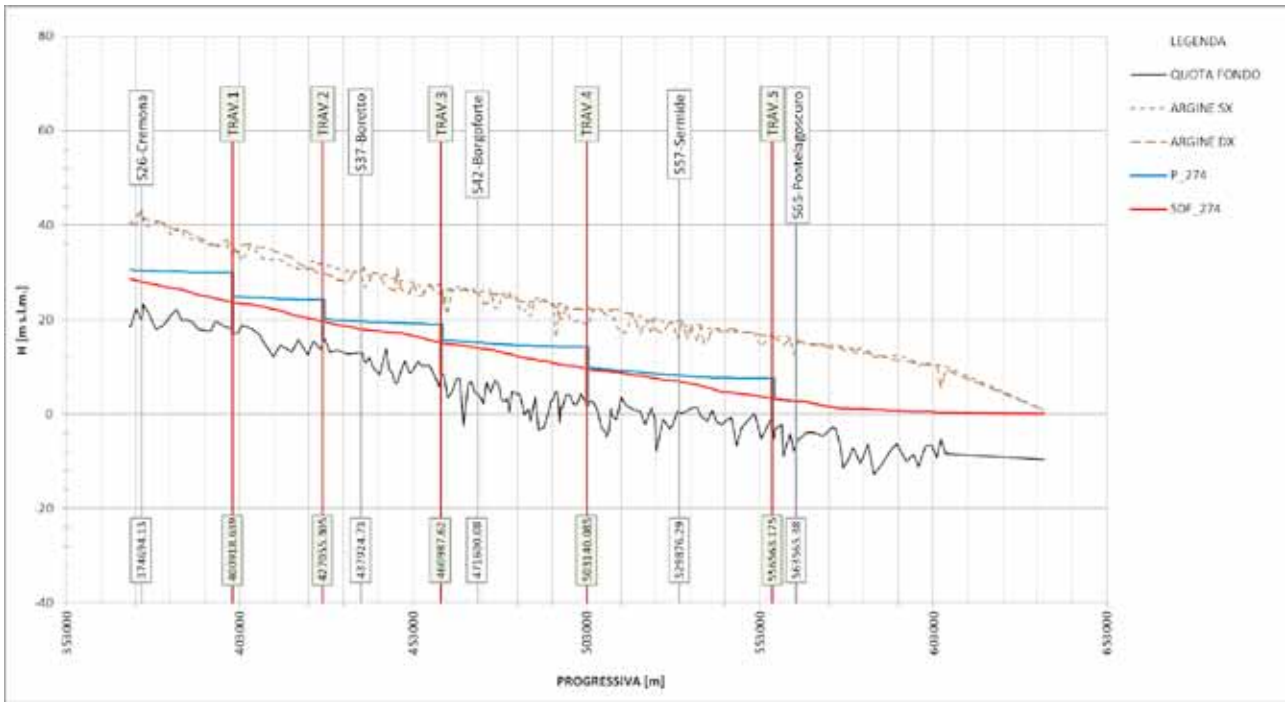


Figura 380 - Profili idraulici relativi alle configurazioni di progetto e di stato di fatto (per la portata caratteristica di 274 giorni)

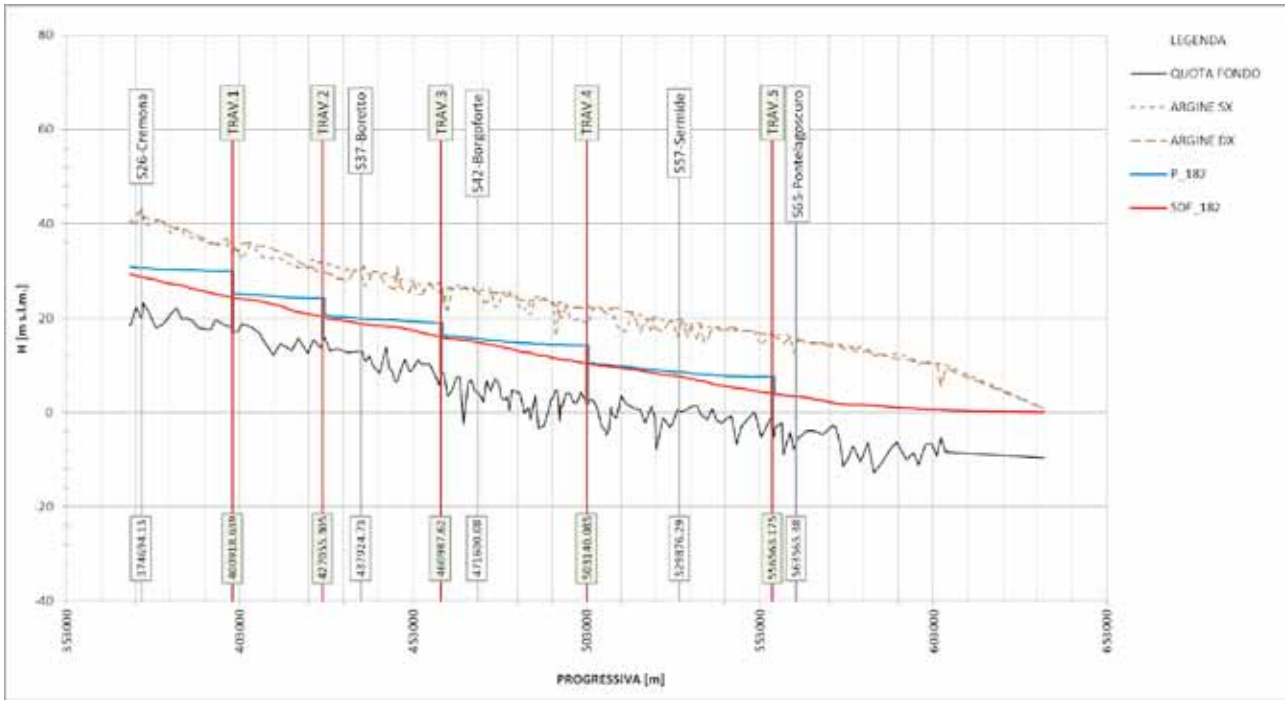


Figura 381 - Profili idraulici relativi alle configurazioni di progetto e di stato di fatto (per la portata caratteristica di 182 giorni)

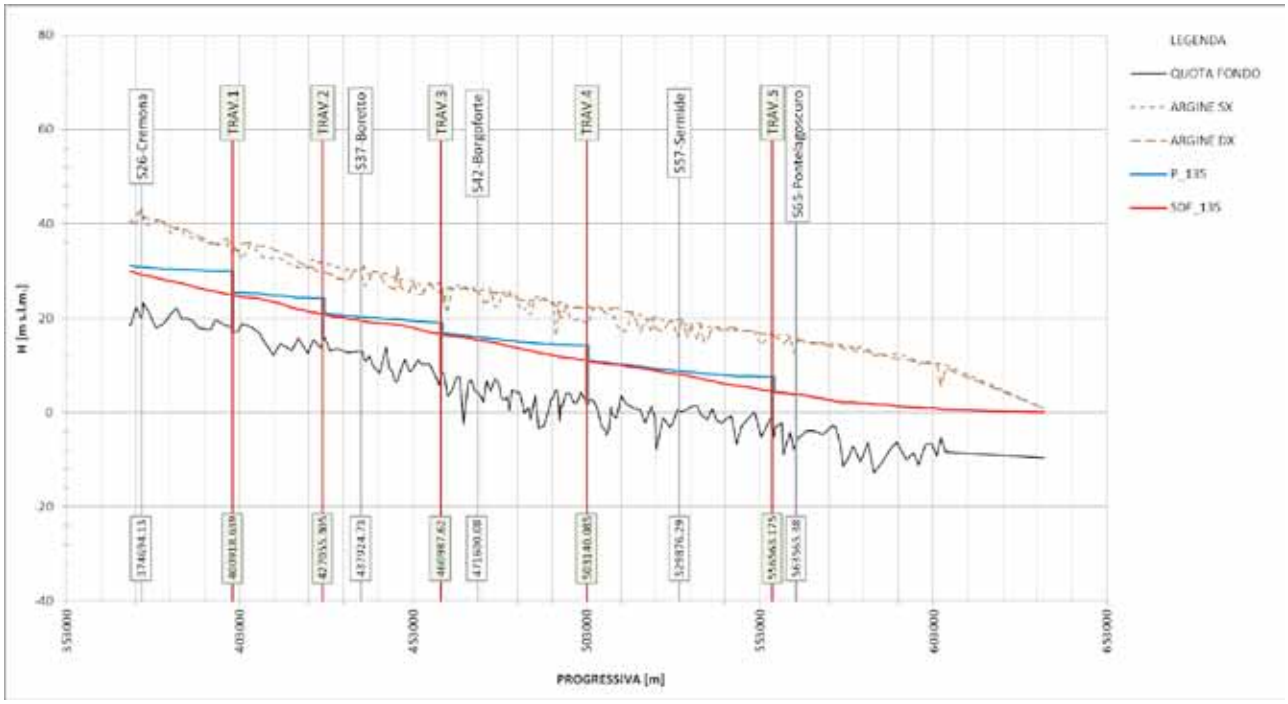


Figura 382 - Profili idraulici relativi alle configurazioni di progetto e di stato di fatto (per la portata caratteristica di 135 giorni)

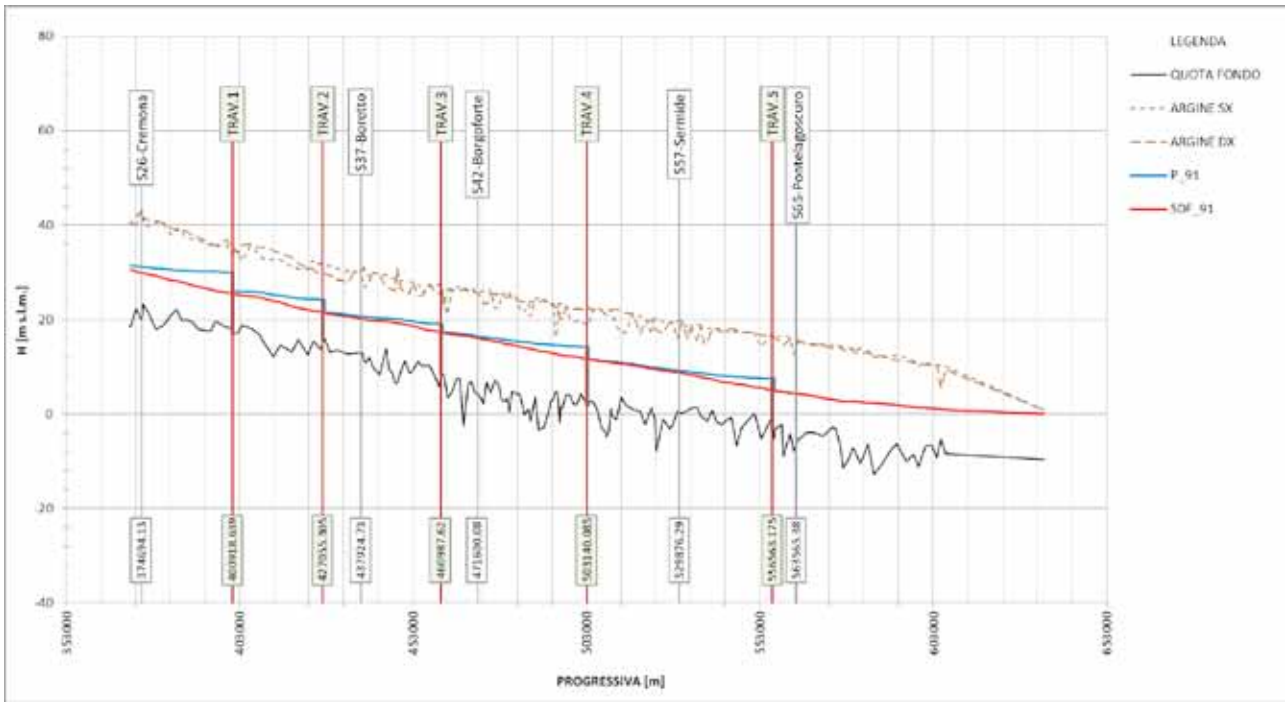


Figura 383 - Profili idraulici relativi alle configurazioni di progetto e di stato di fatto (per la portata caratteristica di 91 giorni)

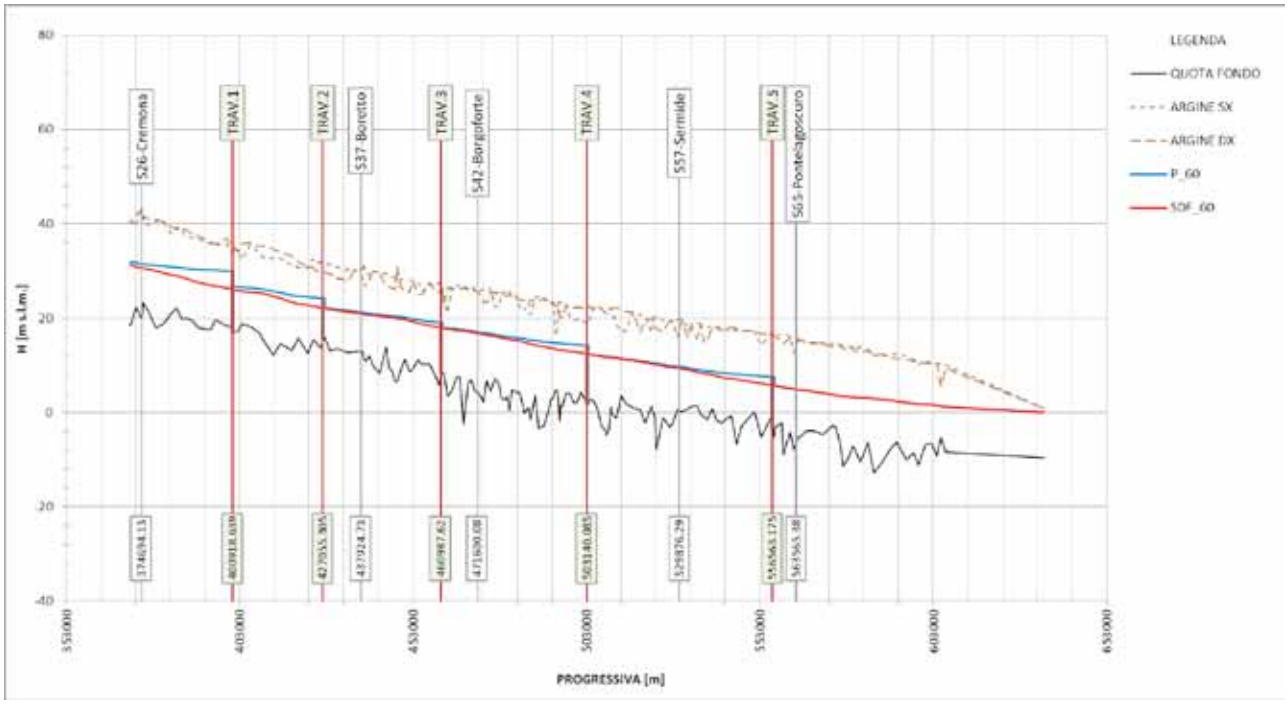


Figura 384 –Profili idraulici relativi alle configurazioni di progetto e di stato di fatto (per la portata caratteristica di 60 giorni)

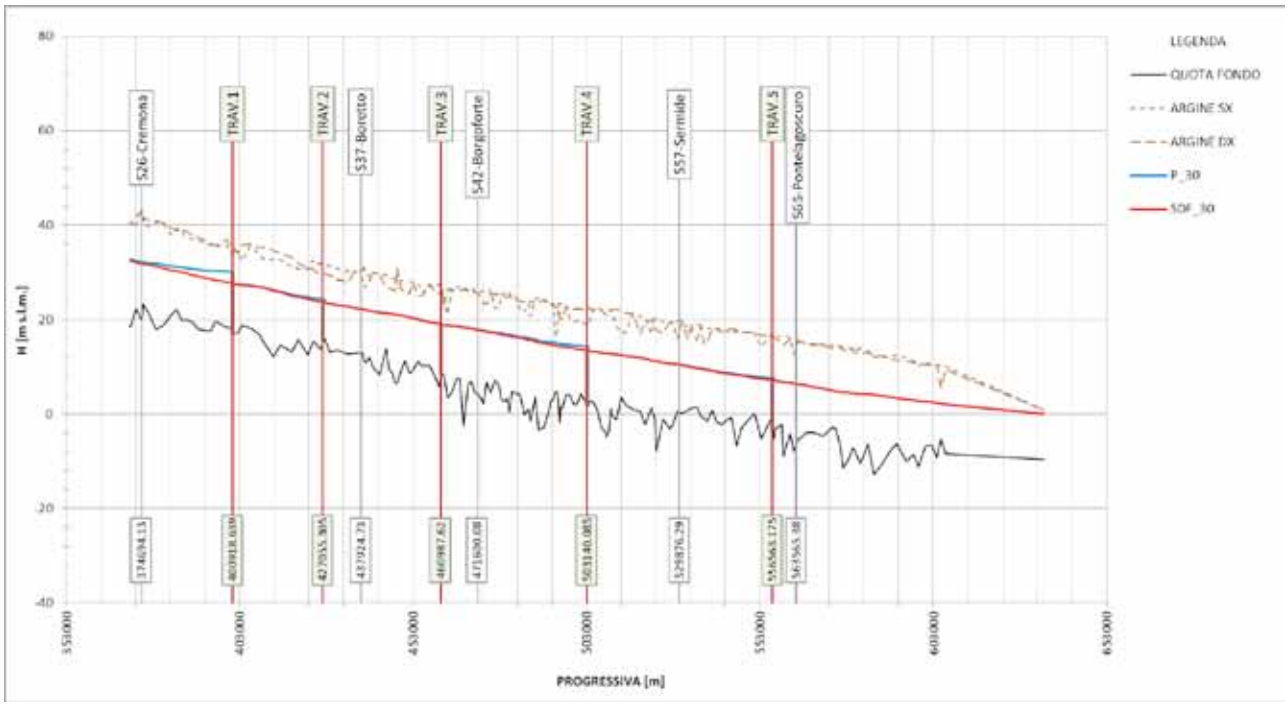


Figura 385 - Profili idraulici relativi alle configurazioni di progetto e di stato di fatto (per la portata caratteristica di 30 giorni)

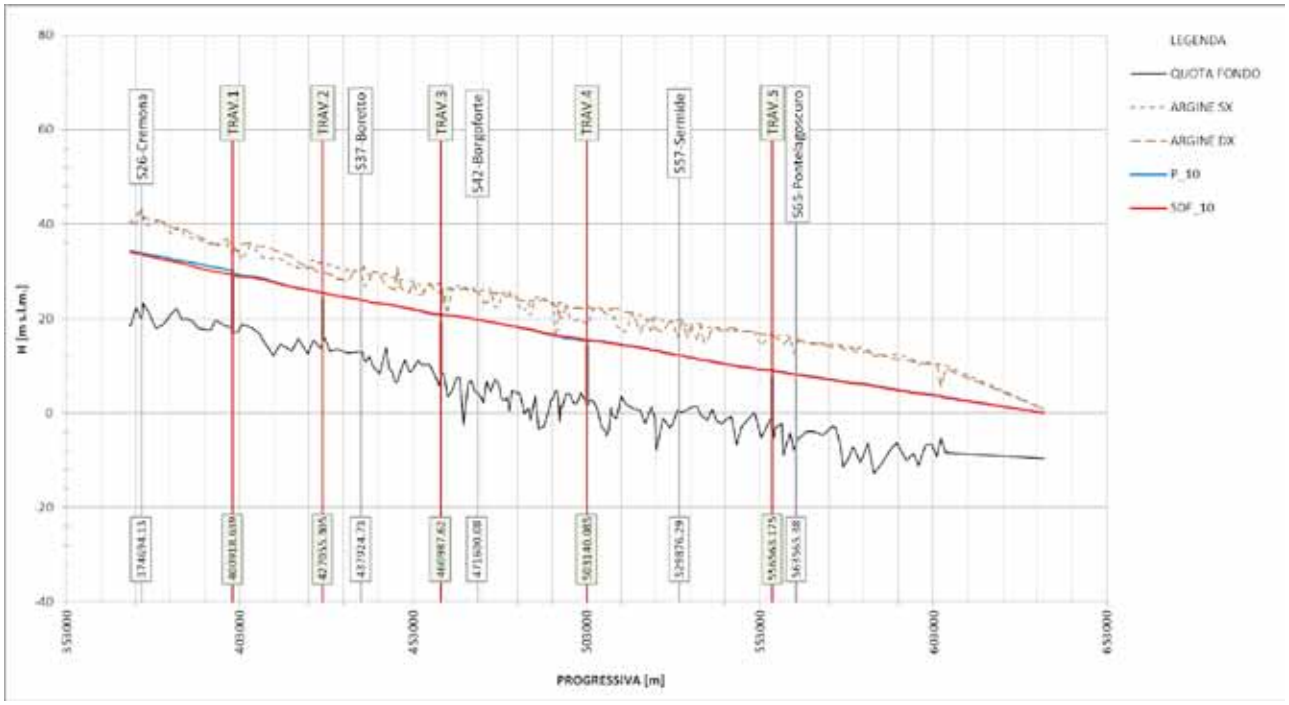


Figura 386 - Profili idraulici relativi alle configurazioni di progetto e di stato di fatto (per la portata caratteristica di 10 giorni)

19.3 SIMULAZIONI DELLE MODALITÀ DI REGOLAZIONE IN FUNZIONE DEL CUNEO SALINO

L'analisi degli effetti della regolazione delle traverse sulla risalita del cuneo salino lungo l'asta del Po è stata effettuata considerando la condizione più sfavorevole registrata nella decade compresa tra il 2003 ed il 2013. Il valore scelto corrisponde alla portata media della magra estiva dell'anno 2003, pari a 300 m^3/s.

Lo scopo di tale studio è quello definire una combinazione di regolazione delle cinque traverse affinché a valle di Pontelagoscuro si riesca ad ottenere per il maggior tempo possibile una portata maggiore o uguale a 450 m^3/s, individuata come portata minima per contenere la risalita del cuneo.

La ricostruzione modellistica di tale scenario si è articolata in più fasi ipotizzando delle possibili manovre di regolazione. Sono stati creati cinque modelli diversi ricostruendo il funzionamento di ciascuna traversa. La portata media della magra estiva dell'anno 2003 è stata applicata a ciascuno di essi. In tal modo per ogni traversa è stato definito un profilo idrico di funzionamento. Il risultato ottenuto è stato utilizzato come condizione iniziale di livello per simulare l'apertura di ogni manufatto e quindi per misurare il volume di acqua trattenuto dalle traverse imponendo sempre la portata di 300 m3/s.

Mediante la combinazione di queste simulazioni è stato definito il volume di invaso massimo trattenuto da ciascuna traversa e quindi rilasciato da ciascuna al momento della loro apertura. Dall' idrogramma di portata di ciascuna sezione a valle di ogni sbarramento è stato calcolato il volume di ogni singolo bacino di trattenuta (v. esempio in Figura 387).

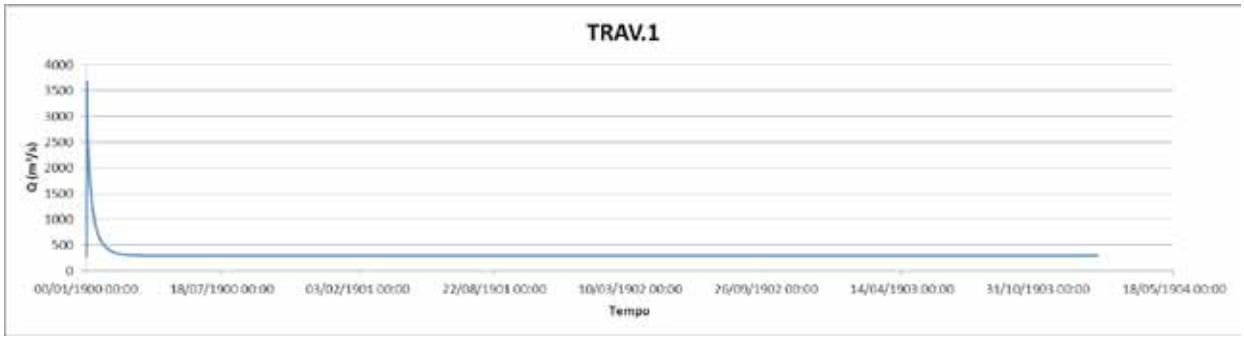


Figura 387 - Idrogramma di portata a valle della traversa 1 nell'ipotesi di apertura totale delle paratoie

TRAVERSA	VOLUME (m3)
1	45.334.774
2	32.467.686
3	37.811.111
4	62.210.140
5	61.730.119
TOTALE	239,553,830

Tabella 135 - Volumi idrici invasati a monte di ciascuna traversa per la portata di 300 m^3/s

A partire dalla stata studiata una possibile regolazione in modo tale da ottenere a valle un valore di portata maggiore o uguale a 450 m^3/s per il maggior numero di giorni possibile.

La combinazione studiata prevede l'apertura prima della traversa 2, poi la 5, la 1, la 3 e infine la 4.

TRAVERSA	DATA DI APERTURA
1	25/06/2003 22:00
2	18/06/2003 22:00
3	26/06/2003 22:00
4	29/06/2003 01:00
5	20/06/2003 00:00

Tabella 136 - Regolazione delle traverse

La configurazione ottenuta a valle della sezione di Pontelagoscuro è riportata in (Figura 388) in cui si osserva che la regolazione simulata riesce a sostenere per oltre un mese un valore di portata maggiore della soglia limite imposta.

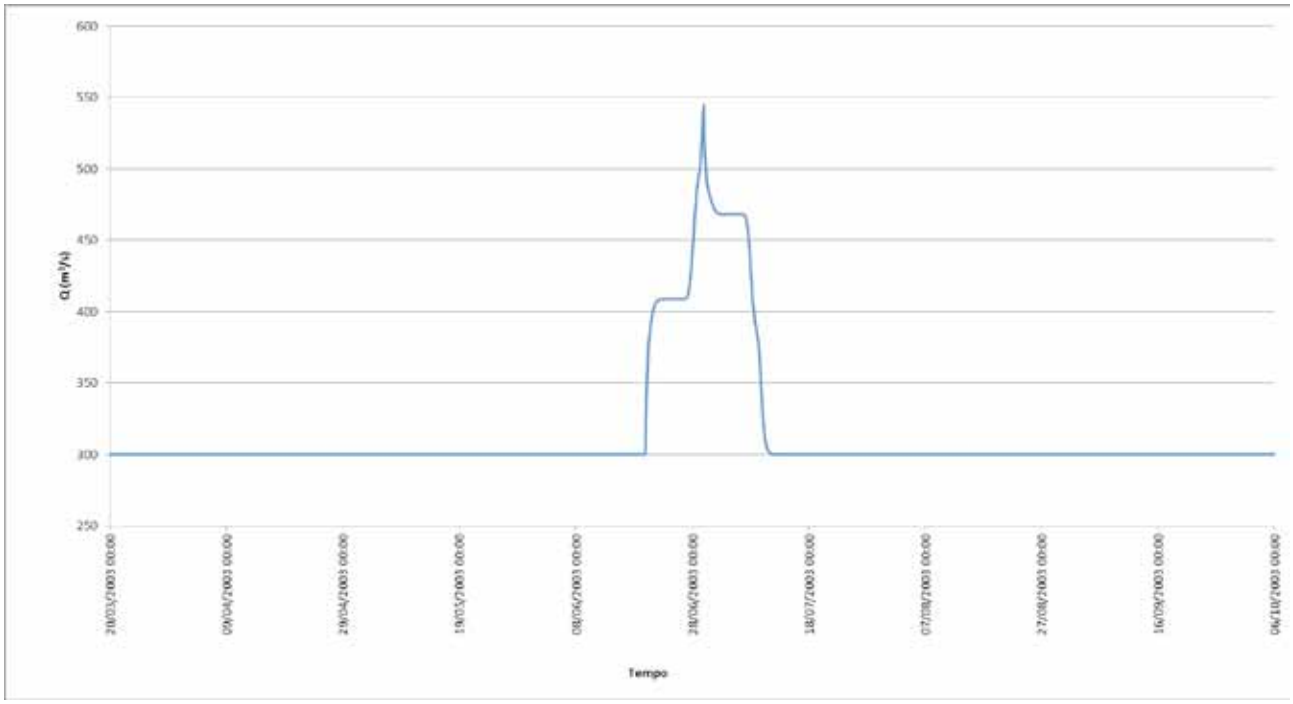


Figura 388 - Effetti della regolazione delle traverse a valle di Pontelagoscuro

20 APPROFONDIMENTO DELLE INTERAZIONI CON LA FALDA FREATICA, IL RETICOLO IDRICO SUPERFICIALE E LE AREE GOLENALI ED EXTRA-GOLENALI; INTERAZIONE DELLE PROPOSTE PROGETTUALI NEI CONFRONTI DELLE RETI DEL CONSORZI DI BONIFICA; ANALISI DELLE INTERAZIONE CON GLI AMBIENTI RIPARIALI

20.1 APPROFONDIMENTO DELLE INTERAZIONI CON LA FALDA FREATICA, IL RETICOLO IDRICO SUPERFICIALE E LE AREE GOLENALI ED EXTRA-GOLENALI

20.1.1 Impostazione metodologica

Il lavoro di ricostruzione della condizione attuale della falda superficiale e della interazione falda/reticolo idrografico superficiale naturale e artificiale ha richiesto un'attenta raccolta e analisi dei dati disponibili.

Se da un lato la mole delle informazioni raccolta è notevole, dall'altra, per certi versi inevitabilmente, la loro analisi è risultata difficoltosa, sia per la disomogeneità dei dati stessi, sia per la scarsa densità delle informazioni nelle aree golenali e nella prima fascia retroarginale, ove più strette sono le relazioni tra alveo del Po, acquiferi superficiali e rete di bonifica.

Tra i vari aspetti che hanno condizionato e limitato i risultati delle analisi, e su cui occorrerà intervenire, ove possibile, nelle successive fasi progettuali, si ricorda in particolare:

- il limitato numero di punti di monitoraggio dei livelli piezometrici, ulteriormente condizionati dal fatto che spesso sono destinati all'osservazione degli acquiferi profondi; per altro le reti di misura sono ubicate essenzialmente al di fuori delle aree golenali e, per lo più, in zone in cui l'influenza del regime idrometrico del Po sulle falde è molto limitato, o quanto meno indiretto;
- l'assenza di un modello di sufficiente dettaglio della superficie topografica, al di fuori delle golene e di una ristretta fascia retroarginale (200 m), cioè esternamente alle aree coperte dal rilievo Lidar eseguito da AIPO nel 2015, ad eccezione del territorio ricadente nella Regione Emilia Romagna;
- l'assenza di una rete diffusa di monitoraggio dei livelli idrometrici nella rete di bonifica.

Le caratteristiche del substrato hanno reso l'analisi non agevole, in quanto si tratta di depositi alluvionali omogenei a grande scala, ma caratterizzati da frequenti e poco prevedibili variazioni sedimentologiche e quindi delle caratteristiche idrogeologiche degli stessi.

Per quanto riguarda questo aspetto, i dati acquisiti da varie fonti (banche dati Regioni Lombardia ed Emilia Romagna essenzialmente) attestano, infatti, come per altro prevedibile, che i terreni di copertura sono costituiti da depositi alluvionali sabbiosi con intercalazione limose e argillose. In Lombardia il sistema viene descritto ipotizzando la presenza di 2 falde, una freatica superficiale e una in pressione.

In realtà la distribuzione dei livelli impermeabili che dovrebbero costituire elemento di separazione tra le falde superficiali e profonde è molto irregolare; inoltre spesso, soprattutto nel settore a valle di Guastalla, è presente un livello argilloso-limoso superficiale, talora costituito semplicemente da un cappello di 1-2 m di terreni pedogenizzati e talora da livelli decisamente più potenti anche di 10-15 m di spessore (il che vuol dire che in queste aree la prima falda è localmente in pressione).

Si tratta in pratica di un sistema multifalda, in cui il grado di confinamento cresce con la profondità. La posizione del primo livello impermeabile varia anche nell'ambito di distanze brevi, in una fascia che spazia da circa 15 a 50 m. Allo stesso modo l'acquifero superficiale presenta una potenza che può variate da 10 a 40 m. Tale condizione non deve stupire in quanto nella piana alluvionale si hanno depositi sabbiosi ove correva l'alveo attivo e limoso-argillosi nelle aree golenali. La persistenza dell'alveo lungo un certo tracciato determinala variazioni della potenza dei vari livelli che comunque, in un modo o nell'altro, sono pressoché sempre interconnessi. Questo non toglie che le perdite di carico e i prelievi facciano sì che, tra falde superficiali e profonde, possano esservi differenze significative nei livelli piezometrici e nei tempi di risposta al regime idrologico del Po.

Lo smaltimento delle acque raccolte avviene essenzialmente per gravità all'interno delle singole reti di drenaggio, mentre i punti di restituzione sono dotati di chiaviche lungo gli argini maestri e/o golenali, spesso accoppiate a impianti idrovori. Questi ultimi funzionano nei casi in cui i livelli idrometrici del Po sono alti e comportano la chiusura della chiavica e il sollevamento meccanico delle acque di scolo. Quando invece il corso d'acqua è in condizioni di magra o ordinarie, la chiavica rimane aperta e lo scarico avviene per gravità.

Infatti, anche alla luce dei processi di approfondimento del profilo di fondo del Po che si sono manifestati in misura rilevante negli ultimi 40 anni del secolo scorso, le aree retroarginali sono ora poste in genere al di sopra dei livelli idrologici ordinari del Po. Questo non toglie che a fronte di alcune chiaviche che entrano in funzione solo in occasione di eventi di piena straordinari, altre richiedano periodi di funzionamento decisamente più prolungati che possono coprire ampi intervalli dell'anno.

Poste queste premesse, le analisi svolte hanno confermato che in generale si ha su tutto il tratto considerato uno stabile rapporto di drenaggio del Po nei confronti della falda superficiale rivierasca. Tali condizioni si invertono, temporaneamente, in occasione delle piene e per alcuni tratti, in condizioni di morbide accentuate.

L'entità media dei volumi idrici drenati dall'alveo non è stata mai definita nel dettaglio, se non sulla base di valutazioni molto generali. In proposito lo studio del Servizio Geologico dell'Emilia-Romagna - Interreg IIIB Medocc 2007 - su basi modellistiche restituisce un valore, per l'area di Guastalla, senz'altro condivisibile alla luce di quanto emerso dal presente lavoro, pari a 0,1 $m^3/s/km$ per la magra estiva, ovvero quando si presume sia massimo il drenaggio esercitato dal Po.

In tal senso risulta evidente che gli afflussi verso il Po, per quanto elevati in assoluto rispetto al bilancio idrico dell'acquifero, non influiscono in misura significativa sul regime idrologico del Po stesso, costituendo al più un contributo pari ad alcuni punti percentuali delle portate di magra. Molto diverso è viceversa l'apporto del contributo indiretto degli acquiferi al Po attraverso i suoi affluenti, verosimilmente fondamentale per sostenere i deflussi durante le magre stagionali.

Più complesso appare il rapporto tra la rete di bonifica/irrigua e l'acquifero superficiale. In generale i dati raccolti tendono a confermare, questo caso, un flusso prevalente dalla rete superficiale agli acquiferi, con tuttavia eccezioni tutt'altro che rare soprattutto a valle della confluenza con il torrente Crostolo. Resta il fatto che, in genere, la soggiacenza dell'acquifero superficiale, sulla base delle osservazioni nelle stazioni di monitoraggio, è per lo più posta, nel corso dell'anno, a una profondità superiore ad 1-2 m. Anche in questo caso, probabilmente con maggiore frequenza, si può avere un'inversione dei rapporti di alimentazione/drenaggio durante le piene o periodi caratterizzati da afflussi meteorici particolarmente intensi o, ancora, in alcune aree, in occasione dell'apice della stagione irrigua.

20.1.2 Caratterizzazione della rete di scolo e di derivazione nelle aree golenali e extra-golenali dei consorzi di bonifica rivieraschi al fiume Po

I Consorzi di bonifica, in capo ai quali sono poste la competenza e la responsabilità della gestione del reticolo di bonifica e dei sistemi irrigui della pianura, hanno subito negli anni recenti un processo di riordino delle rispettive delimitazioni territoriali sulla base di specifiche leggi regionali e di accordi interregionali.

Tale processo ha riguardato le tre Regioni – Lombardia, Emilia-Romagna, Veneto – che hanno

competenza sul medio-basso bacino del fiume Po e ha comportato un significativo accorpamento dei territori amministrati. Ad esempio, per quanto riguarda il territorio della Regione Lombardia, il processo si è concluso nel 2012, con la D.G.R. n. 2994 dell'8 febbraio 2012, che ha approvato la proposta definitiva di ridelimitazione dei comprensori di bonifica e irrigazione suddividendo il territorio in 12 comprensori, di cui 4 a livello interregionale.

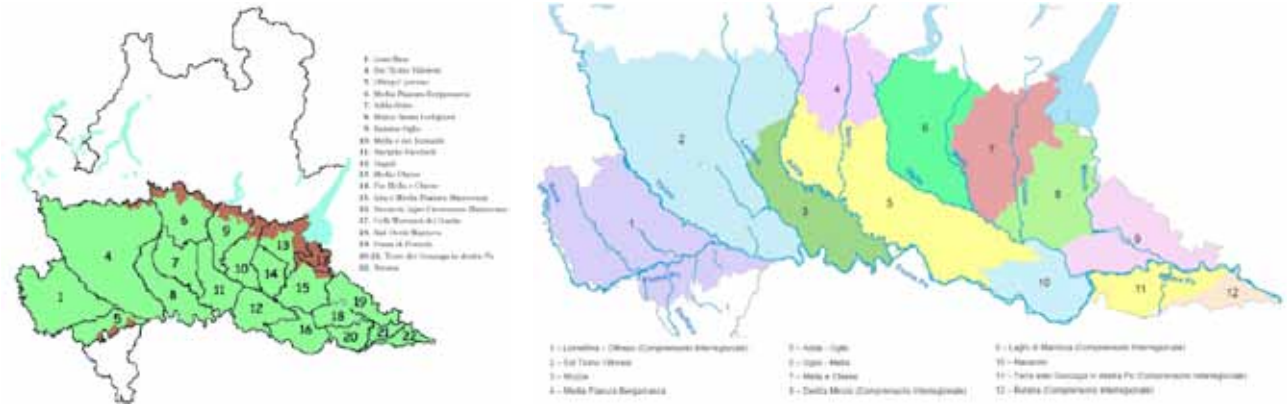


Figura 389 - Delimitazione dei confini territoriali dei comprensori di bonifica e irrigazione in Regione Lombardia prima del processo di riordino conclusosi nel 2012 (a sinistra) e dopo la ridelimitazione dei nuovi 12 comprensori lombardi (in destra).

Per la Regione Emilia Romagna il riordino dei Consorzi di bonifica avvenuto con la L.R. 5/2009, ha portato alla delimitazione di 8 Consorzi di bonifica di primo grado e di un Consorzio di bonifica di secondo grado (C.E.R.) che riunisce, per finalità specifiche legate all'approvvigionamento della risorsa idrica, 5 consorzi di primo grado ed altri associati.

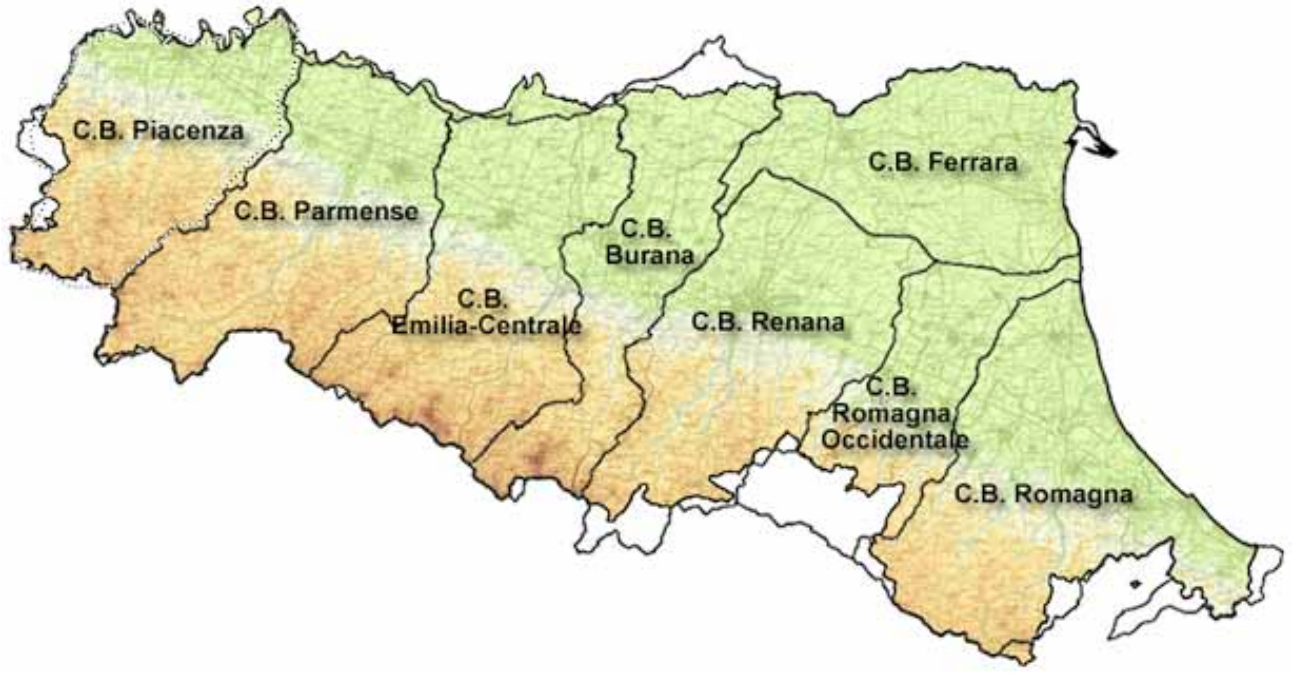


Figura 390 - Delimitazione dei comprensori di bonifica e irrigazione in Emilia Romagna a seguito della L.R. n. 5/2009

Per la Regione Veneto, nel territorio regionale sono attivi 10 Consorzi di bonifica di primo grado, istituiti in applicazione alla legge regionale 12/2009, assieme a un solo consorzio di 2° grado, aventi funzioni prevalentemente irrigue.



Figura 391 - Delimitazione dei consorzi di bonifica e irrigazione nella Regione Veneto a seguito della L.R. 12/2009

Nel settore ricadente nel bacino del Po sono presenti il Consorzio di bonifica dell'Adige Po e il Consorzio di bonifica del Delta Po.

Ai fini dello studio in oggetto i Consorzi rappresentano gli interlocutori privilegiati in ordine sia al fatto che costituiscono i soggetti che detengono le migliori, più aggiornate e dettagliate conoscenze sul sistema di drenaggio presente lungo la pianura adiacente all'alveo del Po e sui sistemi di derivazione idrica a fini irrigui dallo stesso alveo del Po, nella loro qualità di gestori di entrambi i sistemi.

Rispetto all'insieme dei Consorzi presenti sull'intera pianura, sono stati quindi selezionati quelli nel cui territorio di competenza ricadono le porzioni di territorio (Figura 392) che sono potenzialmente interessate a diverso titolo dalle ipotesi di intervento per il nuovo assetto dell'alveo di magra del fiume Po.

Tali consorzi sono i seguenti:

1) Consorzio Bonifica Muzza-Bassa Lodigiana (Regione Lombardia)
2) Consorzio di Bonifica Dugali Naviglio Adda Serio (Regione Lombardia)
3) Consorzio di Bonifica Navarolo Agro Cremonese Mantovano (Regione Lombardia)
4) Consorzio di Bonifica Territori del Mincio (Regione Lombardia - Regione Veneto)
5) Consorzio di Bonifica Terre dei Gonzaga in Destra Po (Regione Lombardia – Regione Emilia Romagna)
6) Consorzio di Bonifica di Piacenza (Regione Emilia Romagna)
7) Consorzio Bonifica Parmense (Regione Emilia Romagna)
8) Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale (Regione Emilia Romagna)
9) Consorzio della Bonifica Burana (Regione Emilia Romagna- Regione Toscana – Regione Lombardia)
10) Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara (Regione Emilia Romagna)
11) Consorzio di Bonifica Adige-Po (Regione Veneto)
12) Consorzio di Bonifica Delta del Po (Regione Veneto)

Nelle aree golenali sono inoltre presenti:

- Consorzio di Miglioramento Fondiario Ronchi di Soarza e San Giuliano (PC), con un comprensorio di circa 640 ha di "fondi alluvionali" sorgenti presso il fiume Po nella località di San Giuliano (PC), a partire dall'argine di rigurgito del Cavo Morta nel luogo detto Le Torri;

- Distretto Po morto – Digagnola, con un comprensorio di 607 ha circa situati interamente in zona golenale in Comune di San Benedetto Po (MN) e ricompresa tra il corso del fiume Po e l'argine maestro a sud del medesimo (da Portiolo a Gorgo circa), in autonomia gestionale e amministrativa rispetto al Consorzio di bonifica Terre dei Gonzaga in destra Po.

Dal punto di vista conoscitivo, alle strutture tecniche dei Consorzi sono state richieste informazioni di dettaglio, ove disponibili, indispensabili a valutare gli effetti degli interventi di regimazione dell'alveo in progetto sul reticolo di bonifica, sulle derivazioni irrigue e sulle condizioni della falda freatica superficiale. Allo scopo è stata redatta un'apposita scheda con l'obiettivo di costruire un quadro conoscitivo di dettaglio sugli aspetti riguardanti la gestione delle derivazione irrigue dal fiume Po, della rete di bonifica e dell'interferenza con la falda idrica superficiale, evidenziando le potenziali criticità con gli scenari di progetto di regimazione del fiume Po.

Le informazioni raccolte hanno riguardato:

- derivazioni ad uso irriguo dal fiume Po: caratteristiche principali delle opere di derivazione e portate concesse;
- reti di bonifica a scolo naturale e meccanico che sversano direttamente nel fiume Po;
- opere di captazione delle acque sotterranee ad uso irriguo, entro una fascia di 10 km dal fiume Po;
- presenza e/o progettazione di bacini di accumulo ad uso irriguo, bacinizzazione dei canali principali di bonifica, aree umide interferenti con la falda superficiale, entro una fascia di 10 km dal fiume Po.

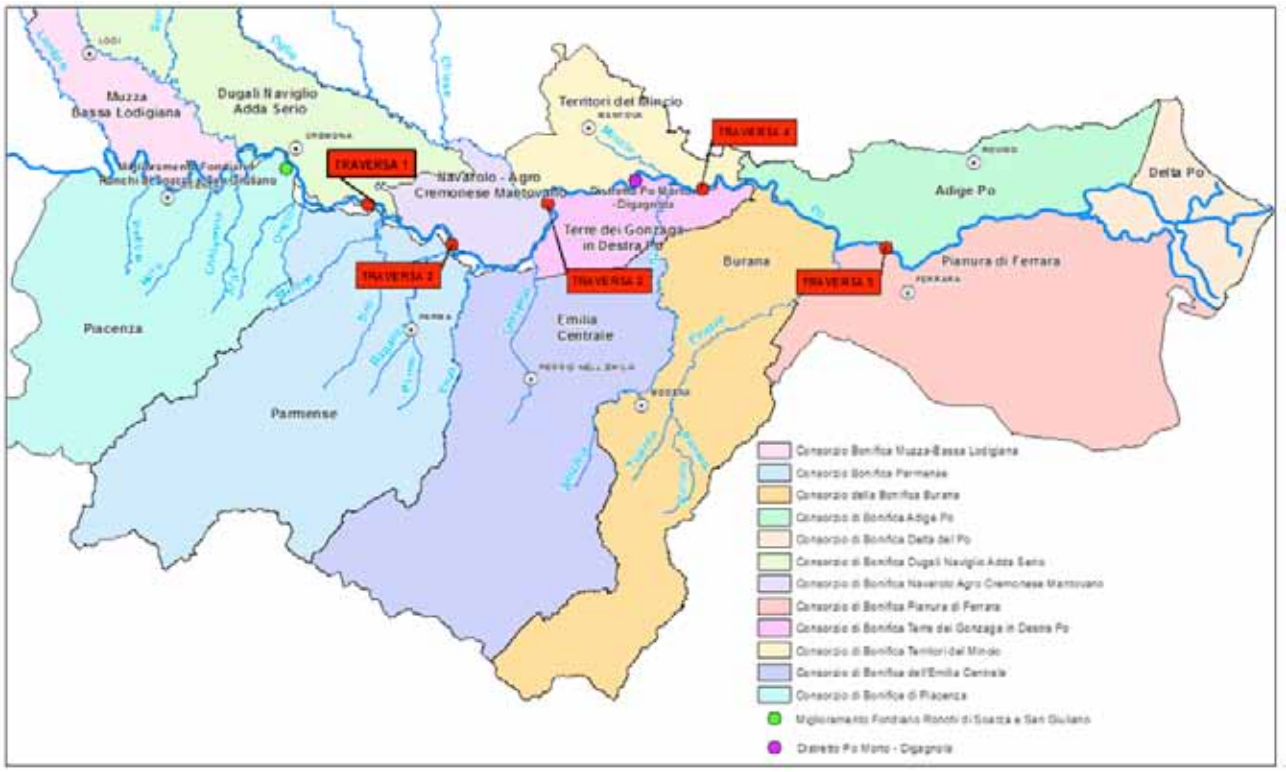


Figura 392 - Delimitazione delle aree di competenza dei Consorzi di Bonifica rivieraschi al fiume Po e localizzazione delle traverse di regimazione

Gli stessi Enti sono stati successivamente considerati interlocutori di riferimento per discutere i risultati delle valutazioni svolte e le scelte sulle possibili azioni di mitigazione eventualmente necessarie.

Sulla base di quanto emerso dal quadro conoscitivo sono state considerate e analizzate le interazioni tra il progetto di regimazione (scenario a 5 traverse di regolazione) e il sistema di derivazione irrigua e di bonifica, relativamente alle prese e agli scarichi diretti nel fiume e ai tratti terminali dei principali affluenti.

Le interferenze tra i livelli di regolazione previsti nel progetto di regimazione tramite le 5 traverse di sostegno dei livelli idrici di magra e le quote degli scarichi dei reticoli di bonifica sono state esaminate anche con riferimento all'estensione degli eventuali profili di rigurgito sugli affluenti principali e alle possibili interferenze lungo i tratti terminali di tali reticoli.

Nell'ipotesi di regolazione a corrente libera le variazioni indotte sul livello idrometrico non sono rilevanti e quindi non lo sono neanche gli effetti attesi sulle opere di presa e scarico rispetto alla situazione attuale. La regolazione a corrente libera non determina infatti variazioni significative sul regime idrometrico del fiume.

Le opere di regolazione a corrente libera nel tratto confluenza Mincio-Po di Goro si rifanno alle tipologie già utilizzate negli interventi effettuati da AIPO nel tratto da Cremona a confluenza Mincio, dove le opere di sistemazione sono quasi completate, il tracciato del fiume è già stabilizzato.

Naturalmente la presenza o meno di eventuali criticità di scolo è qui esaminata con riferimento ai soli regimi di magra-morbida del fiume Po ricadenti nell'intervallo di regolazione delle traverse, nel quale si risente l'innalzamento del profilo di pelo libero indotto dalle quote di regolazione delle cinque traverse.

Per valori maggiori della portata di regolazione delle traverse, le paratoie verranno completamente aperte, in modo da consentire il libero deflusso; il profilo di pelo libero torna a coincidere con quello relativo allo stato attuale, senza alcuna necessità di modifica delle regole di gestione degli scoli (chiusura delle chiaviche ed innesto dei gruppi idrovori, laddove esistenti).

In altri termini, poiché già oggi tutti gli scoli dei reticoli di bonifica nella parte bassa sono attrezzati con chiaviche e gruppi idrovori atti a fronteggiare i livelli di morbida-piena del Po, l'innalzamento indotto dalle quote di regolazione delle cinque traverse nei periodi di portata di magra dovrebbe unicamente richiedere l'estensione della durata di chiusura delle chiaviche e di funzionamento delle idrovore, e in alcuni limitati casi, adeguamenti impiantistici.

Nell'Allegato 1 è riportata la cartografia delle principali opere consortili interferenti con il progetto di regimazione e di seguito descritte nel dettaglio.

Interferenze a monte della Traversa 1

La Traversa 1 è ubicata alla progressiva chilometrica 401 e ricade nei territori comunali di Motta Baluffi (CR) e Roccabianca (PR).

Il tratto rivierasco a monte della traversa lungo la sponda sinistra è di competenza del Consorzio di Bonifica Dugali - Naviglio Adda Serio e del Consorzio di Bonifica Navarolo - Agro Cremonese Mantovano, mentre in sponda destra la competenza riguarda il Consorzio di Bonifica di Piacenza e il Consorzio di Bonifica Parmense.

Il livello massimo di regolazione è posto a quota di 30,00 m s.m., con una portata di regolazione di 1.200 m^3/s oltre la quale le paratoie vengono completamente aperte, ripristinando il profilo idrico attuale.

COMUNI	PROGRESSIVA [km]	LIVELLO MASSIMO DI REGOLAZIONE (Quota in m s.m.)	PORTATA MASSIMA DI REGOLAZIONE (m^3/s)
Motta Baluffi (CR) – Roccabianca (PR)	401	30,0	1.500

Tabella 137 - Traversa 1: livello e portata di regolazione

Per le opere di derivazione e scolo in sinistra idrografica procedendo da monte verso valle si hanno le interferenze indicate nel seguito.

Opera di derivazione irrigua

CONSORZIO	Dugali Naviglio Adda Serio					
NOME	Impianto di Foce Morbasco					
LOCALITÀ	Gerre de' Caprioli - Fraz. Bosco ex Parmigiano					
NOME BACINO IDRAULICO SERVITO	Bacino Foce Morbasco					
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km^2)	150					
PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)	12.000					
OPERA DI DERIVAZIONE	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO			
	Portata massima (l/s)	Quota minima (m s.m.)	Impianto di sollevamento Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)	Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento	
					Da mese	a mese
		39,00	12.000	13,00	Maggio	Settembre

Opera di scolo

CONSORZIO	Dugali Naviglio Adda Serio			
NOME	Fossadone			
LOCALITÀ	Stagno Lombardo - Località Antenna			
BACINO IDRAULICO DRENATO				
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	30			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	31,00 all'uscita chiavica; 27,00 a confl. Po	H =2,00 L =3,00		

Opera di scolo

CONSORZIO	Dugali Naviglio Adda Serio

NOME	Dosolo-Pozzolo			
LOCALITÀ	San Daniele Po			
BACINO IDRAULICO DRENATO				
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	13,12			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	31,00	H =3,00 L =2,50		

Opera di derivazione irrigua

CONSORZIO	Navarolo Agro Cremonese Mantovano					
NOME	Impianto di Isola Pescaroli					
LOCALITÀ	Isola Pescaroli in comune di San Daniele Po					
NOME BACINO IDRAULICO SERVITO	Zona bassa cremonese in sinistra Po.					
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km^2)	Gli impianti irrigui che derivano direttamente dal fiume Po di Isola Pescaroli e Casalmaggiore posti il primo a monte del secondo, sono collegati idraulicamente dal canale irriguo principale che nasce a valle dell'impianto di Isola Pescaroli (CR) e scende parallelamente all'argine in sx del fiume Po sino a Casalmaggiore (CR), dove raccoglie anche l'acqua dell'impianto di Casalmaggiore (CR) e prosegue sino al comune di Pomponesco (MN); i due impianti servono complessivamente un territorio di circa 225 km2.					
PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)	81					
OPERA DI DERIVAZIONE	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO			
	Portata massima (l/s)	Quota minima (m s.m.)	Impianto di sollevamento Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)	Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento	
					Da mese	a mese
		22,17	8.300	10,50	Aprile	Settembre

Per le opere di derivazione e scolo in destra idrografica, procedendo da monte verso valle, si hanno le seguenti indicate nel seguito.

Opera di scolo

CONSORZIO	Miglioramento Fondiario Ronchi di Soarza e San Giuliano			
NOME	Ronchi di Soarza			
LOCALITÀ	San Giuliano (PC)			
BACINO IDRAULICO DRENATO				
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)				
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	36,00	H = L =		

Opera di scolo

CONSORZIO	Bonifica di Piacenza			
NOME	Chiavica di Soarza			
LOCALITÀ	Soarza in comune di Villanova sull'Arda (PC)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Monte della via Emilia fino al Po			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	250			
TIPOLOGIA DI SCOLO ATTUALMENTE A GRAVITÀ MA È PREVISTA LA REALIZZAZIONE DI UN NUOVO IMPIANTO DI SOLLEVAMENTO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	30,05	H = L =		

Opera di scolo

CONSORZIO	Bonifica di Piacenza			
NOME	Chiavica Arda Vecchia			
LOCALITÀ	Soarza in comune di Villanova sull'Arda (PC)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Area compresa tra Arda, chiavica e una parte a monte della ferrovia			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	5,0			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	31,5*	H = L =		

**Quota di scarico dedotta da rilievo Lidar 1x1 m*

Opera di derivazione irrigua

CONSORZIO	Bonifica Parmense					
NOME	Impianto Ongina (Pre-sollevamento e Ongina Centrale)					
LOCALITÀ	Confluenza T.Ongina nel fiume Po					
NOME BACINO IDRAULICO SERVITO	Ongina					
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km^2)	116,5					
PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)	3.300					
OPERA DI DERIVAZIONE	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO			
	Portata massima (l/s)	Quota minima (m s.m.)	Impianto di sollevamento Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)	Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento	
					Da mese	a mese
		26,4*	3.300	10,50	Aprile	Settembre

**Quota di presa dedotta da rilievo Lidar 1x1 m*

Opera di scolo

CONSORZIO	Bonifica Parmense (Chiavica di proprietà AIPO)			
NOME	Fossadone Vidalenzo - Chiavica di Santa Franca			
LOCALITÀ	Vidalenzo			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Fossadone Vidalenzo			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	0,78			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	34,0*	H = L =		

**Quota di scarico dedotta da rilievo Lidar 1x1 m*

Opera di scolo

CONSORZIO	Bonifica Parmense (Chiavica di proprietà AIPO)			
NOME	Cavo Picchetta			
LOCALITÀ	Ardella			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Cavo Picchetta			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	0,55			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	33,4*	H = L =		

Opera di scolo

CONSORZIO	Bonifica Parmense (Chiavica di proprietà AIPO)			
NOME	Cavo Ardella			
LOCALITÀ	Ardella			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Cavo Ardella Rodella Valle			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	7,63			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	33,0*	H = L =	3.300	

Opera di scolo

CONSORZIO	Bonifica Parmense (Chiavica di proprietà AIPO)			
NOME	Canale di Busseto			
LOCALITÀ	Polesine Parmense (PR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Canale di Busseto			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	0,18			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	32,4*	H = L =		

**Quota di scarico dedotta da rilievo Lidar 1x1 m*

Opera di scolo

CONSORZIO	Bonifica Parmense (Chiavica di proprietà AIPO)			
NOME	Diversivo Canale di Busseto			
LOCALITÀ	Zibello (PR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Canale di Busseto			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	0,67			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	32,0*	H = L =		

**Quota di scarico dedotta da rilievo Lidar 1x1 m*

Opera di scolo

CONSORZIO	Bonifica Parmense (Chiavica di proprietà AIPO)			
NOME	Cocchino – Galline – Pioppe Nord			
LOCALITÀ	Carpaneto di Pieveottoville (PR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Cavi Carpaneto e Brandolese			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	5,20			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	30,00*	H = L =		

**Quota di scarico dedotta da rilievo Lidar 1x1 m*

Per verificare l'interferenza delle opere descritte si è fatto riferimento alla ricostruzione da modello idraulico dei livelli idrometrici a monte delle traverse.

Nella Tabella 138, di sintesi per la traversa 1, si riportano le quote di scarico delle chiaviche e i livelli idrometrici del fiume Po non regolati e regolati per portate di 1.500 e 2.000 m3/s lungo la sponda sinistra.

Risulta come la regimazione favorisca i prelievi irrigui degli impianti di Foce Morbasco e soprattutto di Isola Pescaroli con innalzamento del livello idrometrico di circa 3 m. Per la rete di scolo si evidenzia che il canale Fossadone è munito di una chiavica in corrispondenza dell'argine maestro, con una quota dello zero di bonifica pari a circa 31,00 m s.m., che è pari al livello indotto dalla regolazione della traversa con portata di 2.000 m^3/s e H=30,66 m s.m., generando un effetto di rigurgito del canale nell'area golenale a valle della chiavica di regolazione lungo l'argine maestro.

OPERA	TIPO OPERA	QUOTA MINIMA SCARICO M S.M.	SEZ. RILIEVO AIPO	PORTATA m^3/s	LIVELLO NON REGOLATO m s.m.	LIVELLO REGOLATO m s.m.
Impianto idrovoro di Foce Morbasco	Derivazione irrigua	39,00	SCR21	1.500	29,38	30,86
				2.000	30,37	31,35
Fossadone – Stagno Lombardo Loc. Antenna	Scolo a gravità	31,00 all'uscita chiavica; 27,00 a confl. Po	S28	1.500	28,0	30,40
				2000	29,1	30,66
Dosolo-Pozzolo	Scolo a gravità	31,00	S30	1.500	26,7	30,05
				2.000	27,7	30,08
Impianto idrovoro di Isola Pescaroli	Derivazione irrigua	22,17	S30	1.500	26,7	30,05
				2.000	27,7	30,08

Tabella 138 - Opere di derivazione irrigua e scolo in sponda sinistra e livello idrico regolato in corrispondenza delle stesse per effetto della Traversa 1

Nella Tabella 139 di sintesi sono riportate le quote di scarico delle opere consortili e i livelli idrometrici non regolati/regolati del fiume Po in sponda destra.

OPERA	TIPO OPERA	QUOTA MINIMA SCARICO M S.M.	SEZ. RILIEVO AIPO	PORTATA m^3/s	LIVELLO NON REGOLATO m s.m.	LIVELLO REGOLATO m s.m.
Ronchi di Soarza e San Giuliano	Scolo a gravità	36,00 all'uscita chiavica; 30,0 a confl. C. A. Morta in Po	S27B	1.500	29,13	30,50
				2.000	30,12	30,82
Chiavica di Soarza	Scolo a gravità	30,05	S27A	1.500	28,39	30,50
				2000	29,37	30,82
Chiavica Arda Vecchia	Scolo a gravità	31,50	S27A	1.500	28,39	30,50
				2.000	29,37	30,82
Impianto Ongina (pre-sollevamento e Ongina Centrale)	Derivazione irrigua	26,40	S27C	1.500	28,34	30,48
				2.000	29,35	30,79
Fossadone Vidalenzo - Chiavica di Santa Franca	Scolo a gravità	34,00	S27C	1.500	28,34	30,48
				2.000	29,35	30,79
Cavo Picchetta	Scolo a gravità	33,40	S28	1.500	28,05	30,40
				2.000	29,10	30,66
Cavo Ardella	Scolo a gravità e sollevamento meccanico Corsetto	33,0	S28	1.500	28,05	30,40
				2.000	29,10	30,66
Canale di Busseto	Scolo a gravità	32,40	S28bis	1.500	27,88	30,35
				2.000	28,94	30,39
Diversivo Canale di Busseto	Scolo a gravità	32,00 all'uscita chiavica; 29,70 immissione in Po a valle Traversa 1	S32	1.500	26,14	26,17
				2.000	27,10	26,92
Scolo Travacone	Scolo a gravità	30,05 all'uscita chiavica; 29,70 immissione in Po a valle Traversa 1	S31	1.500	26,14	26,47
				2.000	27,10	27,27
Cocchino – Galline – Pioppe Nord	Scolo a gravità	30,00 all'uscita chiavica; 29,70 immissione in Po a valle Traversa 1	S31	1.500	26,14	26,47
				2.000	27,10	27,27

Tabella 139 - Opere di derivazione irrigua e scolo in sponda destra e livello idrico regolato in corrispondenza delle stesse per effetto della Traversa 1

Dall'analisi delle quote di scarico delle opere consortili in sponda destra le maggiori interferenze si hanno per gli scoli lungo l'Arda Vecchia. In particolare le chiaviche Ronchi di Soarza, Soarza e Arda Vecchia scaricano per gravità nell'Arda Morta, che confluisce nel Po all'altezza della sezione di rilievo AIPO S27B.

Attualmente la chiavica di Soarza viene chiusa quando il livello del Po è pari a circa 32,2 m s.m. . Tale valore è superiore al livello indotto dalla regolazione della traversa n. 1, anche in corrispondenza della portata Q=2.000 m3/s con H=30,82 m s.m.). Il Consorzio di Bonifica di Piacenza, segnala che è previsto un nuovo impianto di sollevamento per attrezzare la chiavica di Soarza e permettere lo scarico in Po.

L'impianto idrovoro Ongina (pre-sollevamento della presa dal Po) è favorito dall'innalzamento di circa 2 m del livello idrometrico per effetto della traversa.

L'effetto di rigurgito lungo i torrenti Arda e Ongina può influenzare la quota di immissione dei canali di bonifica in gestione al Consorzio di Bonifica di Piacenza. In Ongina si hanno gli scarichi dei canali: Stallone, Stradelli, Casello, Castellazzo, Rodella e Stanga. In Arda scaricano i canali Piantadoro Canalone e Allacciante Acque Alte.

Per le opere di scolo a valle dell'Ongina, ricadenti nel comprensorio di Bonifica Parmense, si segnala che le opere di scolo Travacone (C.Ardorella), Cocchino – Galline – Pioppe Nord (Cavi Carpaneto e Brandolese) scaricano nel Diversivo Canale di Bussetto che confluisce nel fiume Po a valle della Traversa 1 in località Stagno, e quindi sono condizionati dai livelli di regolazione della traversa 2, ubicata più a valle, in località Roccabianca (PR).

Interferenze a monte della Traversa 2

La Traversa 2 è ubicata alla progressiva chilometrica 427 e ricade nei territori comunali di Motta Baluffi (CR) e Roccabianca (PR). Il tratto a monte della traversa lungo la sponda sinistra è di competenza in parte del Consorzio Dugali Naviglio Adda Serio e in gran parte del Consorzio di Bonifica Navarolo - Agro Cremonese Mantovano, mentre in sponda destra la competenza è del Consorzio di Bonifica Parmense.

Il livello di regolazione è posto a quota di 24,20 m s.m., con una portata di regolazione di 1.500 m3/s oltre la quale le paratoie sono completamente aperte in modo da ristabilire il profilo idrico indisturbato.

COMUNI	PROGRESSIVA [km]	LIVELLO MASSIMO DI REGOLAZIONE (Quota in m s.m.)	PORTATA MASSIMA DI REGOLAZIONE (m^3/s)
Casalmaggiore (CR) – Mezzani (PR)	427	24,20	1.500

Tabella 140 - Traversa 2: livello e portata di regolazione

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Dugali Naviglio Adda Serio			
NOME	Scolo Cona-Ciottone			
LOCALITÀ	Motta Baluffi (CR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO				
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	7,89			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	26,00	H =1,30 L =2,00		

Opera di scolo

CONSORZIO	Navarolo Agro Cremonese Mantovano			
NOME	Chiavica Beretta – Scolo Riolo			
LOCALITÀ	Gussola (CR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Riolo			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	17			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	25,10	H =3,00 L =2,50		

Opera di derivazione irrigua

CONSORZIO	Navarolo Agro Cremonese Mantovano					
NOME	Impianto idrovoro di Casalmaggiore					
LOCALITÀ	Casalasco Viadanese (MN)					
NOME BACINO IDRAULICO SERVITO	Gli impianti irrigui che derivano direttamente dal fiume Po di Isola Pescaroli e Casalmaggiore posti il primo a monte del secondo, sono collegati idraulicamente dal canale irriguo principale che nasce a valle dell'impianto di Isola Pescaroli (CR) e scende parallelamente all'argine in sx del fiume Po sino a Casalmaggiore (CR), dove raccoglie anche l'acqua dell'impianto di Casalmaggiore (CR) e prosegue sino al comune di Pomponesco (MN); i due impianti servono complessivamente un territorio di circa 225 km2.					
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km²)	144					
PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)	10.000					
OPERA DI DERIVAZIONE	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO			
	Portata massima (l/s)	Quota minima (m s.m.)	Impianto di sollevamento Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)	Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento	
					Da mese	a mese
		18,00	9.000	7,80	Aprile	Settembre

Per le opere di derivazione e scolo in destra idrografica procedendo da monte verso lo sbarramento si hanno le seguenti interferenze.

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Bonifica Parmense			
NOME	Cavo Vignoli			
LOCALITÀ	Fossa di Roccabianca (PR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Cavi di Roccabianca			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	2,59			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	29,00*	H = L =		

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Bonifica Parmense			
NOME	Cavo Ramelli			
LOCALITÀ	Fossa di Roccabianca (PR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Tarazzi e Ramelli			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	4,65			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	29,50*	H = L =		

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Bonifica Parmense			
NOME	Cavo Traversante			
LOCALITÀ	Torricella (PR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Cavo Traversante			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	3,06 (scarico alternativo a Cavo Comune)			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	27,00*	H = L =		

**Quota di scarico dedotta da rilievo Lidar 1x1 m*

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Bonifica Parmense			
NOME	Cavo Comune			
LOCALITÀ	Coltaro (PR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Cavo Comune			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	27,49 (compreso bacino cavo Traversante)			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	26,50*	H = L =		

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Bonifica Parmense			
NOME	Cavo Milanino			
LOCALITÀ	Coltaro (PR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Cavo Milanino			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	21,63			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	26,50*	H = L =		

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Bonifica Parmense			
NOME	Cavo Và e vieni			
LOCALITÀ	Sanguigna (PR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Cavo Và e vieni			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	0,97			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	25,50*	H = L =		

**Quota di scarico dedotta da rilievo Lidar 1x1 m*

OPERA	TIPO OPERA	QUOTA MINIMA SCARICO M S.M.	SEZ. RILIEVO AIPO	PORTATA m^3/s	LIVELLO NON REGOLATO m s.m.	LIVELLO REGOLATO m s.m.
Scolo Cona-Ciottone	Scolo a gravità	26,00	Sez. 33	1.500	25,28	25,82
				2.000	26,23	26,51
Chiavica Beretta – Scolo Riolo	Scolo a gravità	25,10	Sez. 33C	1.500	23,67	24,84
				2000	24,59	25,23
Impianto idrovoro di Casalmaggiore	Derivazione irrigua	18,00	Sez. 35B	1.500	22,29	24,32
				2.000	23,30	24,40

Tabella 141 - Opere di derivazione irrigua e scolo in sponda sinistra e livello idrico regolato in corrispondenza delle stesse per effetto della Traversa 2

Dall'analisi delle interferenze delle opere di regolazione consortili in sponda sinistra le maggiori criticità si hanno per lo scolo Cona-Ciottone, dove il livello regolato raggiunge la quota minima di scarico, e per lo scolo Riolo, dove la quota della chiavica Beretta posta nell'argine golenale è raggiunta dal livello regolato per la portata di 1.500 m3/s.

Per l'impianto idrovoro di derivazione irrigua di Casalmaggiore si ha invece un innalzamento di circa 2 m rispetto al livello non regolato, che favorisce il prelievo idrico nei periodi di magra.

Nella Tabella 142 sono riportate le quote di scarico delle opere consortili in sponda destra con i livelli non regolato/regolato della traversa 2.

OPERA	TIPO OPERA	QUOTA MINIMA SCARICO M S.M.	SEZ. RILIEVO AIPO	PORTATA m^3/s	LIVELLO NON REGOLATO m s.m.	LIVELLO REGOLATO m s.m.
Cavo Vignoli	Scolo a gravità	29,00	Sez. 32A	1.500	25,45	25,94
				2.000	26,38	26,65
Cavo Ramelli	Scolo a gravità	29,50	Sez. 32A	1.500	25,45	25,94
				2000	26,38	26,65
Cavo Traversante	Scolo a gravità	27,00	Sez. 33A	1.500	24,71	25,42
				2.000	25,63	26,01
Cavo Comune	Scolo a gravità	26,50	Sez. 34	1.500	23,32	24,69
				2.000	24,28	24,99
Cavo Milanino	Scolo a gravità	26,50	Sez. 34	1.500	23,32	24,69
				2.000	24,28	24,99
Cavo Và e vieni	Scolo a gravità	25,50	Sez. 34	1.500	23,32	24,69
				2.000	24,28	24,99

Tabella 142 - Opere di derivazione irrigua e scolo in sponda destra e livello idrico regolato in corrispondenza delle stesse per effetto della Traversa 2

Dall'analisi delle interferenze delle opere di regolazione consortili in sponda destra le quote del livello regolato sono sempre inferiori alla quota minima di scarico della rete di scolo.

Per quanto riguarda le confluenze del fiume Taro e del torrente Parma si evidenzia che:

- nel fiume Taro confluisce il Cavo Ramelli (quota di fondo del canale nei pressi della chiavica dell'argine maestro pari a circa 28,0 m s.m.), oltre ad altri canali il cui recapito è posto ad alcuni chilometri a monte rispetto alla confluenza del Taro con il Po, quindi a quote maggiori;
- gli scoli del Cavo Comune, Milanino e Và e Vieni scaricano nella Fossetta Sissa-Abate che confluisce nel fiume Po più a valle, in località Sacca all'altezza della Sez. 34 AIPO;
- nel torrente Parma, alcuni chilometri a monte della confluenza con il Po, confluiscono i seguenti canali: Cavo Fosso Nuovo (quota di fondo del canale nei pressi della chiavica dell'argine maestro pari a circa 24,5 m s.m.), Cavo Casarola (quota di fondo della soglia della chiavica dell'argine maestro pari a circa 23,9 m s.m. e quota dello "zero" di bonifica pari a 25 m s.m.), Naviglio (quota di fondo della platea della vasca dell'impianto idrovoro pari a 23 m s.m. e quota dello "zero" di bonifica pari a circa 28 m s.m.), Fossetta Bassa (quota di fondo della platea della vasca dell'impianto idrovoro pari a 25,9 m s.m. e quota dello "zero" di bonifica pari a circa 27,9 m s.m.). L'ubicazione della traversa 2 a monte della confluenza con il torrente Parma non influisce con le opere presenti lungo l'affluente.

Interferenze a monte della Traversa 3

La Traversa 3 è ubicata alla progressiva chilometrica 461 e ricade nei territori comunali di Viadana (MN) e Suzzara (MN) a monte della confluenza del fiume Oglio.

Il tratto a monte della traversa lungo la sponda sinistra è di competenza del Consorzio di Bonifica Navarolo-Agro Cremonese Mantovano, mentre in sponda destra la competenza riguarda il Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale e il Consorzio di Bonifica delle Terre di Gonzaga in Destra Po.

Il livello massimo di regolazione è posto a quota di 19,00 m s.m., con una portata di regolazione di 1.500 m3/s, oltre la quale le paratoie sono completamente aperte in modo da ripristinare il profilo idrico naturale.

COMUNI	PROGRESSIVA [km]	LIVELLO MASSIMO DI REGOLAZIONE (Quota in m s.m.)	PORTATA MASSIMA DI REGOLAZIONE (m^3/s)
Viadana (MN) – Suzzara (MN)	461	19,00	1.500

Tabella 143 - Traversa 3: livello e portata di regolazione

Lungo la sponda sinistra la rete scolante gestita dal Consorzio di Bonifica Navarolo - Agro Cremonese Mantovano drena le acque verso l'impianto di San Matteo delle Chiaviche che scarica nel fiume Oglio, appena a monte della confluenza con il fiume Po, attraverso tre canali principali (Navarolo, Ceriana e Fossolo). L'impianto è munito di idrovore. Non vi sono pertanto interferenze tra profilo regolato e rete scolante.

Per le opere di derivazione e scolo in destra procedendo da monte verso valle si hanno le seguenti interferenze.

Opera di scolo

CONSORZIO	Bonifica Parmense			
NOME	Impianto idrovoro Chiavica Rossa – Mezzano Rondani nel T. Parma			
LOCALITÀ	Mezzano Rondani (Colorno, PR)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Sacca			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	16			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	23,90 in sx T. Parma	H = L =		

Opera di scolo

CONSORZIO	Bonifica Parmense			
NOME	Impianto idrovoro Bocca d'Enza			
LOCALITÀ	Bocca d'Enza			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Mezzani			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	39,98			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	22,40 in sx T. Enza	H = L =		

Opera di scolo

CONSORZIO	Emilia Centrale			
NOME	Canalazzo Brescello			
LOCALITÀ	Ghiarole di Brescello			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Canalazzo Brescello			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	70			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	24,00 in dx T. Enza	H =4,0 L =2,5X2		

Opera di derivazione irrigua

<table>
<tr><td>CONSORZIO</td><td colspan="6">Emilia Centrale – Terre dei Gonzaga in Destra Po</td></tr>
<tr><td>NOME</td><td colspan="6">Impianto idrovoro di Boretto</td></tr>
<tr><td>LOCALITÀ</td><td colspan="6">S. Croce di Boretto (RE)</td></tr>
<tr><td>NOME BACINO IDRAULICO SERVITO</td><td colspan="6"></td></tr>
<tr><td>SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km²)</td><td colspan="6">447,11 per dx e sx Secchia del Consorzio di Bonifica Terre dei Gonzaga in Destra Po</td></tr>
<tr><td>PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)</td><td colspan="6">60.000 (Prelievo max: 20 m3/s ; 14 m3/s Emilia Centrale per bacino AMR + 6 m3/s Terre dei Gonzaga in Destra Po per bacino Revere)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">OPERA DI DERIVAZIONE</td><td colspan="2">20.000 per Terre dei Gonzaga in Destra Po</td><td colspan="4">SOLLEVAMENTO MECCANICO</td></tr>
<tr><td>Portata massima (l/s)</td><td>Quota minima (m s.m.)</td><td>Impianto di sollevamento Portata (l/s)</td><td>Altezza massima sollevamento (m)</td><td colspan="2">Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento</td></tr>
<tr><td>60.000</td><td>19,80</td><td>60.000</td><td>7,00</td><td>Da mese
Aprile</td><td>a mese
Settembre</td></tr>
</table>

Opera di scolo

<table>
<tr><td>CONSORZIO</td><td colspan="4">Emilia Centrale</td></tr>
<tr><td>NOME</td><td colspan="4">Boretto scolo</td></tr>
<tr><td>LOCALITÀ</td><td colspan="4">S. Croce di Boretto (RE)</td></tr>
<tr><td>BACINO IDRAULICO DRENATO</td><td colspan="4">Canale Derivatore</td></tr>
<tr><td>SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)</td><td colspan="4">100</td></tr>
<tr><td rowspan="3">TIPOLOGIA DI SCOLO</td><td colspan="2">A GRAVITÀ</td><td colspan="2">SOLLEVAMENTO MECCANICO</td></tr>
<tr><td>Quota minima di scarico (m s.m.)</td><td>Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)</td><td>Portata (l/s)</td><td>Altezza massima sollevamento (m)</td></tr>
<tr><td>18,50 quota minima interna del canale di bonifica. Con quota Po superiore a 19,50-20,00 non è possibile scaricare a gravità in quanto la massima quota nel canale può essere circa 20,50-21,00</td><td>2 luci di
H =5,0
L =4,1</td><td>22.500</td><td>5,00
(con quota Po superiore a 25,00 l'idrovoro viene messo fuori servizio e pertanto per quote superiori del fiume Po non è possibile scaricare)</td></tr>
</table>

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Emilia Centrale			
NOME	Torrione (in T. Crostolo)			
LOCALITÀ	Torrioni di Gualtieri (RE)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Bonifica Meccanica			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	60			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	19,50	H = L =	18.000	11,50

Per verificare l'interferenza delle opere descritte si è fatto riferimento alla ricostruzione da modello idraulico dei livelli idrometrici a monte delle traverse fornite dal Servizio 1.

Nella Tabella 144 di sintesi si riportano le opere interferenti con le relative quote di scarico e i livelli idrici non regolato/regolato lungo la sponda destra.

OPERA	TIPO OPERA	QUOTA MINIMA SCARICO M S.M.	SEZ. RILIEVO AIPO	PORTATA m^3/s	LIVELLO NON REGOLATO m s.m.	LIVELLO REGOLATO m s.m.
Impianto idrovoro Chiavica Rossa T. Parma	Scolo a sollevamento meccanico	23,90 in T. Parma	Sez. 35D	1.500	21,48	21,77
				2.000	22,49	22,67
Impianto idrovoro di Mezzani a Bocca d'Enza	Scolo a sollevamento meccanico	22,40 in T. Enza	Sez. 36A	1.500	20,35	20,89
				2.000	21,35	21,65
Canalazzo Brescello in dx T. Enza	Scolo a gravità	24,00	Sez. 36A	1.500	20,35	20,89
				2.000	21,35	21,65
Boretto scolo	Scolo a gravità	19,50	Sez. 37A	1.500	19,90	20,57
				2000	20,90	21,29
Impianto idrovoro di Boretto	Derivazione irrigua	19,80	Sez. 37A	1.500	19,90	20,57
				2.000	20,90	21,29
Torrione (in T. Crostolo)	Scolo a sollevamento meccanico	19,50	Sez. 38C	1.500	18,90	19,94
				2.000	19,84	20,45

Tabella 144 - Opere di derivazione irrigua e scolo in sponda destra e livello idrico regolato in corrispondenza delle stesse per effetto della Traversa 3

Dall'analisi delle interferenze con le opere consortili in sponda destra, si osserva che le variazioni indotte dalla traversa sui profili idrici sono minime e non hanno pertanto influenza sul funzionamento della rete di scolo.

Per quanto riguarda le aree di confluenza dei torrenti Parma, Enza e Crostolo si evidenzia che:

- nel torrente Parma, alcuni chilometri a monte della confluenza con il Po, confluiscono i seguenti canali: Cavo Fosso Nuovo (quota di fondo del canale nei pressi della chiavica dell'argine maestro pari a circa 24,5 m s.m.), Cavo Casarola (quota di fondo della soglia della chiavica dell'argine maestro pari a circa 23,9 m s.m. e quota dello "zero" di bonifica pari a 25 m s.m.), Naviglio (quota di fondo della platea della vasca dell'impianto idrovoro pari a 23 m s.m. e quota dello "zero" di bonifica pari a circa 28 m s.m.), Fossetta Bassa (quota di fondo della platea della vasca dell'impianto idrovoro pari a 25,9 m s.m. e quota dello "zero" di bonifica pari a circa 27,9 m s.m.). L'ubicazione della traversa 3 non influisce sulle opere sopra indicate;
- nel torrente Enza confluiscono i seguenti canali: Colatore Parmetta (quota di fondo della vasca di aspirazione dell'impianto idrovoro di Mezzani pari a circa 22,4 m s.m. e quota dello "zero" di bonifica pari a circa 23,6 m s.m.), Canale Terrieri (quota di fondo del canale nei pressi della chiavica dell'argine maestro pari a circa 22,5 m s.m.), Chiodinello (quota di fondo della vasca dell'impianto idrovoro pari a 24,2 m s.m. e quota dello "zero" di bonifica pari a 25,20 m s.m.);
- nel tratto compreso tra il torrente Enza e il torrente Crostolo ed i comuni che si affacciano a Po (Brescello, Boretto, Gualtieri) allo stato attuale i territori presentano situazioni di drenaggio difficili; in questa fascia i terreni hanno quote decrescenti da ovest verso est variabili da 22,00 m s.m. a quote 18,00 m s.m. Nell'ambito del territorio sopra individuato vi è un'area compresa tra il centro abitato di Gualtieri e S. Vittoria, a cavallo della strada statale n. 63, il cui piano di campagna si trova tra quota 18,00 m s.m. e quota 19,00 m s.m., all'interno della quale è ubicata parte dell'area industriale di Gualtieri;
- il territorio dei comuni di Gualtieri e Boretto fanno parte del bacino della bonifica (superficie 6.000 ha), il cui scolo avviene tramite l'impianto idrovoro del Torrione, posto a ridosso del torrente Crostolo, che rappresenta l'unica possibilità di scolo; in condizioni normali, è necessario che l'impianto funzioni in continuo per mantenere nei due collettori di scolo, Alfiere (acque alte) e Rinascita (acque basse), rispettivamente le quote di 17,25 m s.m. e 18,50 m s.m. (quote su cui fu progettato l'impianto). L'impianto, costituito da tre gruppi di elettropompe, ha la capacità di smaltire una portata di 20,00 m3/s per una prevalenza di 10,00 m e scarica in Crostolo tramite una vasca di carico il cui fondo è a quota 19,50 m s.m., che dista dalla foce in Po circa 3 km.

Sulla base dei livelli idrometrici dichiarati dal Servizio 1 l'azione di rigurgito a foce Parma, Enza e Crostolo è tale da non influire sulla gestione degli impianti di scolo esistenti, dotati di sollevamento meccanico.

Per l'impianto di Boretto viene favorita la derivazione irrigua con una quota del livello regolato di 20,57 m s.m. e sfavorita l'azione di scolo a gravità del canale derivatore.

A valle di Boretto, in sponda destra la bonifica dei territori del Consorzio Terre di Gonzaga, poste a monte della traversa, avviene attraverso una fitta rete di canali che convogliano le acque di drenaggio nel Collettore Principale che attraversa l'intero comprensorio ad ovest del Secchia in una posizione mediana da sud verso nord-est. Tale canale sottopassa il Secchia in località San Siro di Quistello e si immette nel Canale Emissario Agro Mantovano Reggiano che convoglia le acque nel Po a Moglia di Sermide (progressiva km 526,5, circa 65 km a valle della traversa). Lo scarico avviene prevalentemente a gravità, ma, all'occorrenza, può avvenire anche mediante sollevamento (portata massima pari a circa 40 m^3/s e prevalenza massima pari a circa 7 m).

<u>Interferenze a monte della Traversa 4</u>

La Traversa 4 è ubicata alla progressiva chilometrica 503 e ricade nel territorio comunale di Pieve di Coriano (MN).

Il tratto a monte della traversa lungo la sponda sinistra è di competenza del Consorzio di Bonifica dei Territori del Mincio, mentre in destra la competenza riguarda il Consorzio di Bonifica delle Terre di Gonzaga in Destra Po.

Il livello di regolazione è posto a quota di 14,20 m s.m., con una portata di regolazione di 1.500 m^3/s oltre la quale le paratoie sono completamente aperte e il profilo idrico torna a coincidere con quello attuale.

COMUNI	PROGRESSIVA [km]	LIVELLO MASSIMO DI REGOLAZIONE (Quota in m s.m.)	PORTATA MASSIMA DI REGOLAZIONE (m^3/s)
Pieve di Coriano (MN)	503	14,20	1.500

Tabella 145 - Traversa 4: livello e portata di regolazione

Opera di scolo

CONSORZIO	Navarolo Agro Cremonese Mantovano			
NOME	Impianto idrovoro di San Matteo delle Chiaviche			
LOCALITÀ	San Matteo delle Chiaviche (MN)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Navarolo			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	183			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	17,70 in dx fiume Oglio	H =2,00 L =4,20	25.000	7

Opera di scolo

CONSORZIO	Navarolo Agro Cremonese Mantovano			
NOME	Impianto idrovoro di San Matteo delle Chiaviche			
LOCALITÀ	San Matteo delle Chiaviche (MN)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Ceriana			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	88			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	18,30 in dx fiume Oglio	H =2,00 L =4,20	18.100	7

Opera di scolo

CONSORZIO	Navarolo Agro Cremonese Mantovano			
NOME	Impianto idrovoro di San Matteo delle Chiaviche			
LOCALITÀ	San Matteo delle Chiaviche (MN)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Fossola			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	49,50			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	17,30 in dx fiume Oglio	H =2,60 L =4,20	10.300	8

Opera di scolo

CONSORZIO	Navarolo Agro Cremonese Mantovano			
NOME	Impianto idrovoro di Roncole			
LOCALITÀ	Roncole (MN)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Regona d'Oglio			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	64,50			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	18,30 in dx fiume Oglio	H =2,20 L =4,00	13.100	7.90

Opera di scolo

CONSORZIO	Territori del Mincio			
NOME	Cesole			
LOCALITÀ	Cesole di Marcaria			
BACINO IDRAULICO DRENATO				
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	18			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	16,90 in sx fiume Oglio	H = L=	5.000	6

Opera di derivazione irrigua

<table>
<tr><td>CONSORZIO</td><td colspan="6">Territori del Mincio</td></tr>
<tr><td>NOME</td><td colspan="6">Cesole</td></tr>
<tr><td>LOCALITÀ</td><td colspan="6">Cesole di Marcaria</td></tr>
<tr><td>NOME BACINO IDRAULICO SERVITO</td><td colspan="6"></td></tr>
<tr><td>SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km^2)</td><td colspan="6">16</td></tr>
<tr><td>PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)</td><td colspan="6">800</td></tr>
<tr><td rowspan="3">OPERA DI DERIVAZIONE</td><td colspan="2">20.000 per Terre dei Gonzaga in Destra Po</td><td colspan="4">SOLLEVAMENTO MECCANICO</td></tr>
<tr><td>Portata massima (l/s)</td><td>Quota minima (m s.m.)</td><td>Impianto di sollevamento Portata (l/s)</td><td>Altezza massima sollevamento (m)</td><td colspan="2">Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento</td></tr>
<tr><td>800</td><td>18,00 in sx fiume Oglio</td><td>600+600</td><td>5</td><td>Da mese</td><td>a mese</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>Aprile</td><td>Settembre</td></tr>
</table>

Opera di scolo

<table>
<tr><td>CONSORZIO</td><td colspan="4">Territori del Mincio</td></tr>
<tr><td>NOME</td><td colspan="4">Roncocorrente</td></tr>
<tr><td>LOCALITÀ</td><td colspan="4">Scorzarolo (MN)</td></tr>
<tr><td>BACINO IDRAULICO DRENATO</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)</td><td colspan="4">100</td></tr>
<tr><td rowspan="3">TIPOLOGIA DI SCOLO</td><td colspan="2">A GRAVITÀ</td><td colspan="2">SOLLEVAMENTO MECCANICO</td></tr>
<tr><td>Quota minima di scarico (m s.m.)</td><td>Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)</td><td>Portata (l/s)</td><td>Altezza massima sollevamento (m)</td></tr>
<tr><td>15,00</td><td>H =
L =</td><td>16.700</td><td>3/6</td></tr>
</table>

Opera di scolo

CONSORZIO	Territori del Mincio			
NOME	Boccadiganda			
LOCALITÀ	San Nicolò Po (MN)			
BACINO IDRAULICO DRENATO				
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	4			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
		H = L =	800	8

Opera di derivazione irrigua

CONSORZIO	Territori del Mincio					
NOME	Travata					
LOCALITÀ	Bagnolo San Vito (MN)					
NOME BACINO IDRAULICO SERVITO						
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km²)	57					
PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)	5.000					
OPERA DI DERIVAZIONE	20.000 per Terre dei Gonzaga in Destra Po		SOLLEVAMENTO MECCANICO			
	Portata massima (l/s)	Quota minima (m s.m.)	Impianto di sollevamento Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)	Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento	
	5.000	16,50 in dx fiume Mincio	6.000	2,50	Da mese	a mese
					Aprile	Settembre

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Territori del Mincio			
NOME	Travata			
LOCALITÀ	Bagnolo San Vito (MN)			
BACINO IDRAULICO DRENATO				
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	90			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	14,20 in dx fiume Mincio	H = L =	28.000	10

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Terre dei Gonzaga in Destra Po – Consorzio Digagnola - Po Morto			
NOME	Canale emissario Digagnola-Po Morto			
LOCALITÀ	San Benedetto Po (MN)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Digagnola-Po Morto			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	6,1			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	14,4*	H = L =	1.200	10

**Quota dedotta da rilievo LIDAR 1x1 m*

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Emilia Centrale			
NOME	San Siro			
LOCALITÀ	San Siro di San Benedetto Po (MN)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Canale Emissario			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)	330 (superfice bacino Acque Basse) + eventuali portate scolmate dal bacino Acque Alte per complessivi 30.000 l/s in relazione alla capacità di ricezione dei collettori di Acque Basse			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	10,60	6 luci da: H =4,10 L =2,75	80.000	7,50

OPERA DI DERIVAZIONE IRRIGUA

<table>
<tr><td>CONSORZIO</td><td colspan="6">Burana</td></tr>
<tr><td>NOME</td><td colspan="6">Impianto idrovoro di Sabbioncello</td></tr>
<tr><td>LOCALITÀ</td><td colspan="6">Quingentole (MN)</td></tr>
<tr><td>NOME BACINO IDRAULICO SERVITO</td><td colspan="6">Sistema di distribuzione idrica Sabbioncello</td></tr>
<tr><td>SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km^2)</td><td colspan="6">700</td></tr>
<tr><td>PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)</td><td colspan="6">20.000</td></tr>
<tr><td rowspan="3">OPERA DI DERIVAZIONE</td><td colspan="2">20.000 per Terre dei Gonzaga in Destra Po</td><td colspan="4">SOLLEVAMENTO MECCANICO</td></tr>
<tr><td>Portata massima (l/s)</td><td>Quota minima (m s.m.)</td><td>Impianto di sollevamento Portata (l/s)</td><td>Altezza massima sollevamento (m)</td><td colspan="2">Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento</td></tr>
<tr><td></td><td>10</td><td>20.000</td><td>10,25</td><td>Da mese</td><td>a mese</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td><td>Marzo</td><td>Ottobre</td></tr>
</table>

Per verificare l'interferenza delle opere descritte si è fatto riferimento alla ricostruzione da modello idraulico dei livelli idrometrici a monte delle traverse fornite dal Servizio 1.

In particolare nella Tabella 146 di sintesi per la traversa 4 sono riportate le quote di scarico delle opere consortili e i livelli idrometrici non regolati/regolati lungo la sponda sinistra.

OPERA	TIPO OPERA	QUOTA MINIMA SCARICO M S.M.	SEZ. RILIEVO AIPO	PORTATA m^3/s	LIVELLO NON REGOLATO m s.m.	LIVELLO REGOLATO m s.m.
Impianto idrovoro di San Matteo delle Chiaviche Navarolo	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	17,70 in dx fiume Oglio	Sez. 40C	1.500	15,80	16,26
				2.000	16,80	17,03
Impianto idrovoro di San Matteo delle Chiaviche Ceriana	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	18,30 in dx fiume Oglio	Sez. 40C	1.500	15,80	16,26
				2000	16,80	17,03
Impianto idrovoro di San Matteo delle Chiaviche Fossola	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	17,30 in dx fiume Oglio	Sez. 40C	1.500	15,80	16,26
				2000	16,80	17,03
Impianto idrovoro di Roncole	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	18,30 in dx fiume Oglio	Sez. 40C	1.500	15,80	16,26
				2000	16,80	17,03
Cesole	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	16,90 in sx fiume Oglio	Sez. 40C	1.500	15,80	16,26
				2000	16,80	17,03
Cesole	Derivazione irrigua	18,00 in sx fiume Oglio	Sez. 40C	1.500	15,80	16,26
				2000	16,80	17,03
Cesole	Derivazione irrigua	18,00 in sx fiume Oglio	Sez. 40C	1.500	15,80	16,26
				2000	16,80	17,03
Roncocorrente	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	15,00	Sez. 41	1.500	15,16	15,82
				2000	16,22	16,53
Boccadiganda	Scolo a sollevamento meccanico	16,00*	Sez. 42E	1.500	14,21	15,25
				2000	15,31	15,80
Travata	Derivazione irrigua	16,50 In dx fiume Mincio	Sez. 46B	1.500	12,95	14,62
				2000	14,05	27,27
Travata	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	14,20 In dx fiume Mincio	Sez. 46B	1.500	12,95	26,47
				2000	14,05	27,27

**Quota dedotta da rilievo LIDAR 1x1 m*

Tabella 146 - Opere di derivazione irrigua e scolo in sponda sinistra e livello idrico regolato in corrispondenza delle stesse per effetto della Traversa 4

Il profilo idrico regolato dalla traversa 4 in corrispondenza degli impianti di scolo di San Matteo delle Chiaviche, Roncole e Cesole nel fiume Oglio non subisce modifiche rispetto alla situazione attuale e subisce minime variazioni nella zona di confluenza del fiume Oglio. L'interferenza maggiore si ha con lo scarico di Roncocorrente, che può avvenire a gravità o con sollevamento meccanico, in cui il livello regolato è superiore alla quota minima di scarico.

In particolare nell'impianto di Roncocorrente (Borgoforte, MN) scaricano i seguenti canali:

- Roncocorrente (zero di bonifica: 15,50 m s.m.);
- Fossaviva (zero di bonifica: 17,10 m s.m.);
- Senga (zero di bonifica: 17,90 m s.m.).

Per l'impianto della Travata, lungo il fiume Mincio, l'azione di rigurgito è in parte compensata dal sistema di Governolo (livello regolato 14,20 m s.m.) presente alla confluenza in Po. L'impianto raccoglie le acque dei seguenti canali:

- Bissi-Fossegone (zero di bonifica: 11,80 m s.m.);
- Bolognina (zero di bonifica: 14,90 m s.m.);
- Gherardo (zero di bonifica:15,30 m s.m.).

Nella Tabella 147 per la traversa 4 sono riportate le quote di scarico e i livelli idrometrici non regolati/regolati lungo la sponda destra.

OPERA	TIPO OPERA	QUOTA MINIMA SCARICO M S.M.	SEZ. RILIEVO AIPO	PORTATA m^3/s	LIVELLO NON REGOLATO m s.m.	LIVELLO REGOLATO m s.m.
Canale emissario Digagnola-Po Morto	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	14,40	Sez. 45	1.500	13,41	14,83
				2.000	14,51	15,21
San Siro	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	10,60 in sx fiume Secchia	Sez. 47A	1.500	12,59	14,47
				2000	13,68	14,65
Impianto idrovoro di Sabbioncello	Derivazione irrigua	10	Sez. 48	1.500	12,20	14,33
				2.000	13,28	14,41

Tabella 147 - Opere di derivazione irrigua e scolo in sponda destra e livello idrico regolato in corrispondenza delle stesse per effetto della Traversa 4

L'interferenza della traversa 4 con le opere consortili in destra idrografica si manifesta per il canale emissario Digagnola – Po Morto, dove il livello regolato è superiore alla quota minima di scarico.

All'interno del Consorzio di Bonifica Terre di Gonzaga in Destra Po la golena di San Benedetto Po, di circa 600 ha, viene drenata da una rete di canali che afferiscono ad un impianto idrovoro a scolo meccanico permanente (portata massima pari a circa 1 m^3/s) dal Consorzio Distretto Po morto – Digagnola, in autonomia gestionale rispetto al Consorzio Terre di Gonzaga.

La bonifica dei territori extra-golenali del Consorzio Terre di Gonzaga in Destra Po, poste a monte della quarta traversa, avviene attraverso una fitta rete di canali che convogliano le acque di drenaggio nel Collettore Principale che attraversa l'intero comprensorio a ovest del Secchia, in una posizione mediana da sud verso nord-est. Tale canale sottopassa il Secchia in località San Siro di Quistello e si immette nel Canale Emissario Agro Mantovano Reggiano che convoglia le acque di scolo nel Po a Moglia di Sermide (progressiva km 526,5, circa 23 km a valle della quarta traversa). Lo scarico avviene prevalentemente a gravità, ma, all'occorrenza, può essere sollevato (portata massima pari a circa 40 m^3/s e prevalenza massima di circa 7 m).

Per quanto riguarda l'impianto di San Siro e il funzionamento del Canale Emissario del Consorzio di Bonifica Emilia Centrale, l'intervento per eliminare l'interferenza tra il regime di funzionamento del manufatto idraulico di San Siro e il livello di regolazione della quarta traversa, potrebbe consistere nel recapitare le acque di drenaggio dello stesso nel Canale Principale del Consorzio di Bonifica Terre di Gonzaga (previa realizzazione di un canale di collegamento), che sottopassa il Secchia e si immette in Po in località Moglia di Sermide, con scarico a gravità, 28 km a valle della quarta traversa. Tale modalità di funzionamento è praticabile fino a quando la portata di drenaggio proveniente da monte (Consorzio Terre di Gonzaga in Destra Po - Consorzio di Bonifica Emilia Centrale) non supera la capacità di portata del Canale Principale e del sifone del fiume Secchia; oltre tale limite occorre attivare l'impianto idrovoro di San Siro. Per ridurre ulteriormente la necessità dell'impianto idrovoro occorre incrementare la capacità di portata a partire dal sottopasso del Secchia, con eventuale nuovo recapito nel Po a valle della quarta traversa.

In alternativa, per mantenere all'interno del Canale Emissario livelli idrici compatibili con il sistema di monte, è necessario far funzionare l'impianto di San Siro in modo permanente (attualmente funziona solo in occasione di piene e morbide del Po e del Secchia, essendo possibile per la maggior parte dell'anno lo scarico a gravità).

Interferenze a monte della Traversa 5

La Traversa 5 è ubicata alla progressiva chilometrica 556 e ricade nel territorio comunale di Ferrara (FE) e Occhiobello (RO).

Il tratto a monte della traversa lungo la sponda sinistra è di competenza del Consorzio di Bonifica dei Territori del Mincio e del Consorzio di Bonifica Adige Po, mentre in sponda destra la competenza riguarda il Consorzio di Bonifica delle Terre di Gonzaga in Destra Po, il Consorzio di Bonifica di Burana e il Consorzio di Bonifica della Pianura di Ferrara.

Il livello massimo di regolazione è posto a quota di 7,50 m s.m., con una portata di regolazione di 1.500 m^3/s oltre la quale le paratoie sono completamente aperte e si ripristina il deflusso naturale attuale.

COMUNI	PROGRESSIVA [km]	LIVELLO MASSIMO DI REGOLAZIONE (Quota in m s.m.)	PORTATA MASSIMA DI REGOLAZIONE (m^3/s)
Ferrara (FE) – Occhiobello (RO)	556	7,50	1.500

Per le opere di derivazione e scolo in sinistra idrografica procedendo da monte verso valle si hanno le seguenti interferenze.

OPERA DI DERIVAZIONE IRRIGUA

CONSORZIO	Adige Po					
NOME	Impianto idrovoro di Golena Cibo					
LOCALITÀ	Castelmassa (RO)					
NOME BACINO IDRAULICO SERVITO	Zelo Berlè e Calto Ceneselli					
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km^2)	30					
PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)	1.500					
OPERA DI DERIVAZIONE	20.000 per Terre dei Gonzaga in Destra Po		SOLLEVAMENTO MECCANICO			
	Portata massima (l/s)	Quota minima (m s.m.)	Impianto di sollevamento Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)	Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento	
					Da mese	a mese
		10	2x300		Aprile	Settembre

OPERA DI DERIVAZIONE IRRIGUA

CONSORZIO	Adige Po					
NOME	Chiavica di Calto					
LOCALITÀ	Calto (RO)					
NOME BACINO IDRAULICO SERVITO	Gurzone, Saline-Viezze-Oriola, Garofolo, Zelo-Berlè, Calto-Ceneselli, Stienta-Terre Vecchie, Frassinelle-Pincara					
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km^2)	170,57					
PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)	5.500					
OPERA DI DERIVAZIONE	20.000 per Terre dei Gonzaga in Destra Po		SOLLEVAMENTO MECCANICO			
	Portata massima (l/s)	Quota minima (m s.m.)	Impianto di sollevamento Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)	Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento	
					Da mese	a mese
		6,5	3x2000		Aprile	Ottobre

Opera di derivazione irrigua

<table>
<tr><td>CONSORZIO</td><td colspan="6">Adige Po</td></tr>
<tr><td>NOME</td><td colspan="6">Ponte Ficarolo – Tontola Paradiso</td></tr>
<tr><td>LOCALITÀ</td><td colspan="6">Ficarolo (RO)</td></tr>
<tr><td>NOME BACINO IDRAULICO SERVITO</td><td colspan="6">Terre Vecchie di Stienta (RO)</td></tr>
<tr><td>SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km²)</td><td colspan="6">2,5</td></tr>
<tr><td>PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)</td><td colspan="6">200</td></tr>
<tr><td rowspan="3">OPERA DI DERIVAZIONE</td><td colspan="2">20.000 per Terre dei Gonzaga in Destra Po</td><td colspan="4">SOLLEVAMENTO MECCANICO</td></tr>
<tr><td>Portata massima (l/s)</td><td>Quota minima (m s.m.)</td><td>Impianto di sollevamento Portata (l/s)</td><td>Altezza massima sollevamento (m)</td><td colspan="2">Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento</td></tr>
<tr><td></td><td>9,0*</td><td>80</td><td></td><td>Da mese</td><td>a mese</td></tr>
<tr><td colspan="5"></td><td>Aprile</td><td>Settembre</td></tr>
</table>

**Quota dedotta da rilievo LIDAR 2015 AIPO*

Per la sponda destra le caratteristiche delle opere sono le seguenti.

Opera di scolo

<table>
<tr><td>CONSORZIO</td><td colspan="4">Terre dei Gonzaga in Destra Po</td></tr>
<tr><td>NOME</td><td colspan="4">Canale Emissario dell'ex Consorzio Agro Mantovano-Reggiano</td></tr>
<tr><td>LOCALITÀ</td><td colspan="4">Moglia di Sermide (MN)</td></tr>
<tr><td>BACINO IDRAULICO DRENATO</td><td colspan="4">Destra Secchia</td></tr>
<tr><td>SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km²)</td><td colspan="4">331</td></tr>
<tr><td rowspan="3">TIPOLOGIA DI SCOLO</td><td colspan="2">A GRAVITÀ</td><td colspan="2">SOLLEVAMENTO MECCANICO</td></tr>
<tr><td>Quota minima di scarico (m s.m.)</td><td>Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)</td><td>Portata (l/s)</td><td>Altezza massima sollevamento (m)</td></tr>
<tr><td>7,3</td><td>H =
L =</td><td>40.000</td><td>9</td></tr>
</table>

Opera di scolo

CONSORZIO	Terre dei Gonzaga in Destra Po			
NOME	Canale Fossalta e Cavo Diversivo dell'ex Consorzio di Revere			
LOCALITÀ	Moglia di Sermide (MN)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Sinistra Secchia			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	116,11			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	7,4	H = L =	26.000	8

Opera di derivazione irrigua

CONSORZIO	Burana					
NOME	Impianto idrovoro Pilastresi					
LOCALITÀ	Stellata di Bondeno (FE)					
NOME BACINO IDRAULICO SERVITO	Sistema di distribuzione idrica Polo Pilastresi					
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km^2)	1.545 di cui 42 per Consorzio dii Bonifica di Burana e 1.500 Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara					
PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)	47.000					
OPERA DI DERIVAZIONE	20.000 per Terre dei Gonzaga in Destra Po		SOLLEVAMENTO MECCANICO			
	Portata massima (l/s)	Quota minima (m s.m.)	Impianto di sollevamento Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)	Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento	
	47.000	5,5	47.000	3,0 Da 3,5 a 6,5 m	Da mese Marzo	a mese Ottobre

Opera di derivazione irrigua

CONSORZIO	Burana					
NOME	Impianto Sussidiario I Pilastresi					
LOCALITÀ	Stellata di Bondeno (FE)					
NOME BACINO IDRAULICO SERVITO	Sistema di distribuzione idrica Polo Pilastresi					
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km^2)	1.545 di cui 42 per Consorzio dii Bonifica di Burana e 1.500 Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara					
PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)	47.000					
OPERA DI DERIVAZIONE	20.000 per Terre dei Gonzaga in Destra Po		SOLLEVAMENTO MECCANICO			
	Portata massima (l/s)	Quota minima (m s.m.)	Impianto di sollevamento Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)	Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento	
			17.500	4,0 Da 2,5 a 6,5 m s.m.	Da mese	a mese
					Marzo	Ottobre

Opera di derivazione irrigua

CONSORZIO	Burana					
NOME	Impianto Sussidiario II Pilastresi					
LOCALITÀ	Stellata di Bondeno (FE)					
NOME BACINO IDRAULICO SERVITO	Sistema di distribuzione idrica Polo Pilastresi					
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO SERVITO (km^2)	1.545 di cui 42 per Consorzio dii Bonifica di Burana e 1.500 Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara					
PORTATA DI CONCESSIONE (l/s)	47.000					
OPERA DI DERIVAZIONE	20.000 per Terre dei Gonzaga in Destra Po		SOLLEVAMENTO MECCANICO			
	Portata massima (l/s)	Quota minima (m s.m.)	Impianto di sollevamento Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)	Periodo medio di funzionamento impianto di sollevamento	
			15.000	5,0 Da 1,5 a 6,5 m s.m.	Da mese	a mese
					Marzo	Ottobre

OPERA DI SCOLO

CONSORZIO	Burana			
NOME	Impianto idrovoro Pilastresi			
LOCALITÀ	Stellata di Bondeno (FE)			
BACINO IDRAULICO DRENATO	Sistema idraulico delle acque basse in sinistra Panaro			
SUPERFICIE BACINO IDRAULICO DRENATO (km^2)	542			
TIPOLOGIA DI SCOLO	A GRAVITÀ		SOLLEVAMENTO MECCANICO	
	Quota minima di scarico (m s.m.)	Sezione di scarico (altezza H x Larghezza L)	Portata (l/s)	Altezza massima sollevamento (m)
	5,5	6 luci da: H =5,5 L =2,5	50.000	10

Per verificare le interferenze con le opere descritte si è fatto riferimento alla ricostruzione da modello idraulico dei livelli idrici a monte delle traverse fornite dal Servizio 1.

Nella Tabella 149 di sintesi per la traversa 5 sono rappresentate le quote di scarico delle opere consortili e i livelli idrometrici non regolati/regolati lungo la sponda sinistra.

OPERA	TIPO OPERA	QUOTA MINIMA SCARICO M S.M.	SEZ. RILIEVO AIPO	PORTATA m^3/s	LIVELLO NON REGOLATO m s.m.	LIVELLO REGOLATO m s.m.
Impianto idrovoro di Golena Cibo	Derivazione irrigua	12,6	Sez. 57	1.500	8,84	10,13
				2.000	9,83	11,04
Chiavica di Calto	Derivazione irrigua	6,5	Sez. 59A	1.500	7,84	9,60
				2000	8,81	10,40
Ponte Ficarolo – Tontola Paradiso	Derivazione irrigua	9,0	Sez. 60A	1.500	7,03	8,17
				2.000	7,96	8,57

Tabella 149 - Opere di derivazione irrigua e scolo in sponda sinistra e livello idrico regolato in corrispondenza delle stesse per effetto della Traversa 5

Lungo la sponda sinistra sono presenti esclusivamente opere consortili di derivazione irrigua. L'innalzamento del livello idrico regolato della traversa 5 favorisce i prelievi irrigui anche nei periodi di magra.

Per la sponda destra le caratteristiche delle opere consortili sono esposte in

OPERA	TIPO OPERA	QUOTA MINIMA SCARICO M S.M.	SEZ. RILIEVO AIPO	PORTATA m^3/s	LIVELLO NON REGOLATO m s.m.	LIVELLO REGOLATO m s.m.
Canale Emissario dell'ex Consorzio Agro Mantovano-Reggiano	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	7,3	Sez. 56B	1.500	9,18	9,60
				2.000	10,18	10,40
Canale Fossalta e Cavo Diversivo dell'ex Consorzio di Revere	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	7,4	Sez. 56B	1.500	9,18	9,60
				2000	10,18	10,40
Impianto idrovoro Pilastresi	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	5,5	Sez. 61	1.500	6,99	8,16
				2.000	7,94	8,56
Impianto Sussidiario I Pilastresi	Derivazione irrigua	5,5	Sez. 61	1.500	6,99	8,16
				2.000	7,94	8,56
Impianto Sussidiario II Pilastresi	Derivazione irrigua	5,5	Sez. 61	1.500	6,99	8,16
				2.000	7,94	8,56
Impianto idrovoro Pilastresi	Scolo a gravità e sollevamento meccanico	5,5	Sez. 61	1.500	6,99	8,16
				2.000	7,94	8,56

Tabella 150 - Opere di derivazione irrigua e scolo in sponda destra e livello idrico regolato in corrispondenza delle stesse per effetto della Traversa 5

L'analisi delle interferenze lungo la sponda destra evidenzia che per gli impianti di Moglia di Sermide il livello idrico in Po regolato è superiore alla quota minima di scarico per gravità.

La sicurezza idraulica del comprensorio di Revere (Consorzio Terre di Gonzaga in Destra Po), situato interamente nell'Oltrepò mantovano, ha richiesto la realizzazione nel tempo di diverse opere per l'allontanamento delle acque. Attualmente gli apporti meteorici del comprensorio, immessi nel canale principale Fossalta, vengono versati, in forza di una specifica convenzione, nella rete del Consorzio di Burana. A secondo della contingenza, la rete del Consorzio può scaricare in Po a mezzo di sollevamento meccanico oppure, per deflusso naturale, convogliare mediante il Canale Collettore di Burana, fino al mare. Nei casi di piena eccezionale, invece, dal collettore principale della Fossalta le acque vengono immesse nel nuovo canale diversivo per essere poi sollevate in Po dall'impianto idrovoro del Consorzio, nei pressi di Moglia di Sermide.

I tre impianti denominati Pilastresi e Sussidiario I e II costituiscono il "Polo di derivazione Pilastresi" con una portata massima di concessione univoca da 47.000 l/s. Gli impianti Sussidiario I e II sono integrativi/sostitutivi del principale qualora, per quote idrometriche del Po eccessivamente basse, l'impianto principale resti fuori servizio. Il livello regolato dalla traversa 5 favorisce i prelievi irrigui mentre per lo scolo delle acque drenate si ha un livello regolato superiore alla quota minima di scarico per gravità, implicando la necessità del sollevamento meccanico.

Il Consorzio di Bonifica di Burana ha riunito nel proprio comprensorio i territori dei due Consorzi preesistenti: l'intero comprensorio dell'ex Consorzio della Bonifica Burana-Leo-Scoltenna-Panaro e la parte dell'ex comprensorio del Consorzio Reno-Palata compresa tra il torrente Samoggia e il fiume

Panaro, rispettivamente situati in destra e sinistra idraulica del Panaro stesso.

La rete di scolo è caratterizzato dal sistema formato dalla Botte Napoleonica sul Panaro che permette di sottopassare l'alveo e, attraverso il Po di Volano, raggiungere il mare, e dall'impianto Pilastresi. Quest'ultimo, originariamente concepito per il sollevamento meccanico della parte in esubero delle acque che la Botte Napoleonica non riesce a far defluire naturalmente, fu in seguito rivisto anche in funzione della derivazione, per provvedere all'approvvigionamento idrico della parte orientale della provincia ferrarese.

Il sistema della acque alte modenesi scola nel canale Diversivo di Burana che scarica nel Panaro a Santa Bianca, mentre quello delle acque basse modenesi, parte delle ferraresi e di quelle mantovane sono serviti da uno scarico per gravità, attraverso il canale Collettore di Burana, alla Botte Napoleonica per proseguire nell'emissario di Burana nel territorio ferrarese.

20.1.3 Caratterizzazione dell'interazione della falda freatica con il sistema del fiume Po allo stato attuale

L'analisi dello stato attuale dell'interazione della falda freatica con il sistema del fiume Po è stata supportata da una raccolta dati approfondita, riguardante le rete di monitoraggio freatimetrica costituita da pozzi e piezometri sul territorio in studio, la raccolta di studi pregressi sulle acque sotterranee, degli studi idrogeologici a supporto dei piani urbanistici comunali (Piani di Governo del Territorio, Piani Urbanistici comunali, etc..) del tratto di interesse.

Attraverso i Consorzi di bonifica sono state indagate le aree a maggior difficoltà di drenaggio legate all'interferenza della falda superficiale con la rete di scolo di bonifica esistente.

Dalla serie storica dei livelli piezometrici delle reti di monitoraggio regionali si è proceduto alla costruzione dell'andamento del livello piezometrico massimo storico raggiunto nella condizione attuale, cioè senza l'influenza delle opere di progetto per verificare l'andamento del livello medio massimo storico della falda superficiale rispetto al piano campagna, le interazioni con il livello idrometrico del fiume Po (azione alimentante o drenante fiume-falda), la presenza di aree di emergenza naturale (fontanili risorgive) e di moti di filtrazione verificatesi nelle piene storiche del fiume con censimento dei principali fenomeni di filtrazione/fontanazzi che si sono verificati.

Per l'analisi della serie storiche dei livelli piezometrici si è proceduto secondo i seguenti passaggi:

- selezione dei piezometri captanti la falda freatica superficiale;
- analisi delle serie storiche dei livelli piezometrici, individuando il livello piezometrico massimo e , minimo annuo, la media dei minimi e massimi storici rilevati, i valori dei massimi e dei minimi storici assoluti;
- ricostruzione attraverso modellazione GIS delle curve isofreatiche del livello piezometrico medio dei massimi storici;

ricostruzione della soggiacenza media minima storica sulla base dei modelli digitali del terreno disponibili (LIDAR 1 m AIPO entro il sistema arginale del fiume Po, DTM con risoluzione 5 m e 20 m nelle aree esterne agli argini maestri).

Si è quindi ricostruito l'andamento della falda superficiale per il tratto da Cremona a incile Po di Goro, in funzione della successiva analisi dell'interferenza con le opere in progetto, tenendo conto dei limiti imposti dai dati disponibili (esiguo numero di piezometri entro la fascia del Po captanti la falda superficiale, serie storiche dei livelli piezometrici discontinue per numero di anni, periodo medio dal 2001 al 2014), rilievi altimetrici del terreno di scarso dettaglio nella fascia esterna alle arginature maestre, soprattutto nell'area lombarda e veneta).

Come riferimento del livello idrometrico medio del fiume Po sono stati utilizzati i risultati della simulazione idraulica in moto permanente per le varie portare caratteristiche delle curve di durata individuate dalla serie storica di 10 anni (dal 2003 al 2013 delle portate medie giornaliere) facendo riferimento alla curva di durata a 182 giorni per l'anno medio.

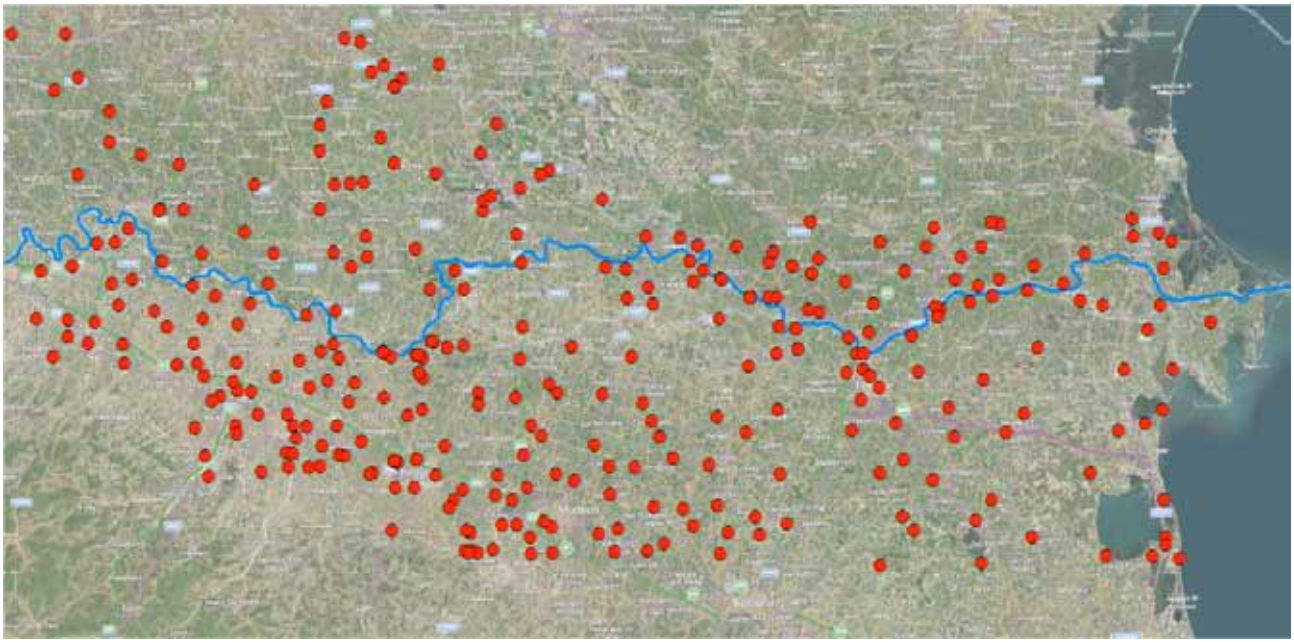


Figura 393 - Reti di monitoraggio piezometrico nella pianura padana, da Cremona a confluenza Mare Adriatico

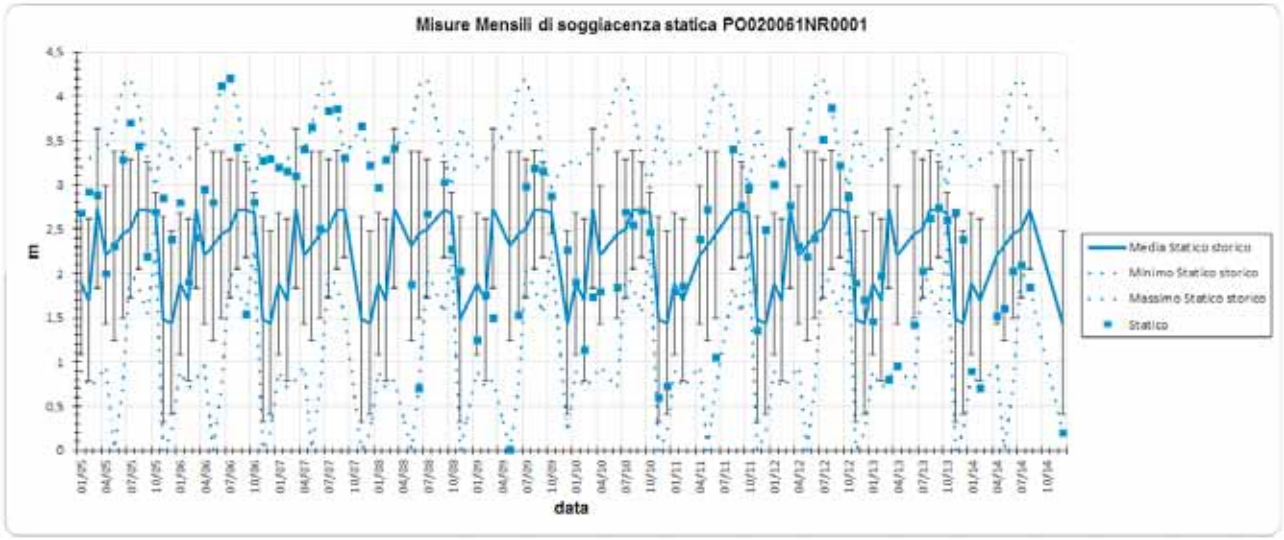


Figura 394 - Misure mensili di soggiacenza statica del pozzo PO020061NR001 dal 2005 al 2014 a Sermide (MN) (fonte ARPA Lombardia)

L'andamento della falda freatica allo stato attuale lungo il tratto di fiume Po oggetto di studio è stato riportato nella cartografia allegata (Allegato 2) rappresentando a livello di sintesi le classi di valore medio di soggiacenza e l'andamento delle linee isofreatiche raccordate lungo l'alveo attivo con il livello idrometrico medio del corso d'acqua (assunto corrispondente alla portata con durata 182 giorni – Q182).

Nella cartografia è inoltre riportata l'ubicazione dei fontanazzi delle piene storiche 1994 e 2000 al fine di indicare le direttrici principali dei moti di filtrazione sotterranei e la presenza in superficie di aree a difficoltà di drenaggio.

20.1.4 Modello di simulazione del comportamento del sistema falda freatica - fiume Po allo stato attuale

Nel seguito è descritto il comportamento del sistema falda freatica – fiume Po nelle condizioni attuali con il livello idrometrico medio del corso d'acqua (Q182) da Cremona all'ubicazione dell'ultima traversa.

E' da segnalare che tali condizioni descrivono il comportamento del sistema falda freatica - alveo con portate inferiori ai 1500 m3/s; nel caso di portate superiori, si ripristinano il comportamento attuale e i rapporti tra il livello della falda e il livello idrometrico del fiume, a cui fanno riferimento le criticità segnalate dai Consorzi di Bonifica per le morbide e le piene storiche.

Tratto da Cremona a Motta Baluffi – Roccabianca (Traversa 1)

Nel tratto l'alveo ha un'azione drenante sulla falda superficiale, richiamando le curve di livello a convergere verso l'asse soprattutto nel primo tratto da Cremona a confluenza Ongina. Il fenomeno è stato influenza anche dal progressivo abbassamento del fondo alveo nel tratto cremonese, con livelli idrometrici che si pongono al di sotto delle quote delle aree golenali per valori di alcuni metri. La soggiacenza del livello della falda freatica rispetto al piano campagna si attesta mediamente a quote superiori ai 3 m su entrambe le sponde, con un innalzamento del livello freatico nelle golene in sinistra idrografica di San Daniele Po e Motta Baluffi, fino a raggiungere mediamente i 2 m dal piano campagna.

Tratto da Motta Baluffi – Roccabianca a Casalmaggiore-Mezzano (Traversa 2)

La falda freatica per tutto il tratto ha un'azione di alimentazione verso il corso d'acqua, con un gradiente idraulico inferiore rispetto al tratto precedente. La soggiacenza media si attesta su entrambe le sponde con quote superiori ai 3 m dal piano campagna, con l'eccezione di alcuni settori tra Gussola e Martignana Po, Casalmaggiore e Fossa Caprara in cui si ha un innalzamento medio del livello freatico fino a raggiungere una soggiacenza di circa 2 m dal piano campagna.

Tratto da Casalmaggiore-Mezzano a monte confluenza fiume Oglio (Traversa 3)

Nel tratto si ha una netta diminuzione del gradiente idraulico della falda richiamata verso l'alveo. Il settore in golena sinistra compreso tra Fossa Caprara e confluenza fiume Oglio ha valori di soggiacenza intorno ai 2 m dal piano campagna, con situazioni di innalzamento locale (lungo l'area golenale). In sponda destra il tratto fino a Gualtieri si mantiene con una soggiacenza media superiore a 3 m dal p. c. Il tratto da Gualtieri a Torricella è caratterizzato da livello piezometrico superiore, con criticità che si verificano durante le piene. In particolare il canale Dugale Fiamminghi (Luzzara) raccoglie acque di risorgiva naturale collegata all'andamento idrologico del fiume, mentre il tracciato del canale Po Vecchio drena la falda durante i periodi di minor soggiacenza.

Tratto da confluenza fiume Oglio a Quingentole (Traversa 4)

Il tratto lungo la sponda sinistra presenta settori con soggiacenza inferiore ai 2 m dal piano campagna nella zona di confluenza Oglio fino a Scorzarolo e da San Giacomo Po a Governolo (confluenza fiume Mincio), dove alcuni settori di territorio golenale ed extra golenale presentano una soggiacenza prossima al piano campagna (1-2 m). A valle di confluenza Mincio, sempre in sponda sinistra, il gradiente diminuisce con un'azione di alimentazione verso il corso d'acqua e soggiacenza media dai 2 a 3 m.

Lungo la sponda destra la soggiacenza media si attesta tra i 2 e 3 m dal p. c., con situazioni localizzate a maggior criticità se associate anche all'azione di infiltrazione durante gli eventi di piena. In particolare nel tratto lungo la fascia vicina all'argine maestro di Po da Motteggiana a San Benedetto Po il drenaggio idraulico avviene attraverso i canali consortili Zara, Portiolo e la rete minore interconnessa; durante gli eventi di piena del fiume, la falda assume quote molto prossime al piano campagna generando delle situazioni di piena nella rete di drenaggio superficiale privata e consortile; i canali ricevono notevoli quantità d'acqua provenienti dalla falda anche attraverso numerosi fontanazzi concentrati ed aree diffuse di risorgiva, come nella zona di Torricella e nella zona di Portiolo (a valle dell'Autostrada A22 per il Brennero), dove si manifesta una risorgiva idrica diffusa, particolarmente significativa come estensione nei periodi di piena del Po.

Nella golena di San Benedetto, durante le piene, esiste una risorgiva particolarmente copiosa posta a ridosso dell'argine maestro di Po che viene raccolta con difficoltà dalla rete di drenaggio esistente che convoglia all'impianto idrovoro; anche in presenza di semplici morbide nel fiume la falda si riattiva in maniera importante per così lungo tempo da compromettere le coltivazioni in atto. Tutto il bacino è soggetto a scolo meccanico permanente.

Tutta la zona a nord-est di San Benedetto in località Gorgo, Bardelle, Ca' Matta, Mirasole, Brede, Rotta di Brede, San Siro, risulta di difficile drenaggio anche per eventi meteorici poco significativi a causa del persistere di livelli di falda elevati e di terreni depressi: non è noto se questa situazione sia la conseguenza di subsidenza localizzata, ma la difficoltà di drenaggio preoccupa e interessa numerosi fondi. La falda di risorgiva si manifesta anche per semplici morbide del fiume e viene raccolta dai canali consortili Zanolo e Schiappa-Arginello che sfociano nel collettore principale che a sua volta sottopassa il Secchia a San Siro e il cui recapito finale è il Po attraverso l'impianto idrovoro di Agro . A Quingentole, a valle dell'impianto idrovoro di Sabbioncello, in prossimità del cimitero lati nord ed ovest esistono alcune aree di estensione consistente in cui la falda superficiale raggiunge il piano campagna a seguito di eventi di morbida del fiume; le acque di falda raggiungono la rete di drenaggio consortile attraverso il Dugale Lagomoro che, con tiranti idrici massimi, confluisce nel Fossalta superiore che scarica in Po attraverso l'impianto idrovoro di Revere.

Tratto da Quingentole a Stienta (Traversa 5)

Il tratto in sponda sinistra da Bastia a Castelmassa presenta una soggiacenza media dai 2 a 3 m dal piano campagna con un andamento delle isofreatiche orientato verso il corso d'acqua e una funzione di alimentazione, anche se con un gradiente idraulico ridotto rispetto al tratto di monte. In sponda destra si presenta una condizione simile a quella della sponda opposta, con l'eccezione della zona golenale che va da Sermide a Stellata, dove si ha un innalzamento medio del livello piezometrico inferiore ai 2 m dal piano campagna. L'andamento delle isofreatiche tende ad essere in equilibrio con il livello idrometrico medio del corso d'acqua, anche per un minor effetto di approfondimento del fondo alveo rispetto ai tratti di monte.

In condizioni di morbida, in località Santa Mostiola nel Comune di Revere la falda freatica in collegamento con il fiume viene drenata dal canale Dugale Lavacollo che assume livelli superiori alle quote irrigue, fino quasi a campagna, anche senza eventi meteo in atto; lo stesso canale affluisce in Fossalta superiore che recapita le acque all'impianto idrovoro di Revere.

Nei comuni di Borgofranco e Revere, in località Nogarazza a seguito di livelli di falda prossimi al piano campagna il Dugale Tezze affluente della Fossalta superiore assume tiranti idrici massimi anche per semplici morbide del fiume, trasferendo le acque drenate all'impianto idrovoro di Revere.

20.2 INTERAZIONI DEGLI SCENARI PROGETTUALI CON IL FLUSSO SOTTERRANEO E LA RETE SUPERFICIALE DI DRENAGGIO

20.2.1 Impostazione metodologica

L'analisi delle interazioni tra flusso sotterraneo e rete superficiale di drenaggio è stata condotta solo con riferimento all'opzione di progetto che prevede la regolazione dei livelli di magra per mezzo di opere trasversali.

Infatti nell'ipotesi di sistemazione a corrente libera le variazioni indotte sul livello idrometrico non sono rilevanti e quindi non lo sono neanche gli effetti sugli acquiferi sotterranei. Si può quindi affermare che la soluzione a corrente libera non determina variazioni significative sul regime delle falde idriche sotterranee.

Per quanto riguarda la regolazione con traverse le variazioni indotte sui livelli idrometrici sono rilevanti e inducono di conseguenza variazioni sui livelli piezometrici dell'acquifero superficiale adiacente.

Di qui la necessità di definire un modello della geometria dei livelli piezometrici dell'acquifero superficiale, riferito alla condizione di progetto. Si noti che in alcuni settori anche la falda superficiale, normalmente freatica, può risultare in pressione, per la presenza di livelli limosi argillosi negli strati poco profondi. In tal senso è più corretto riferirsi ai livelli piezometrici in quanto, al contrario di quanto avviene in altre aree, non sempre si ha sovrapposizione tra il limite superiore dei terreni saturi e il livello piezometrico.

Per la costruzione del modello geologico si è fatto riferimento alle banche dati geognostiche disponibili, in particolare alla Banca dati Geognostica del Servizio Geologico della Regione Emilia-

Romagna e alla Banca Dati Geologica del Sottosuolo della Regione Lombardia, contenenti una raccolta di dati stratigrafici sulle aree di pianura, relativi all'ubicazione, alla quota e alla profondità di indagini geognostiche, nonché alla stratigrafia di dettaglio dell'indagine eseguita.

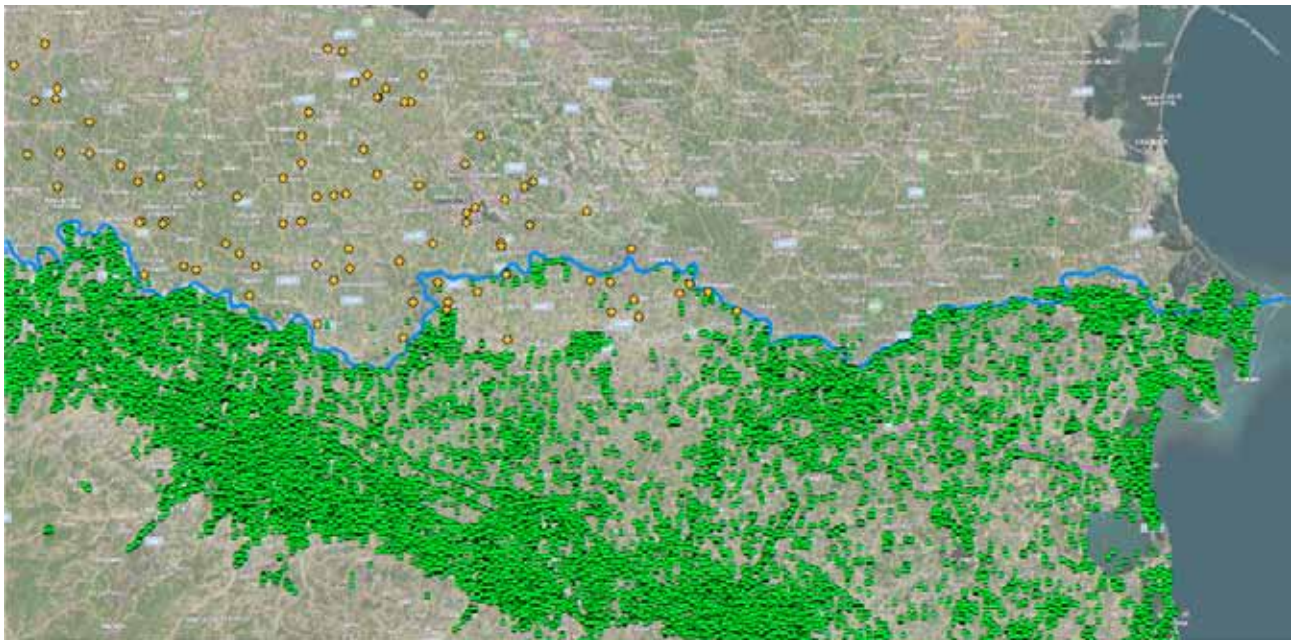


Figura 395 - Distribuzione delle prove geognostiche delle banche dati regionali

La metodologia utilizzata per la definizione di un modello concettuale dei livelli piezometrici della falda superficiale risente dei limiti imposti dal fatto che, nell'attuale fase progettuale, non si ha la disponibilità di indagini dirette alla scala di dettaglio necessaria, finalizzate all'approfondimento delle caratteristiche fisiche e idrodinamiche dell'acquifero superficiale. Risulta inoltre problematica l'assenza di un modello altimetrico del terreno di precisione adeguata, sufficientemente esteso nelle aree retroarginali (il LIDAR disponibile si ferma infatti a 200 m a tergo degli argini maestri, con l'eccezione del territorio della Regione Emilia Romagna), che sono quelle dove risulterebbe più critica la riduzione della soggiacenza dei livelli della falda indotta dalla realizzazione delle opere in progetto.

Tenendo conto di queste premesse, per la definizione del modello concettuale della falda di progetto, sono state necessarie alcune semplificazioni che tuttavia influiscono in misura modesta sul risultato finale.

Innanzitutto l'acquifero è stato considerato come un corpo unico e omogeneo. Come visto sopra, tale assunzione non è del tutto corretta alla scala di dettaglio, ma si tratta comunque di un'ipotesi più che ragionevole, soprattutto nell'ambito di analisi a media-grande scala, finalizzate a valutazioni quali quelle in oggetto che hanno lo scopo di identificare i fenomeni a scala di insieme, di definire le eventuali criticità conseguenti e le misure di mitigazione necessarie.

Si è quindi ipotizzato che il livello piezometrico della falda superficiale rivierasca, nel caso specifico per lo più coincidente con quello idrico trattandosi di una falda freatica solo localmente in pressione, sia direttamente influenzato dalle condizioni idrometriche del Po, che ne costituiscono la condizione al contorno.

Come scenario idrometrico di riferimento del Po, rispetto al quale considerare le variazioni indotte sull'acquifero, si è fatto riferimento a quello corrispondente alla portata di durata 182 gg., che è prossima alla portata media.

Occorre tenere presente, infatti, che tale portata è prossima al valore limite di regolazione delle traverse (1.500 m^3/s):

- per tutte le portate inferiori, il profilo idrico in alveo è stabilmente controllato dalla quota di regolazione delle 5 traverse e varia pertanto lungo l'asta in misura molto limitata; vista come

condizione al contorno dell'acquifero, tale situazione rappresenta quindi il livello minimo che viene a essere imposto ed è sensibilmente superiore al livello minimo attuale;

- per tutte le portate superiori, il profilo idrico in alveo torna a coincidere con quello relativo alle condizioni attuali e non sono di conseguenza attese modifiche indotte sulle condizioni freatimetriche dell'acquifero circostante.

Nelle aree golenali fino alla fascia retroarginale sono state ipotizzare sostanzialmente 2 condizioni. Se il livello del Po di progetto è posto a una quota sottostante di almeno 1-2 m la superficie topografica golenale e retroarginale, allora i livelli idrici della falda freatica di progetto andranno a raccordarsi, all'esterno delle aree golenali, con il livelli piezometrici attuali. In tale condizione, che si verifica essenzialmente nelle aree significativamente a monte delle traverse, il Po continuerà a drenare la falda così come avviene attualmente, anche se i volumi drenati saranno inferiori a quelli attuali.

Laddove invece il livello di progetto del Po corrisponderà a una quota superiore a quella delle aree golenali e retroarginali, allora si è ipotizzato che il livello piezometrico sia regolato dalla presenza, nelle aree retroarginali, della rete principale dei canali di bonifica. E' stata in sostanza definita un'area di influenza del Po sulla falda freatica corrispondente ai limiti lato fiume della rete di detti canali.

Tale assunzione riflette il fatto che, in condizioni di progetto, come evidenziato più avanti, le portate defluenti dal Po, attraverso la falda, verso la rete di bonifica non paiono eccessive, e quindi, ferma restando la possibilità di adeguamenti della rete stessa dei canali, i deflussi possono essere smaltiti senza eccessivi problemi.

La condizione al contorno "esterna" per l'acquifero, che controlla le possibili escursioni altimetriche conseguenti alla variazione permanente del profilo di magra e ordinario del Po, è stata quindi assunta in corrispondenza dei limiti della rete principale di bonifica che, per caratteristiche e andamento plano-altimetrico, è in grado di svolgere una efficiente funzione di drenaggio. In via cautelativa è stato assunto che tale funzione sia in grado di assicurare localmente una soggiacenza minima pari a 1 m.

Nelle condizioni di progetto descritte, con portate ordinarie e di magra la variazione del profilo idrico del Po comporta un'inversione del flusso attuale dell'acquifero che diventa alimentato dall'alveo e un innalzamento dei livelli freatimetrici che assumono una pendenza motrice nelle due direzioni esterne all'alveo stesso.

Per la rappresentazione quantitativa di tale scenario, si è quindi proceduto:

- alla definizione delle caratteristiche dell'acquifero nelle condizioni attuali (livelli freatimetrici, soggiacenza);
- alla definizione degli effetti attesi a seguito della realizzazione degli interventi in progetto, in assenza di interventi di mitigazione (livelli freatimetrici, soggiacenza, aumento delle portate afferenti al reticolo di drenaggio, aumento dei volumi idrici sollevati dagli impianti di bonifica per lo scarico a fiume);
- all'individuazione delle criticità emergenti, intese come nuove condizioni dell'acquifero che risultano incompatibili con l'uso del suolo in atto (insediamenti, attività agricole);
- all'individuazione e alla quantificazione degli interventi di mitigazione che risultano necessari.

Ovviamente, in termini di criticità, risultano maggiormente gravose le condizioni in cui gli effetti di innalzamento dell'acquifero si manifestano in corrispondenza degli insediamenti presenti; su tali situazioni sono stati approfonditi in maggior dettaglio i fenomeni e la definizione degli interventi di mitigazione.

20.2.2 Modello di simulazione del comportamento del sistema falda freatica - fiume Po per gli scenari di progetto

Da tale analisi emerge che le principali aree critiche corrispondono essenzialmente a parti dei seguenti centri abitati, posti in prevalenza nei settori ubicati subito a monte delle traverse e immediatamente a tergo degli argini maestri:

- a monte della traversa 1: parti dell'abitato di Isola Pescaroli in sinistra idrografica e di Ragazzola e Pieveottoville in sponda destra;
- a monte della traversa 2: parti (area industriale, sobborghi nord-occidentali) di Casalmaggiore e Fossa Caprara in sponda sinistra;
- a monte della traversa 3: parti dell'abitato di Cizzolo, Il Bugno, Villastrada, Dosolo e Cantone in sponda sinistra; Luzzara in sponda destra;
- a monte della traversa 4: Libiola, Bastia, Sustinente, Governolo, Correggio Micheli, San Giacomo Po, San Nicolò Po, Borgoforte in sponda sinistra, Quingentole, Mirasole, Il Gorgo, Brede e San Benedetto Po in sponda destra;
- a monte della traversa 5: Stienta, Sabbioni-Zampine, Gaiba, Ficarolo, Calto, Castelmassa e l'area industriale di Bergantino in sponda sinistra, Ravalle, Porporana, Paolecchio-Salvatonica, Moglia, Stellata in sponda destra.

Va ribadito che i fenomeni analizzati fanno riferimento alla condizione di progetto in assenza di interventi di mitigazione e controllo di tali effetti, alcuni dei quali sono di carattere strutturale, mentre altri comportano maggiori oneri ai Consorzi di bonifica per gestire le operazioni di convogliamento e scarico delle acque che già svolgono ordinariamente.

Si è inoltre proceduto a una stima, quanto meno in termini di ordini di grandezza, delle portate massime che nella configurazione di progetto andrebbero a ulteriore carico della rete di bonifica.

Tale analisi è stata condotta, per tratti omogenei, sulla base di sezioni di deflusso della falda ipotizzate circa parallele all'alveo del Po e comprese tra questo e i limiti dell'area di influenza sulla falda stessa del fenomeno di innalzamento della superficie freatica.

La permeabilità dell'acquifero è stata stimata in k= $1*10^{-3}$ m/s; si tratta di un valore elevato per le condizioni presenti e dunque ampiamente cautelativo; in proposito il principale riferimento è lo studio del Servizio Geologico dell'Emilia-Romagna - Interreg IIIB Medocc 2007 – che su un numero piuttosto elevato, poco meno di 30, di prove di pompaggio nell'area di Guastalla-Boretto, restituisce valori di permeabilità, per lo più compresi tra $1*10^{-4}$ e $1*10^{-3}$ m/s (valore massimo $2{,}24*10^{-3}$ m/s) .

Per la superficie è stata considerata un'area pari all'estensione della sezione per una potenza della falda fissa di 40 m. Come visto sopra si tratta anche in questo caso di un valore cautelativo, facilmente variabile in riduzione per la struttura multistrato dell'acquifero superficiale, caratterizzato da banchi sabbiosi alternati a livelli e lenti discontinui di limi e limi argillosi.

Il gradiente idraulico è stato definito sulla base dell'andamento dei livelli piezometrici di progetto e della distanza tra alveo del Po e rete di bonifica.

	SPONDA SINISTRA		SPONDA DESTRA	
TRATTO	Q totale (m^3/s)	Principale consorzio recettore	Q totale (m^3/s)	Principale consorzio recettore
T1.1	0,12	Dugali Naviglio Adda Serio	0,04	Bonifica Parmense
T2.2	0,02	Navarolo	0,04	Bonifica Parmense
T2.1	0,14	Navarolo	0,02	Bonifica Parmense
T3.2	0,07	Navarolo	0,06	Terre dei Gonzaga
T3.1	0,02	Navarolo	0,50	Terre dei Gonzaga
T4.2	0,05	Territori del Mincio	-	-
T4.1	0,19	Territori del Mincio	0,97	Terre dei Gonzaga
T5.3	0,31	Adige Po	0,02	Burana
T5.2	0,28	Adige Po	0,02	Burana
T5.1	0,82	Adige Po	0,56	Bonfica di Ferrara

Tabella 151 - Stima degli afflussi verso i consorzi in condizioni di progetto (ed in assenza di nuovi interventi di drenaggio della falda)

Nella Tabella 151 sono riportati gli esiti dei calcoli riferiti ai tratti omogenei definiti nell'ambito dell'attività di "Analisi della qualità delle acque" descritta nei capitoli successivi. Il calcolo è stato effettuato solo per i tratti in cui, in base alle valutazioni di cui sopra, si avrà una condizione di alimentazione dal Po alla falda rivierasca.

Nella stessa tabella sono indicati, inoltre, per tratto e sponda, i consorzi irrigui che in prevalenza dovrebbero farsi carico di tali deflussi in eccesso rispetto alla condizione attuale. Va tenuto conto, per altro, che nelle situazione odierna il flusso è diretto verso il Po, e che quindi alcuni tratti delle reti di bonifica potrebbero beneficiare di perdite verso il Po stesso in termini di deflussi da smaltire. Pertanto, da un punto di vista teorico, le portate di cui sopra potrebbero essere sottostimate, il che giustifica, a maggior ragione, l'utilizzo di parametri idrogeologici ampiamente cautelativi in grado di compensare, nel calcolo dei deflussi a carico delle reti di bonifica, anche gli effetti di tale fenomeno, diversamente di difficile se non impossibile quantificazione sulla base delle informazioni attualmente disponibili.

Di seguito vengono riassunti gli esiti del calcolo per singola traversa.

- Traversa 1: 0,16 m^3/s
- Traversa 2: 0,23 m^3/s
- Traversa 3: 0,65 m^3/s
- Traversa 4: 0,73 m^3/s
- Traversa 5: 2,01m^3/s

I calcoli hanno restituito portate specifiche comprese tra alcune decine e il centinaio di l/s per km. Si tratta di valori relativamente bassi, in genere smaltibili senza grossi problemi dalle reti di bonifica, che assumono una certa rilevanza solo in corrispondenza della terza (sponda destra, circa 0,5 m3/s), quarta (circa 1 m^3/s in sponda destra) e quinta traversa (circa 0,5÷1 m^3/s su entrambe le sponde) ovvero a carico delle reti dei consorzi di bonifica Terre dei Gonzaga in Destra Po, Burana, Pianura di Ferrara e Adige-Po.

Il fatto che i deflussi dal Po verso le reti di bonifica si incrementino da monte verso valle, è direttamente legato all'analoga riduzione della larghezza delle aree golenali comprese tra gli argini maestri e quindi ad una diminuzione della distanza tra alveo attivo e reti di bonifica; tali condizioni si traducono in un incremento del gradiente idraulico e quindi in un aumento dei deflussi. Se, ad esempio, si decidesse nelle aree a monte della traversa 2 di preservare tramite interventi di bonifica anche parte delle aree golenali, allora si avrebbe un sostanziale riallineamento dei deflussi per traversa.

E' comunque ragionevole prevedere che tali valori, ragione della sovrastima dei parametri idrogeologici, potranno essere ritoccati sensibilmente verso il basso a seguito di analisi più approfondite da condursi nelle successive fasi progettuali. Fondamentale a questo proposito sarà definire con prove dirette (essenzialmente di pompaggio) l'effettiva trasmissività degli acquiferi.

Nel seguito sono riportati gli esiti degli approfondimenti di dettaglio con modellazione numerica di simulazione della falda freatica condotti per le aree poste in corrispondenza delle traverse 4 e 5, ove sono emerse maggiori interferenze tra innalzamento del livello freatico e assetto attuale del territorio, come di seguito descritto.

20.3 APPROFONDIMENTI DI DETTAGLIO CON MODELLAZIONE NUMERICA [FEFLOW] DI SIMULAZIONE DELLA FALDA FREATICA PER IL SISTEMA DI REGOLAZIONE CON TRAVERSE

20.3.1 Impostazione metodologica della modellazione numerica

Nel presente paragrafo sono riportate le metodologie impiegate per la modellizzazione numerica finalizzata a valutare gli effetti degli interventi sui livelli di falda e sull'interazione tra la circolazione sotterranea e la rete superficiale di drenaggio.

L'approfondimento modellistico è riferito specificamente ai settori subito a monte delle traverse 4 e 5, per i quali dalle precedenti fasi di studio si sono evidenziati gli effetti più rilevanti, e che insistono

su aree già attualmente caratterizzate da problemi di smaltimento delle acque, sia superficiali che sotterranee (si veda il paragrafo precedente).

In particolare risultano esposti nell'assetto di progetto gli abitati di Quingentole e Libiola a monte della quarta traversa e di Gaiba e Stienta a monte della quinta. Si tratta di aree edificate poste per lo più a quote corrispondenti o inferiori a quelle idriche di esercizio delle traverse, e che quindi possono essere sede, nell'assetto di progetto, di emergenza della falda idrica, in assenza di adeguate opere di bonifica e drenaggio della falda stessa.

In ordine a tali obiettivi, i modelli numerici, in ambiente FEFLOW tridimensionale agli elementi finiti, hanno consentito di verificare l'assetto idrogeologico in condizioni di progetto e di valutarne l'interazione con i sovra menzionati nuclei abitati, per poi definire opportuni interventi per il controllo dei livelli di falda.

A riguardo si sottolinea come dalle valutazioni finora condotte risulterebbe di scarsa efficacia un intervento basato sulla realizzazione di barriere (realizzate tramite diaframmi o tecnologia analoga), da cui la necessità, in alternativa, di valutare dei sistemi di drenaggio, attraverso la realizzazione di nuoe trincee e/o l'estensione e il potenziamento della rete dei canali di bonifica.

I modelli hanno compreso un tratto sufficientemente ampio di territorio su entrambe le sponde a monte delle traverse e nell'intorno dei centri a rischio, in modo da comprendere la rete dei canali principali di bonifica; verso valle la modellazione è stata estesa a un settore dell'alveo del Po adeguato a descrivere l'effetto di richiamo e drenaggio operato sull'acquifero freatico.

Le aree di modello delle traverse 4, 5 sono riportate nelle successive Figura 396 e Figura 397.

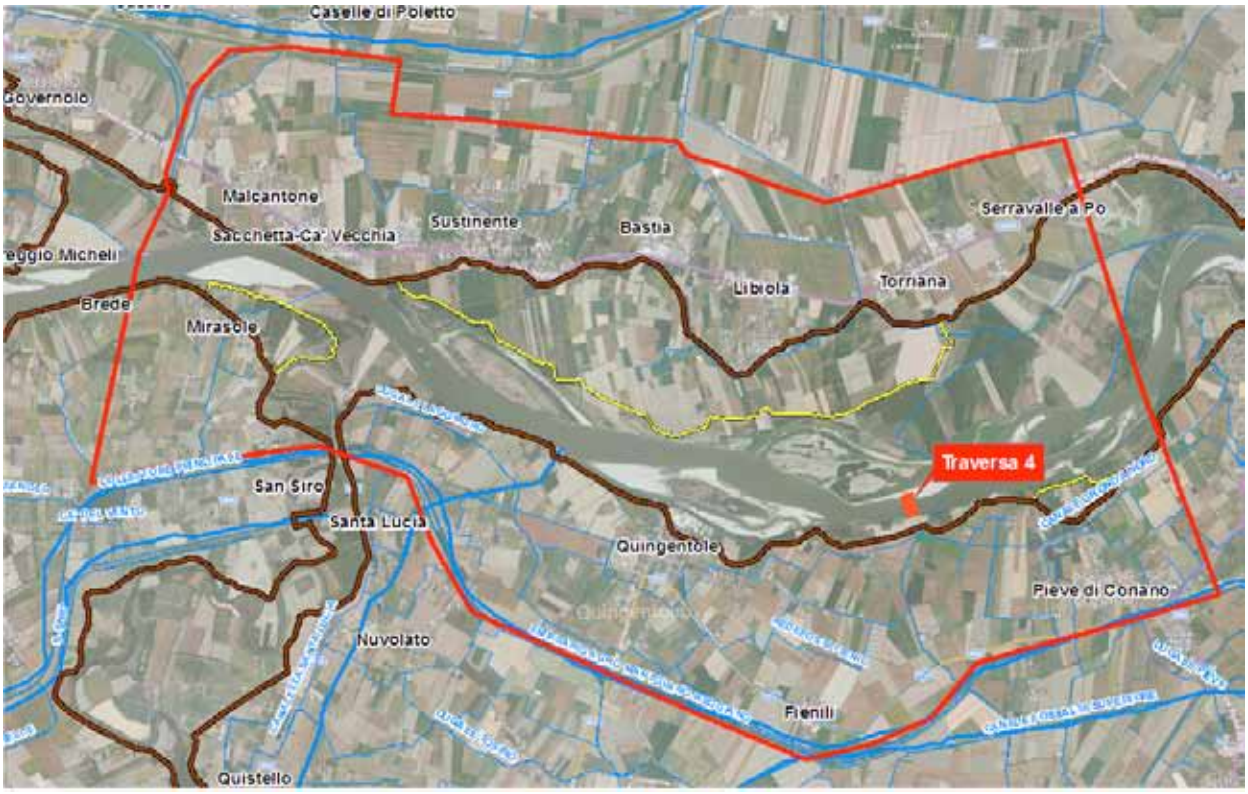


Figura 396 - Area di applicazione del modello numerico FEFLOW per la traversa 4

20.3.2 Caratteristiche del codice di calcolo utilizzato

Le modellizzazioni di flusso si sono basate sul noto codice FEFLOW (DHI-WASY), tridimensionale con discretizzazione agli elementi finiti.

FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) è uno dei più sofisticati codici numerici ad oggi disponibili per la modellazione del flusso e del trasporto di massa e calore in mezzi porosi e fratturati, in condizioni sia sature che insature.



Figura 397 - Area di applicazione del modello numerico FEFLOW per la traversa 5

Rimandando per il dettaglio alla letteratura tecnica disponibile, si riportano le seguenti caratteristiche generali del modello, nella release attuale (FEFLOW 7.0):

- discretizzazione con mesh tridimensionale agli elementi finiti, triangolari o quadrangolari;
- simulazione in zona satura ed in zona non satura;
- simulazione in mezzi porosi e fratturati, con possibilità di assegnazione differenziata delle 3 componenti vettoriali dell'ellissoide di conducibilità idraulica;
- simulazione di elementi discreti (pozzi, fratture, tubazioni, condotti carsici, ecc.) con approccio idraulico alla Manning-Strichler all'interno del sistema di flusso per filtrazione.
- simulazione di trasporto con fluidi di densità diverse per temperatura o concentrazione salina, flusso "density dependent";
- flusso e trasporto di fluidi a viscosità variabile;
- simulazione dei processi di trasporto degli inquinanti, con integrazione di un'estesa tipologia di reazioni chimiche e meccanismi di degradazione;
- simulazione del flusso di calore, per conduzione, convezione, trasporto; simulazione di scambiatori di calore e sonde geotermiche.

L'applicazione di FEFLOW, è adatta a simulare ogni condizione riscontrabile per i siti in oggetto, includendo il codice di calcolo moduli per l'inserimento di reti complesse di drenaggio superficiale, pozzi di pompaggio, pozzi di iniezione, barriere lineari semipermeabili o impermeabili, strutture impermeabilizzate sotto falda.

Le simulazioni sono state eseguite in regime quasi-stazionario e in regime transitorio.

20.3.3 Dati di input e modello concettuale di riferimento

I modelli di flusso sono stati implementati, per gli ambiti di riferimento delle traverse 4 e 5, sulla base dei dati geologici, idrogeologici e geometrici descritti nei capitoli precedenti.

Riassumendo in breve quanto riportato più sopra, le aree interessate sono caratterizzate dalla presenza di un sistema multifalda piuttosto complesso in cui non sempre è agevole distinguere la base dell'acquifero freatico. Infatti vi sono alternanze di depositi sabbiosi o sabbioso limosi in varia misura permeabili alternati con livelli limoso-argillosi che fungono da acquiclude. Si intende che spostandosi da monte verso valle, ovvero da ovest verso est, tendenzialmente si riduce la consistenza e la granulometria dei livelli più permeabili. La base dell'acquifero superficiale è generalmente posta a una profondità minore di 40-50 m, variando in funzione della distribuzione, apparentemente casuale, ma in realtà legate all'evoluzione paleogeografica degli alvei principali, delle lenti limoso-argillose

In alcuni settori, per altro, la presenza di coltri superficiali limoso-argillose determina una condizione di semiconfinamento della prima falda, che in questi casi non può più essere definita freatica in senso stretto.

Per quanto riguarda i parametri idrodinamici il riferimento principale resta lo studio del Servizio Geologico dell'Emilia-Romagna - Interreg IIIB Medocc 2007 – che su un numero piuttosto elevato, poco meno di 30, di prove di pompaggio nell'area di Guastalla-Boretto, restituisce valori di permeabilità per lo più compresi tra $1*10^{-4}$ e $1*10^{-3}$ m/s (valore massimo $2,24*10^{-3}$ m/s) .

Il tracciato della rete di drenaggio esistente è stato dedotto sulla base delle informazioni fornite dai Consorzi di Bonifica.

Per quanto riguarda i livelli idrometrici del Po si è fatto rifermento alle simulazioni di progetto in condizioni di deflusso pari alla Q182.

20.3.4 Implementazione dei modelli numerici di flusso

Traversa 4 - Area di modello e griglia di calcolo

Nel dettaglio, l'area di modello è stata definita con il seguente criterio:

- limite di monte (W) e di valle (E) corrispondenti alle quote della falda di progetto ai rispettivi margini;
- limiti laterali (N, S) corrispondenti principalmente a elementi della rete esterna di canali, o, dove non disponibili, a linee di flusso (ortogonali alle isopiezometriche).

In Figura 398 e in Figura 399, sono riportate le griglie di modello, agli elementi finiti triangolari, relative all'ambito "Traversa 4".

La griglia di modello è costituita da 158.713 nodi sul piano orizzontale, 3 slice, per un totale di 476.139 nodi.

La griglia è stata rifinita in corrispondenza della rete idrografica superficiale, ovvero della rete dei canali e delle sponde del fiume Po e del torrente Secchia. La dimensione della maglia (distanza internodale) varia da un minimo di 4 m nei suddetti settori di rifinitura, fino a un massimo di 30 m circa.

Sul piano verticale, le 3 slice suddividono 2 layer di modello, corrispondenti a due livelli stratigrafici localmente distinti in relazione al campo di conducibilità idraulica, come nel seguito riportato.



Figura 398 - Griglia di modello sul piano orizzontale (area Traversa 4)

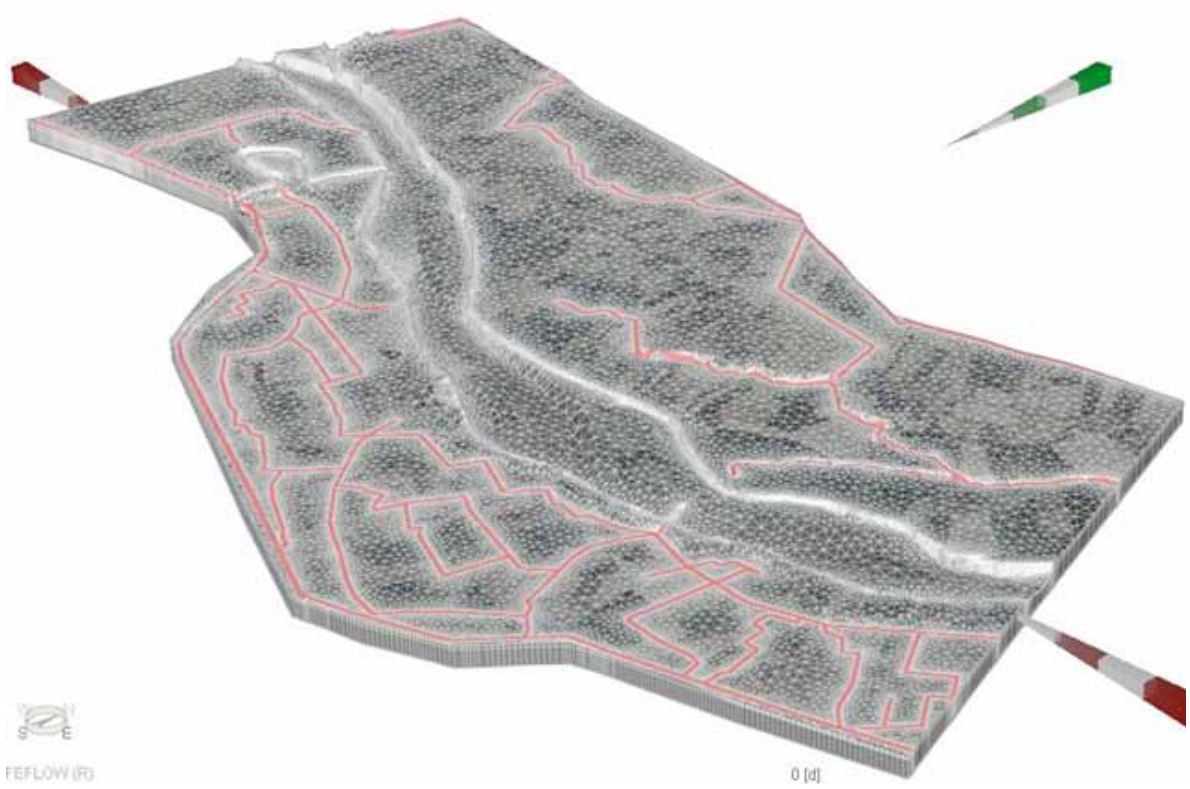


Figura 399 - Griglia di modello tridimensionale (area Traversa 4)

Traversa 4 - Schematizzazione stratigrafica e campo della conducibilità idraulica

Lo schema degli acquiferi, come da modello concettuale di riferimento, si caratterizza per un acquifero a falda libera fino alla profondità di 25 m circa, a partire dalla quale si riscontrano livelli di transizione con l'acquitardo di base.

Il dominio sul piano verticale è stato suddiviso in due layer, di spessore medio rispettivamente di 5 m (layer 1) e 20 m (layer 2).

Il layer 1 è stato inserito per poter tenere conto delle lenti superficiali a bassa conducibilità idraulica ricavate dal modello geologico.

I layer 1-2 costituiscono l'acquifero sabbioso a falda libera (colore rosso in Figura 400) , o semiconfinato dove è presente la lente a bassa permeabilità superficiale, limosa e limoso-sabbiosa, nel caso localizzata sul layer 1 superficiale a spessore costante (colore viola in Figura 400).

Sulla base sempre dello schema concettuale di riferimento, la conducibilità idraulica è stata inserita nel modello come segue (Figura 400):

- acquifero sabbioso K = $2*10^{-4}$ m/s (scenario A);
- acquitardo superficiale (lente discontinua) K = $1*10^{-5}$ m/s.

Ai fini di una stima cautelativa degli interscambi tra acque superficiali e sotterranee, considerata l'incertezza e la significatività di tale parametro per il calcolo del bilancio, tutte le simulazioni sono state eseguite anche sulla base del valore di permeabilità:

acquifero sabbioso K = $5*10^{-4}$ m/s (scenario B).

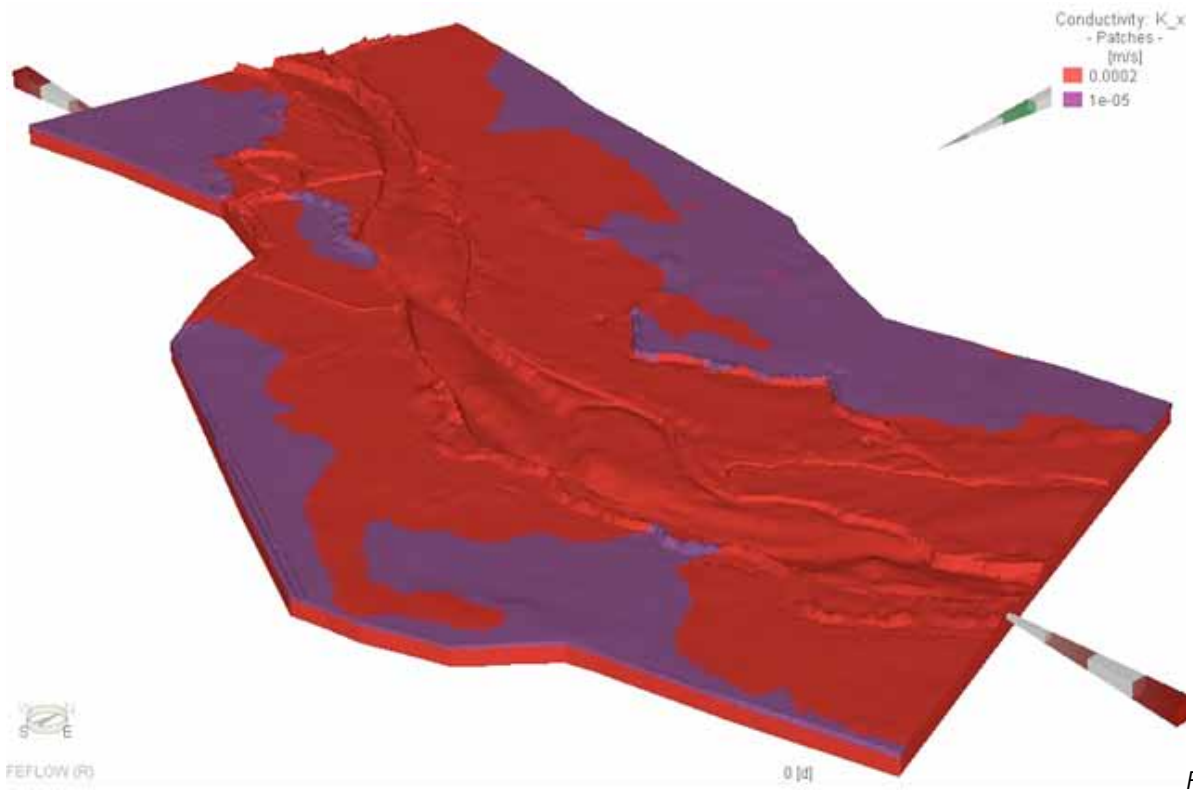


*Figura 400 - Campo della conducibilità idraulica (Scenario "A"). Nota: per il calcolo del bilancio sono state eseguite ulteriori simulazione sulla base, per l'acquifero sabbioso (colore rosso in figura), del valore di permeabilità: K = 5*10-4 m/s (scenario B)*

Traversa 4 - Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno del modello di flusso sono riportate nella Figura 402. Con riferimento a quanto già riportato per la definizione dell'area esterna di modello, le suddette condizioni sono:

a) condizione di carico imposto, in m s.m. (Head BC, Condizione I° tipo o di Dirichlet) ai limiti di monte (W) e di valle (E);

b) condizione Head BC (m) con valore in metri pari alla quota di pelo libero nei canali, assunta, in questa fase di progetto, inferiore alla quota di p.c. di un'altezza compresa tra 1,0-1,5 m a seconda dei settori, sulla base di valutazioni speditive dall'attività di campo;

c) condizione "inflow on top" (mm/a) sulla slice 1 di modello; a riguardo per simulare l'effetto di ricarica sono stati valutati due differenti scenari:

a. infiltrazione costante, in regime stazionario, di una lama pari a 100 mm/a;

b. infiltrazione 100 mm/a nel semestre non irriguo, infiltrazione pari a 400 mm/a per il semestre irriguo – simulazione in regime transitorio.



Figura 401 - Rete dei canali di drenaggio superficiali

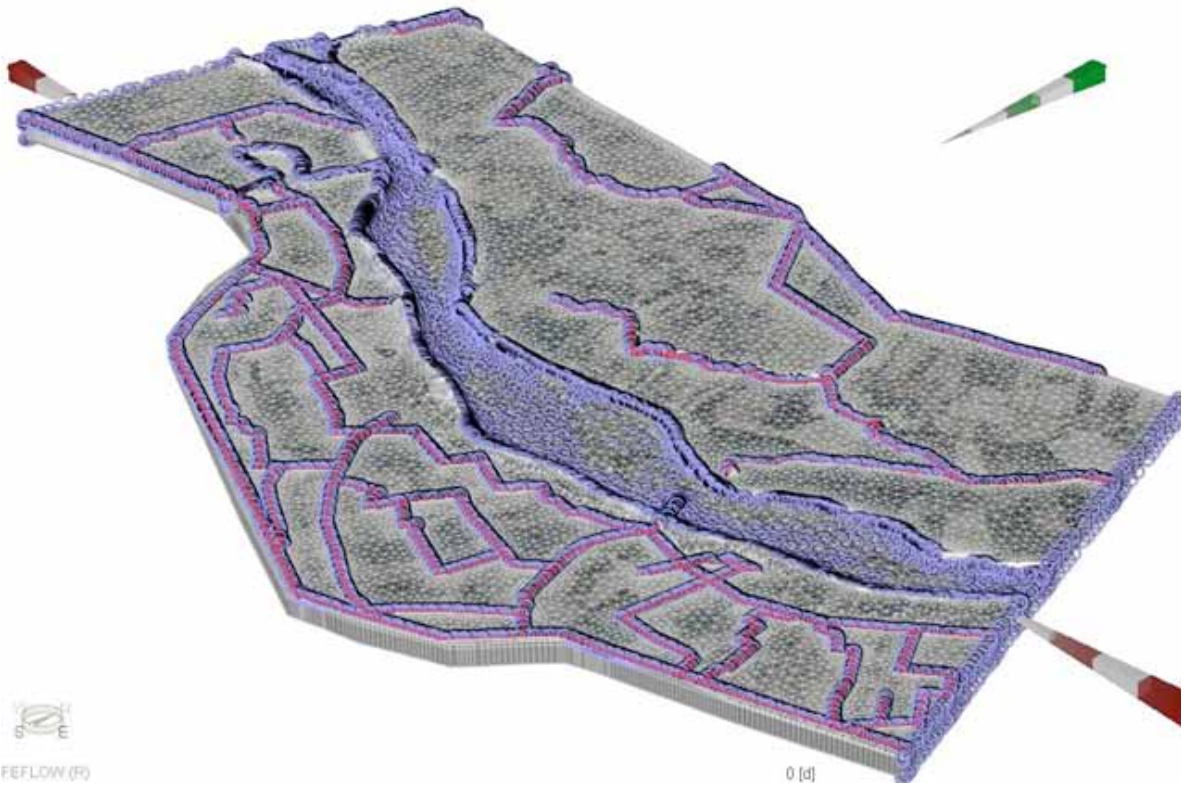


Figura 402 - Condizioni al contorno del modello (i cerchi azzurri rappresentano nodi di modello con assegnata Head BC)

Traversa 5 - Area di modello e griglia di calcolo

Il criterio di definizione della griglia di calcolo per l'area in oggetto è analogo a quello seguito per la traversa 4, alla cui descrizione già riportata più sopra si rimanda integralmente.

La griglia di modello è costituita da 87.187 nodi sul piano orizzontale, 3 slice, per un totale di 261.561 nodi.

La dimensione della maglia (distanza internodale) varia da un minimo di 4 m nei settori di rifinitura (sponde fiume Po e rete canali), fino a un massimo di 30 m circa.

Traversa 5- Schematizzazione stratigrafica e campo della conducibilità idraulica

Il dominio sul piano verticale, analogamente al modello della traversa 4, è stato suddiviso in due layer, di spessore medio rispettivamente di 5 m (layer 1) e 20 m (layer 2).

Il layer 1 è stato inserito per poter tenere conto delle lenti superficiali a bassa conducibilità idraulica sulla base del modello geologico ricostruito.

I layer 1-2 costituiscono l'acquifero sabbioso a falda libera (colore rosso in Figura 405) , o semiconfinato dove è presente la lente a bassa bermeabilità superficiale, limosa e limoso-sabbiosa, nel caso localizzata sul layer 1 superficiale a spessore costante (colore viola in Figura 405).

Sulla base sempre dello schema concettuale di riferimento, la conducibilità idraulica è stata caratterizzata come segue (Figura 405):

acquifero sabbioso K = $2*10^{-4}$ m/s (scenario A);

acquitardo superficiale (lente discontinua) K = $1*10^{-5}$ m/s.

Ai fini di una stima cautelativa degli interscambi tra acque superficiali e sotterranee, considerata l'incertezza e la significatività di tale parametro per il calcolo del bilancio, sono state eseguite ulteriori simulazioni sulla base del valore di permeabilità:

acquifero sabbioso K = $5*10^{-4}$ m/s (scenario B).

Traversa 5 - Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono state definite con criterio analogo al modello traversa 4:

a) condizione di carico imposto, in m s.m. (Head BC, Condizione I° tipo o di Dirichlet) ai limiti di monte (W) e di valle (E);

b) condizione Head BC (m) con valore in m pari alla quota di pelo libero nei canali, assunta, in questa fase di progetto, inferiore alla quota di p.c. di un'altezza compresa tra 1.0-1.5 m a seconda dei settori, sulla base di valutazioni speditive dall'attività di campo;

c) condizione "inflow on top" (mm/a) sulla slice 1 di modello; a riguardo per simulare l'effetto di ricarica sono stati valutati due differenti scenari:

a. Infiltrazione costante, in regime stazionario, di una lama pari a 100 mm/a;

b. Infiltrazione 100 mm/a nel semestre non irriguo, infiltrazione pari a 400 mm/a per il semestre irriguo.



Figura 403 Griglia di modello sul piano orizzontale per la Traversa 5

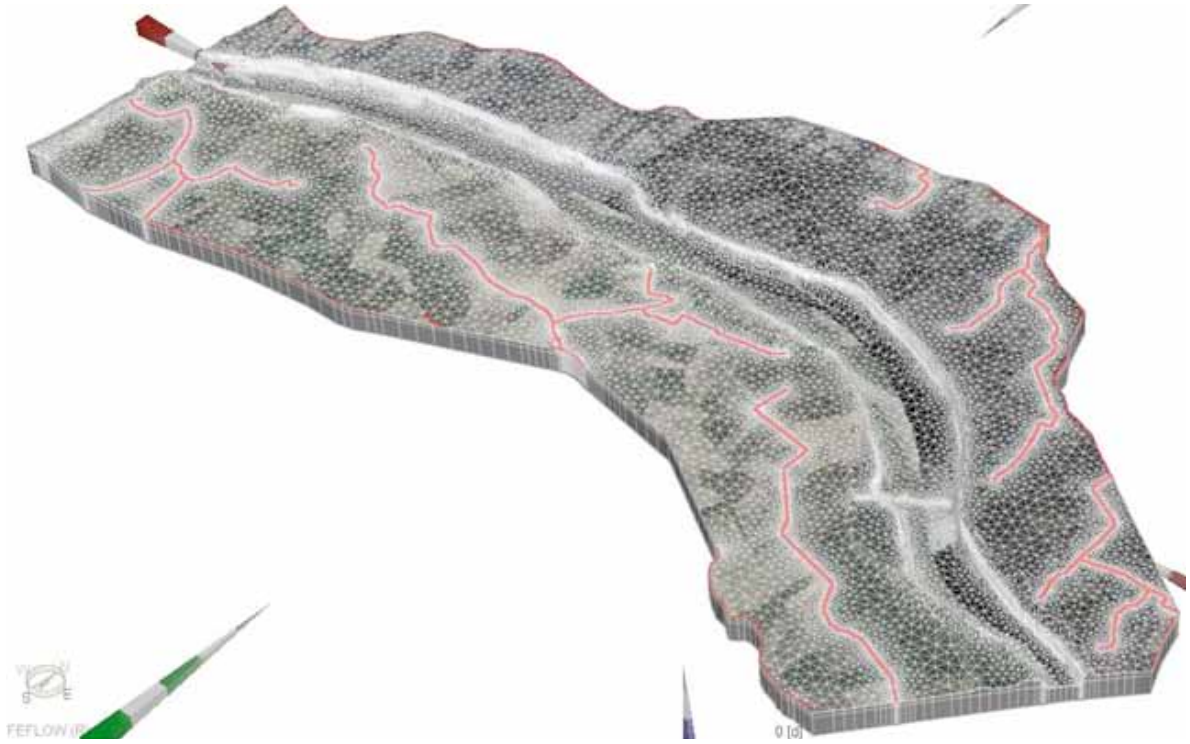


Figura 404 Griglia di modello tridimensionale (Traversa 5)

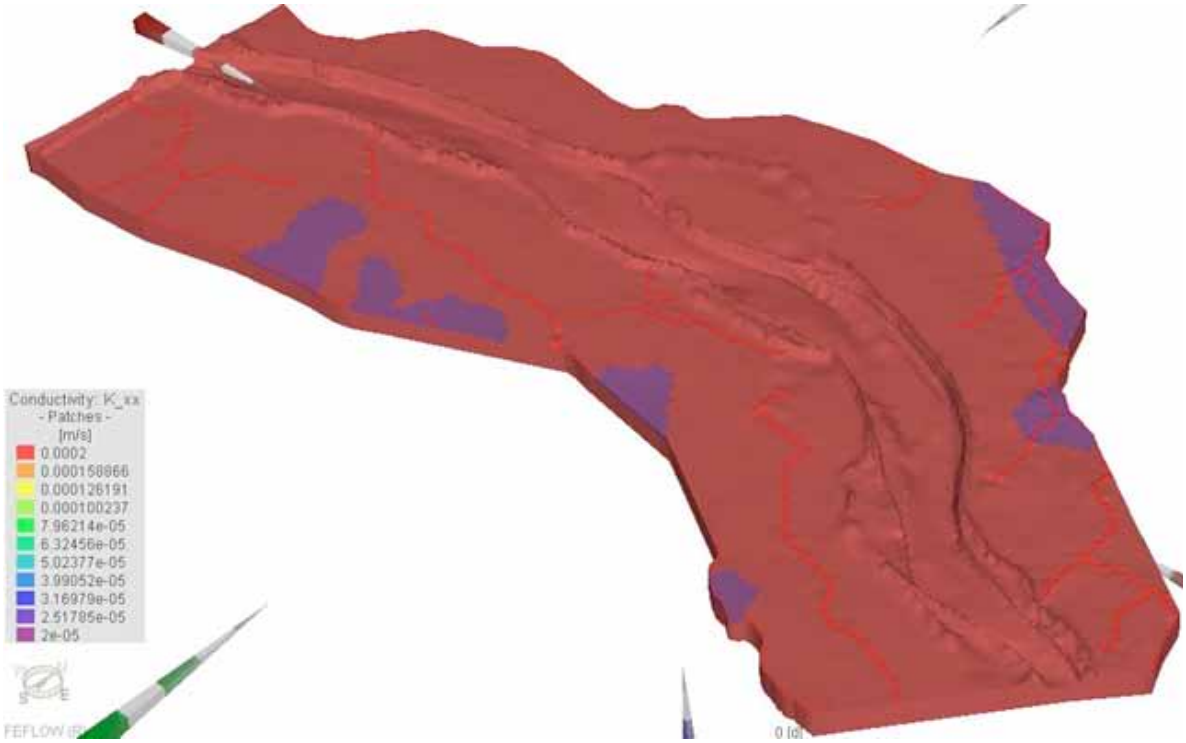


*Figura 405 Campo della conducibilità idraulica. Nota: per il calcolo del bilancio sono state eseguite ulteriori simulazione sulla base, per l'acquifero sabbioso (colore rosso in figura), del valore di permeabilità: K = 5*10-4 m/s (scenario B)*



Figura 406 - Rete dei canali di drenaggio superficiali

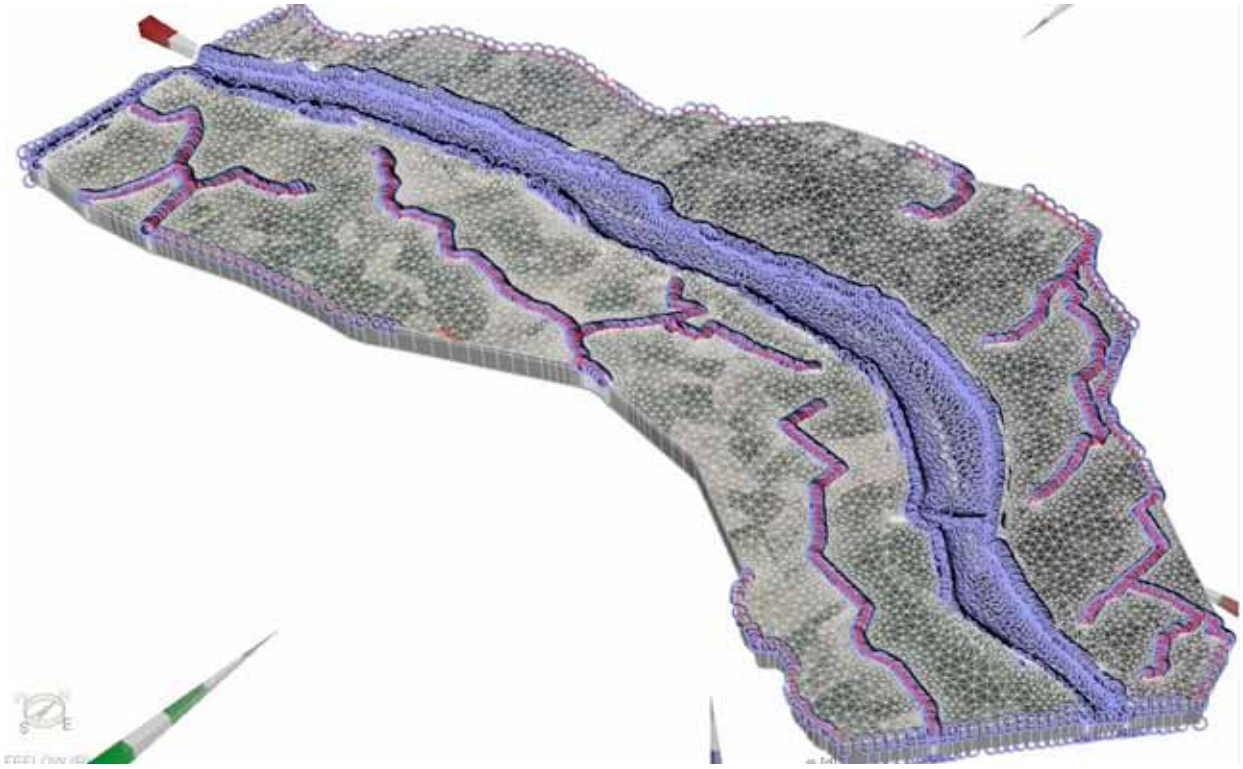


Figura 407 - Condizioni al contorno del modello (i cerchi azzurri rappresentano nodi di modello con assegnata Head BC)

20.3.5 Risultati delle simulazioni nello scenario di progetto

I risultati delle simulazioni sono riferiti ai seguenti scenari:

a) Infiltrazione

- Condizione "inflow on top" (mm/a) sulla slice 1 di modello; a riguardo per simulare l'effetto di ricarica sono stati valutati due differenti opzioni:
  - infiltrazione costante, in regime quasi-stazionario, di una lama netta pari a 100 mm/a;
  - infiltrazione 100 mm/a nel semestre non irriguo, infiltrazione netta pari a 400 mm/a per il semestre irriguo – simulazione in regime transitorio.

b) Conducibilità idraulica

- I due scenari di infiltrazione sono stati simulati per i valori di conducibilità idraulica dell'acquifero sabbioso pari a:
- $K = 2*10^{-4}$ m/s (scenario A)
- $K = 5*10^{-4}$ m/s (scenario B)

Traversa 4 - Simulazione scenario con infiltrazione costante

In Figura 408 e Figura 409, è riportata la piezometria simulata per lo scenario di progetto.

Nelle successive Figura 410 e Figura 411 sono rappresentate, rispettivamente, le aree interessate da affioramento della falda e da soggiacenza inferiore a 0,5 m.

Gli output di modello sono riferiti alla simulazione effettuata con il valore inferiore di conducibilità idraulica dell'acquifero (A: $K=2*10^{-4}$ m/s), cautelativo in quanto caratterizzato, rispetto allo scenario B, da livelli di falda lievemente superiori.

Si può notare come nella condizione di progetto l'affioramento o subaffioramento della falda riguardi:

in destra Po, settori marginali dell'abitato di Quingentole, oltre ad abitazioni isolate in posizione immediatamente retro arginale;

in sinistra Po, nuclei isolati immediatamente a valle della foce Mincio (loc. Ca' Vecchia, Cabina, Malcantone, Sacchetta).

Non risultano invece esposti ad affioramento della falda gli abitati di Sustinente, Libiola, Torriana, sempre in sinistra Po.

Con riferimento alla Figura 414 e Figura 415 le portate drenate da falda dal complesso della rete di canali nella condizione di progetto, sono valutate tra 315 l/s (scenario A, K=2*10^{-4} m/s) e 760 l/s (scenario B, K=5*10^{-4} m/s).

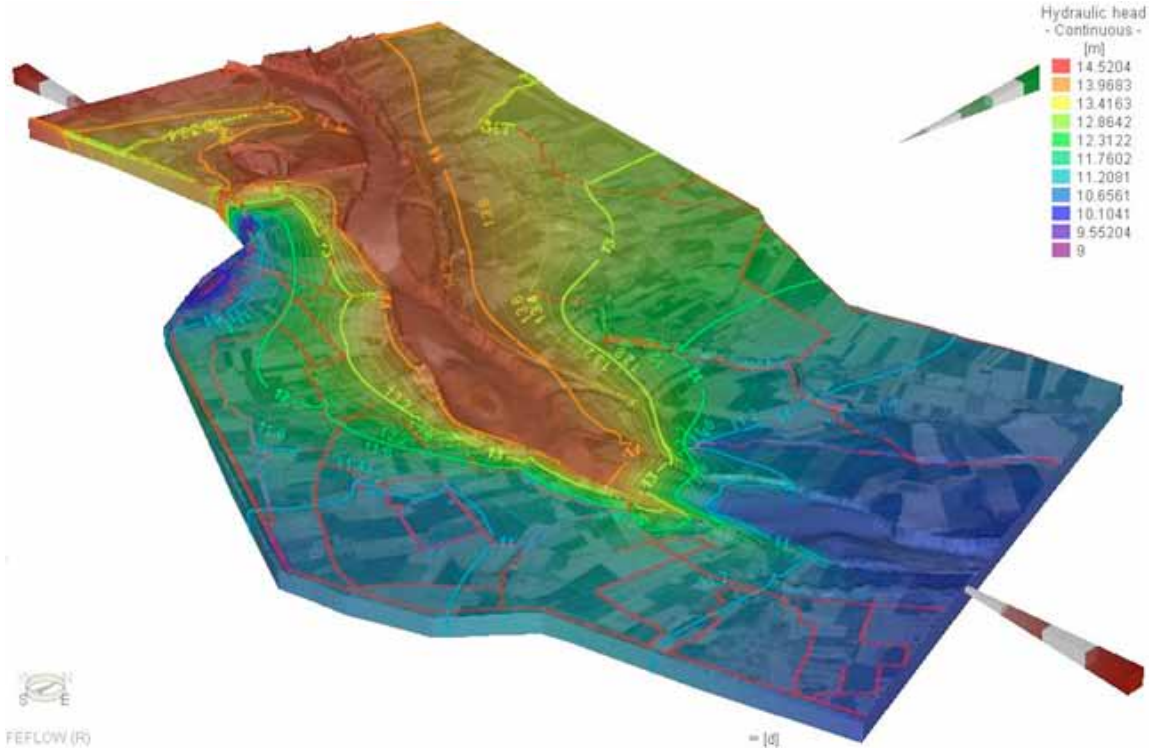


Figura 408 Piezometria nello scenario di progetto – Schema 3D

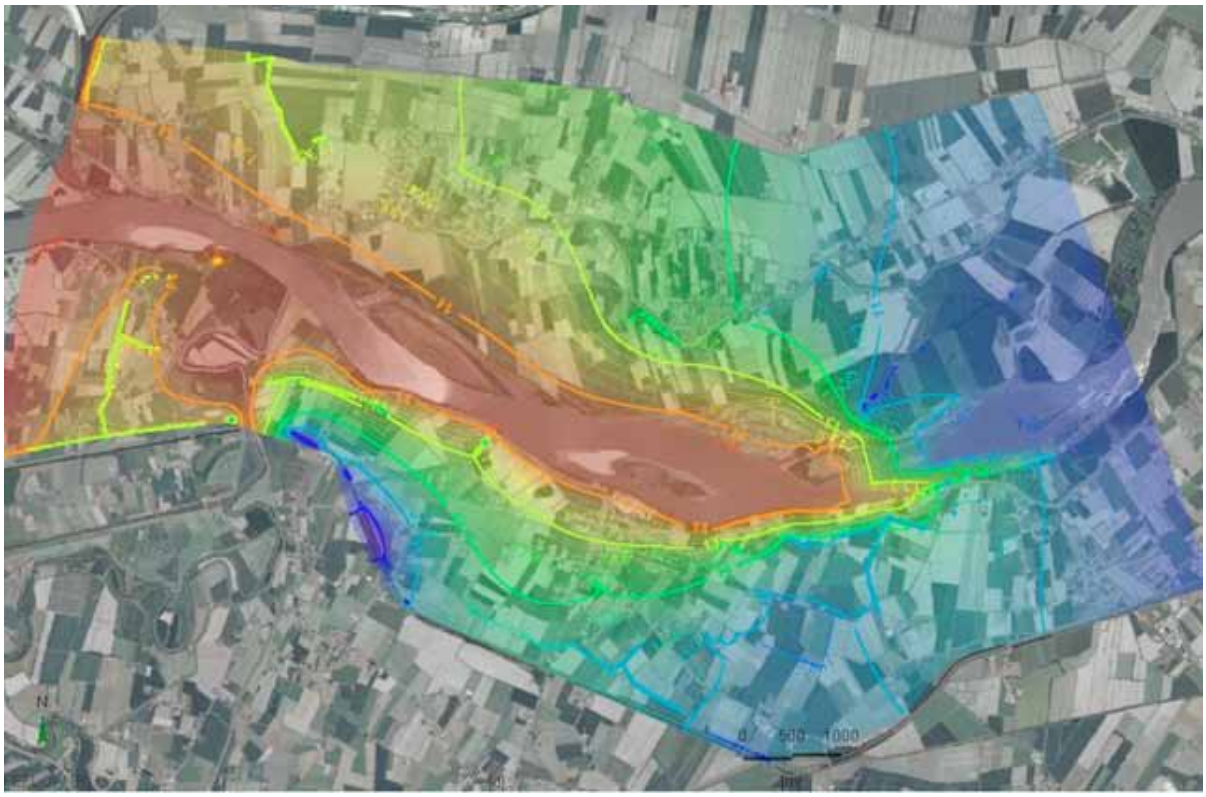


Figura 409 Piezometria nello scenario di progetto – Proiezione su Slice 1 di modello

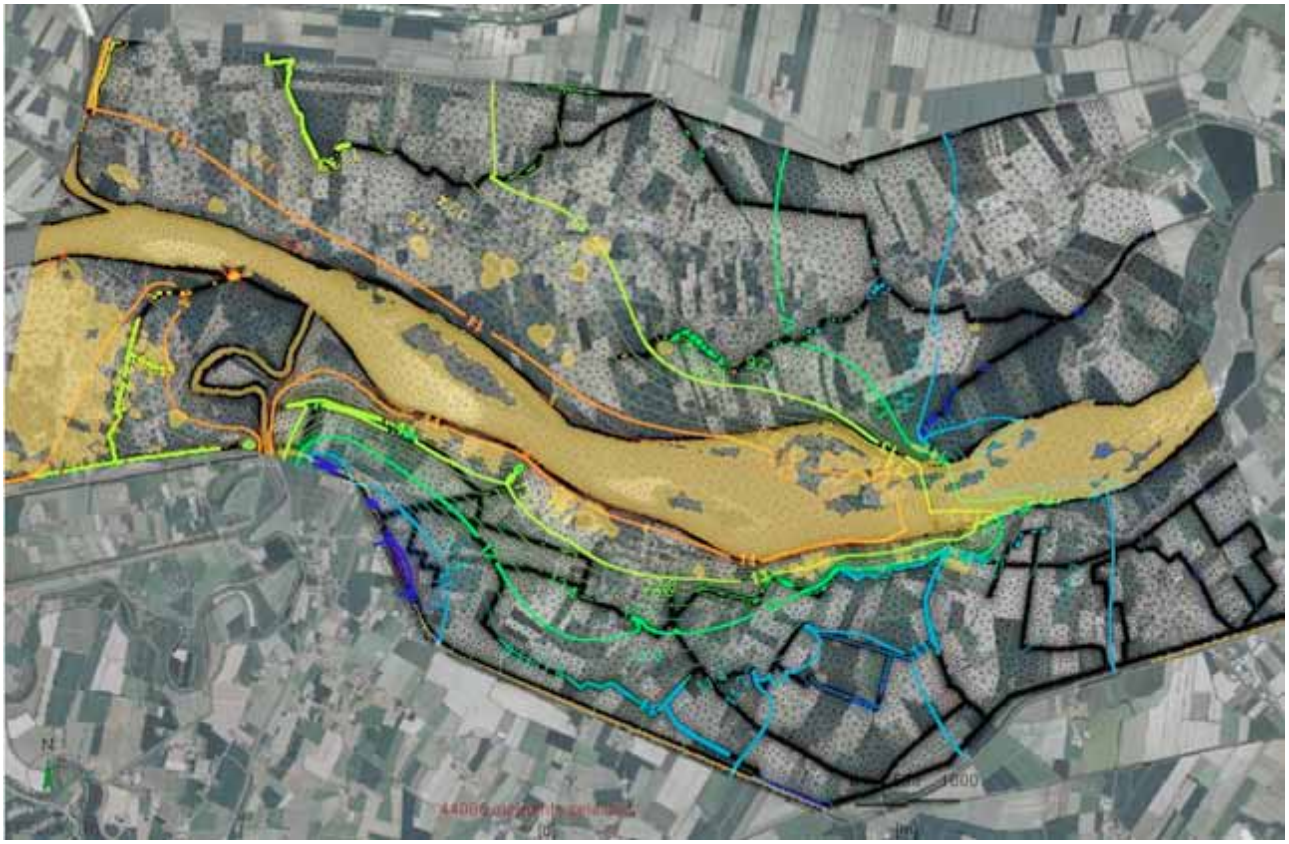


Figura 410 - Settori con falda affiorante (Head > elevation)

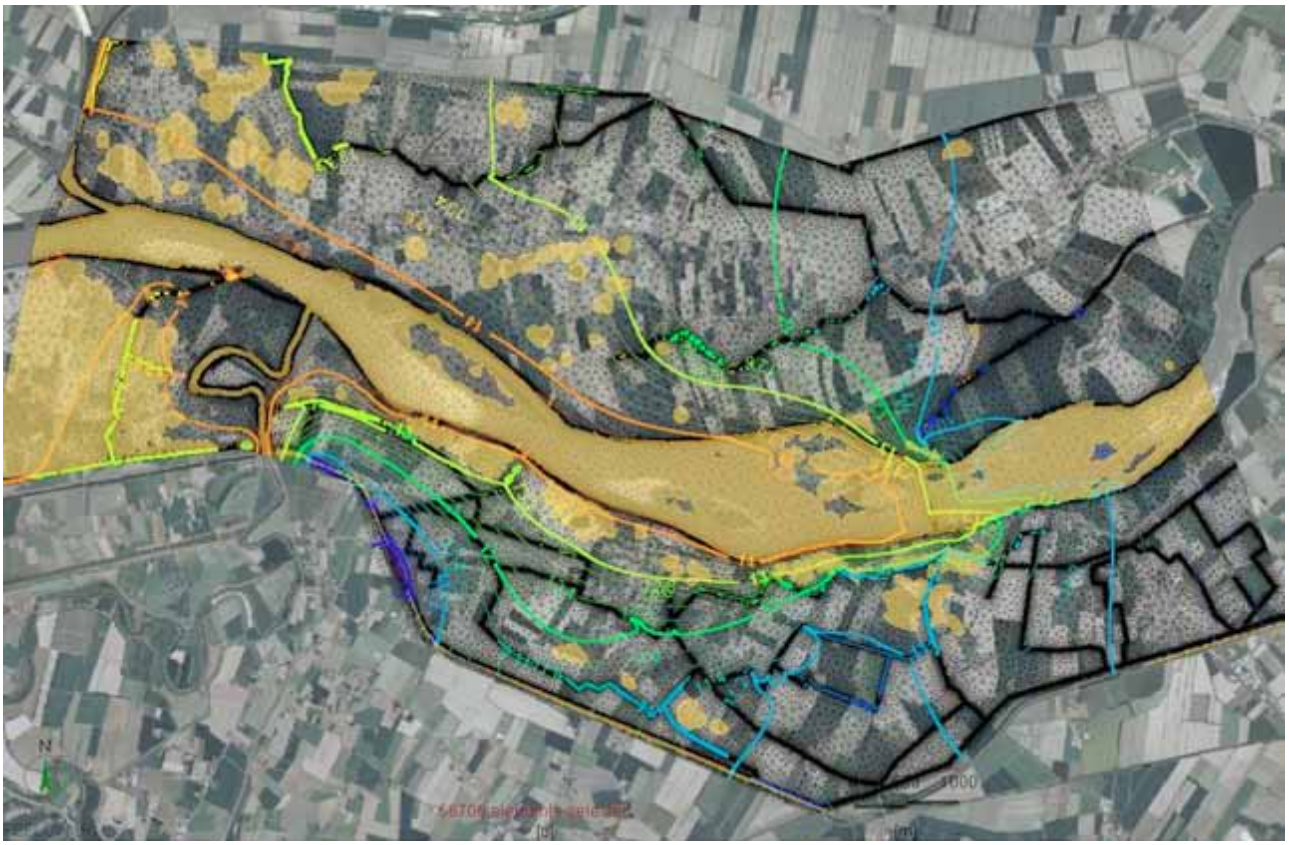


Figura 411 - Settori con soggiacenza falda < 0.5 m da p.c. (Head+0.5 > Elevation)

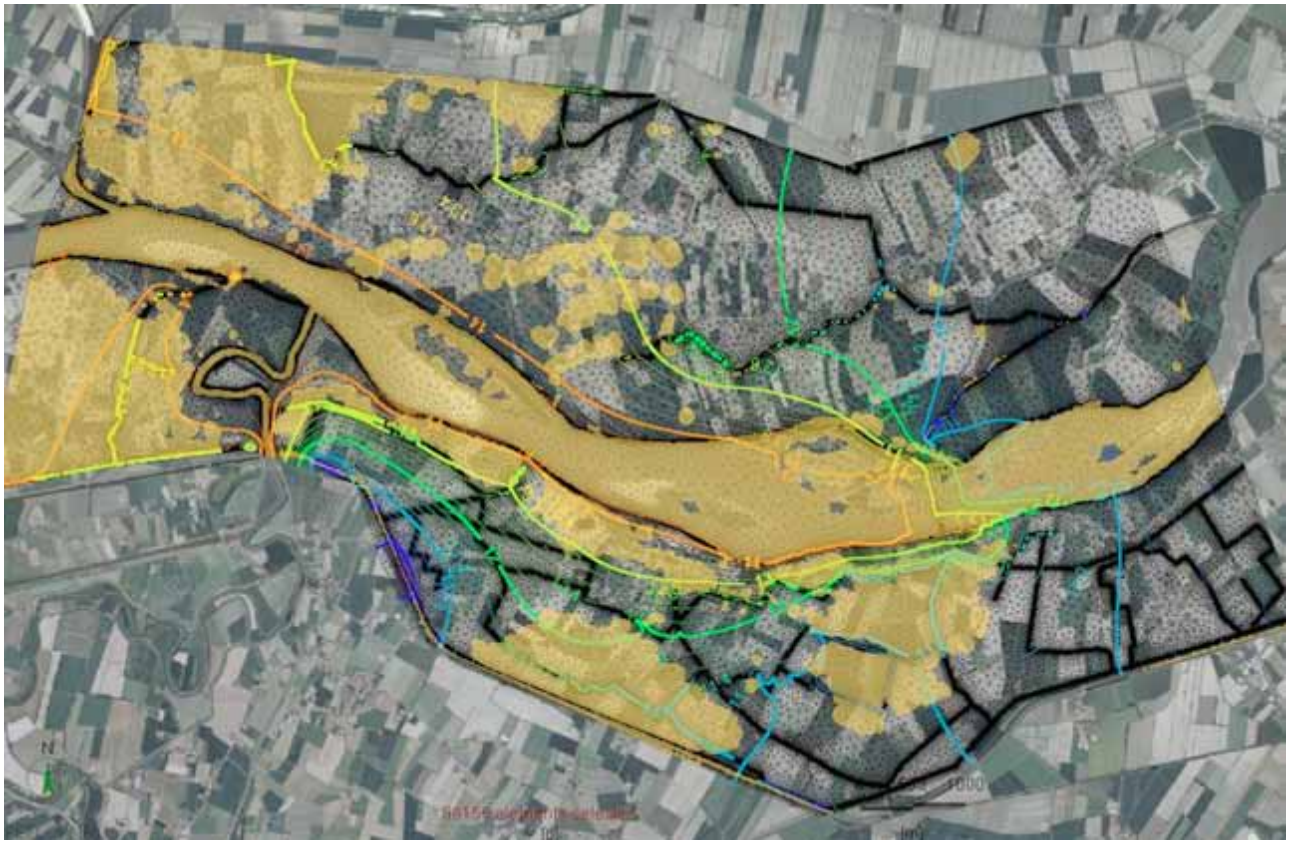


Figura 412 - Settori con soggiacenza falda < 1 m da p.c. (Head+1 > Elevation)



Figura 413 - Settori con soggiacenza falda < 1 m da p.c. (Head + 1 > Elevation) – Visualizzazione 3D

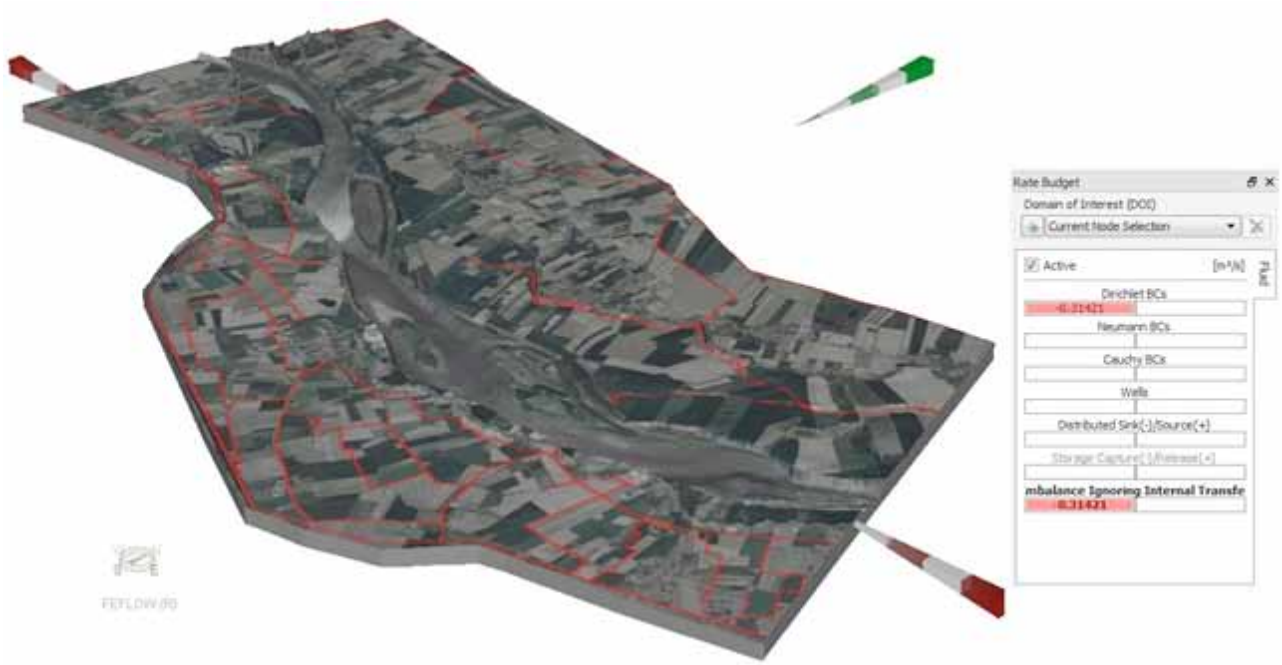


Figura 414 – Portate drenate dalla rete di canali nello stato di progetto (acquifero: K=2E-4 m/s)

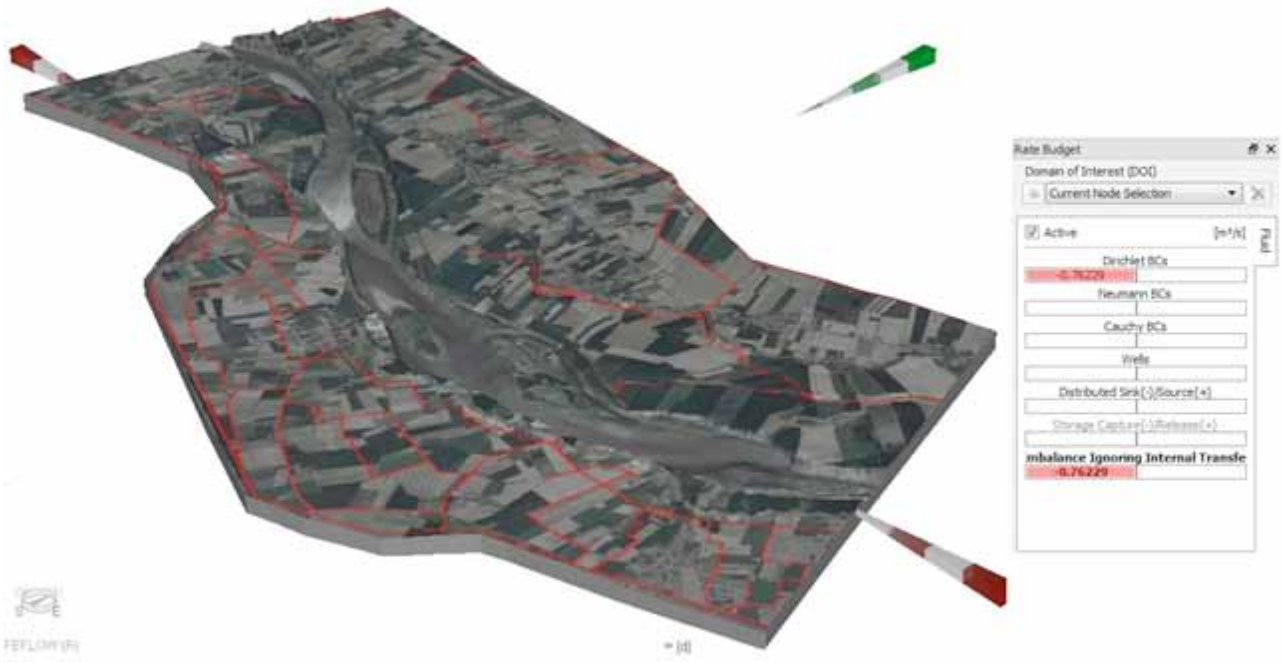


Figura 415 - Portate drenate dalla rete di canali nello stato di progetto (acquifero: K=5E-4 m/s)

Traversa 4 - Simulazione scenario di infiltrazione "massimo irriguo"

I risultati delle simulazioni per lo scenario cosiddetto "massimo irriguo", come precedentemente definito, sono riportati nella Figura 416.

A partire dalla piezometria iniziale, all'equilibrio con l'infiltrazione costante da p.c. pari a 100 mm/a, dal tempo t=0 viene simulata in regime transitorio un'infiltrazione netta pari a 400 mm/a.

Dal diagramma piezometrico nella medesima Figura 416 (localizzazione dei punti di controllo 1-2 in Figura 417), si osserva il raggiungimento dei massimi livelli piezometrici dopo 9-10 giorni circa dal tempo t=0. E' stata pertanto presa a riferimento per le rappresentazioni di quota falda e di soggiacenza delle figure successive, la condizione di massimo piezometrico per t=9 gg.

In Figura 417 e Figura 418 sono rappresentate, rispettivamente, le aree interessate da affioramento della falda e da soggiacenza inferiore a 0,5 m.

Per tale scenario, in raffronto con la situazione precedente, si osserva in particolare:

in destra Po, un'estensione maggiore delle aree allagate immediatamente a tergo del rilevato arginale, nell'intorno di Quingentole, e di ampi settori con abitazioni e nuclei isolati;

un netto incremento, in sinistra Po, delle aree a falda affiorante immediatamente a valle della foce Mincio a costituire un'area pressoché continua fino allo Scolo Fisseretto, nell'intorno di aree abitate (tra cui le loc. Ca' Vecchia, Cabina, Malcantone, Sacchetta, Canfore, Palazzone).

Non risultano invece esposti ad affioramento della falda anche per questo scenario gli abitati di Sustinente, Libiola, Torriana, sempre in sinistra Po.

Con riferimento alla Figura 420 e Figura 421, le portate drenate da falda dal complesso della rete di canali nella condizione di progetto, sono valutate n tra 470 l/s (scenario A, $K=2*10^{-4}$ m/s) e 930 l/s (scenario B, $K=5*10^{-4}$ m/s).

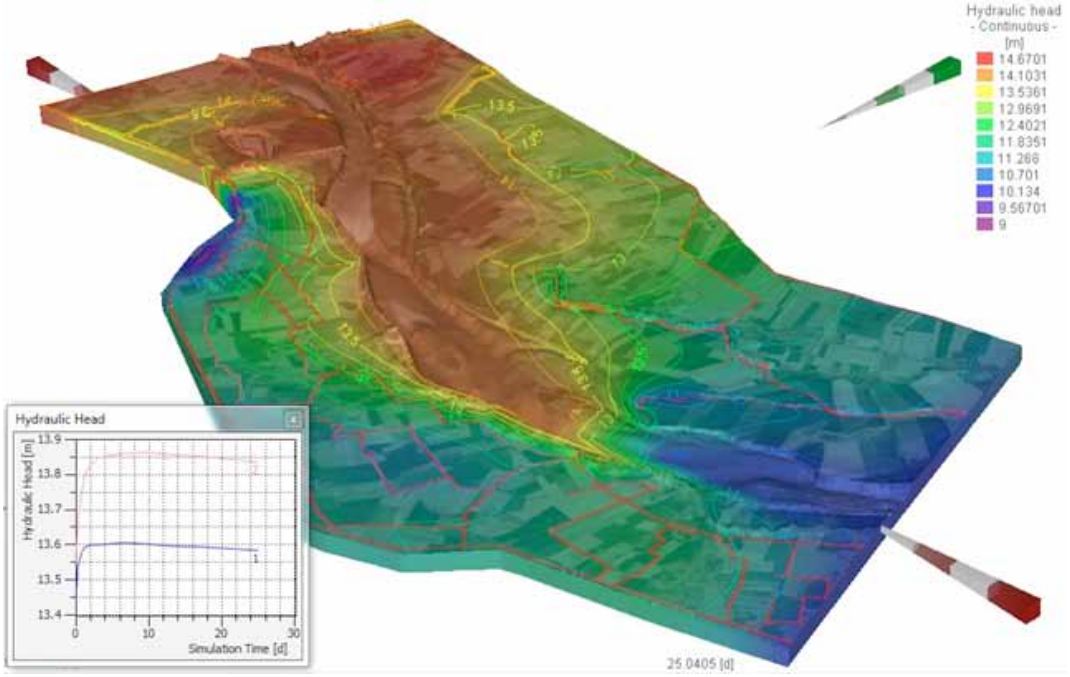


Figura 416 - Piezometria nello scenario di progetto – Schema 3D

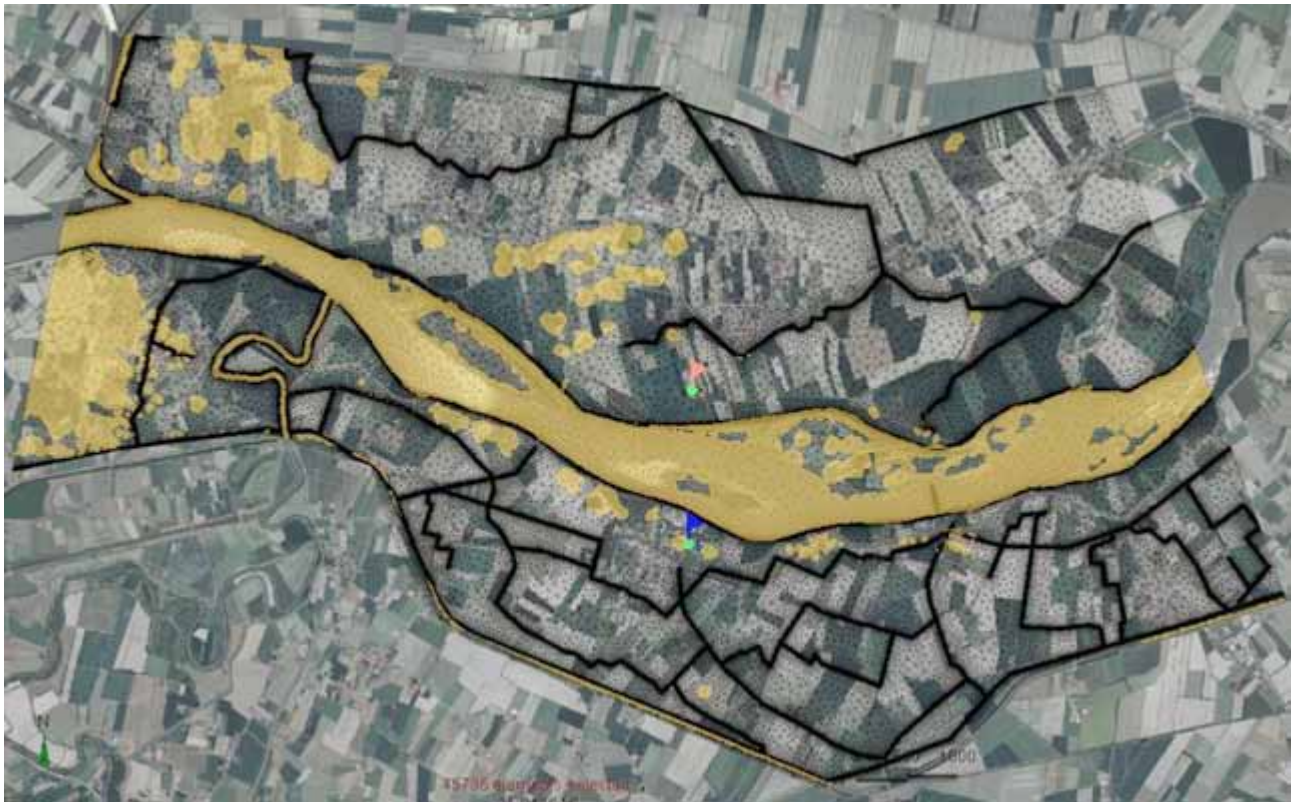


Figura 417 - Settori con falda affiorante (Head > elevation) – quota falda transitoria scenario "massimo irriguo"

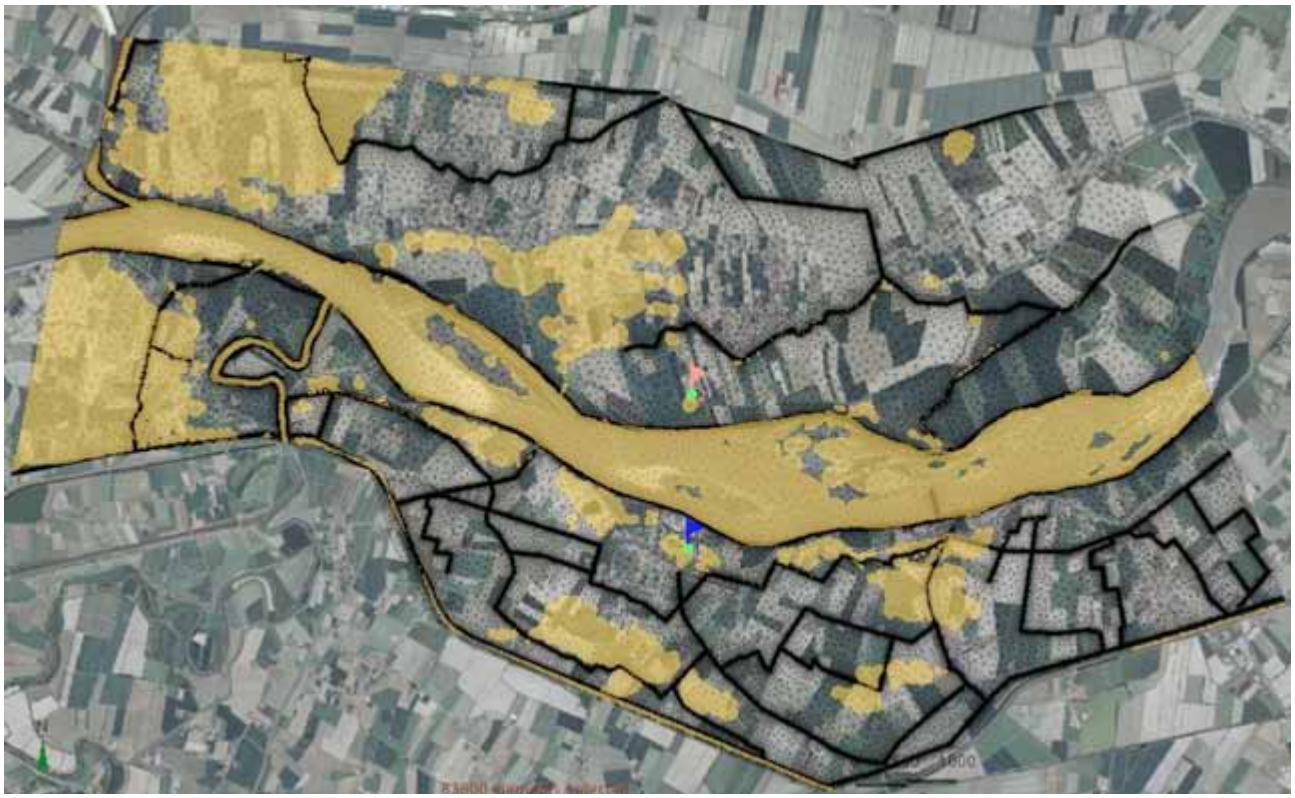


Figura 418 - Settori con soggiacenza falda < 0.5 m da p.c. (Head + 0.5 > Elevation) - quota falda transitoria scenario "massimo irriguo"



Figura 419 - Settori con soggiacenza falda < 1.0 m da p.c. (Head + 1.0 > Elevation) - quota falda transitoria scenario "massimo irriguo"

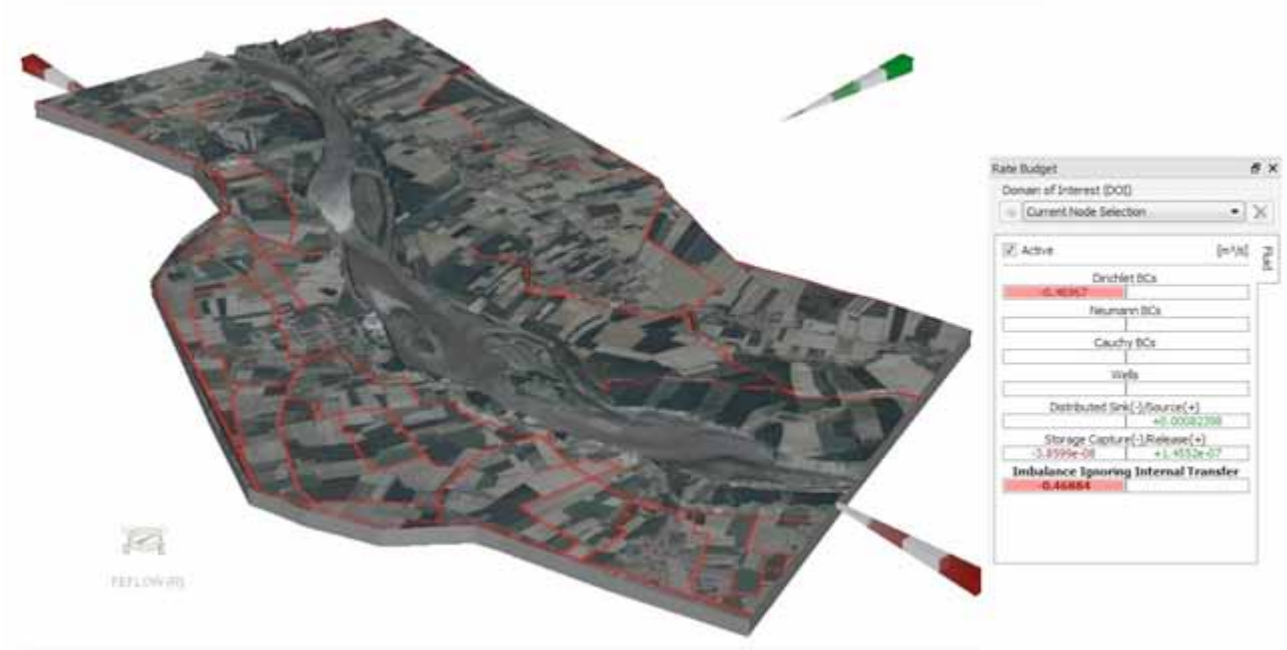


Figura 420 - Portate drenate dalla rete di canali nello stato di progetto – scenario "massimo irriguo" (acquifero: K=2E-4 m/s)

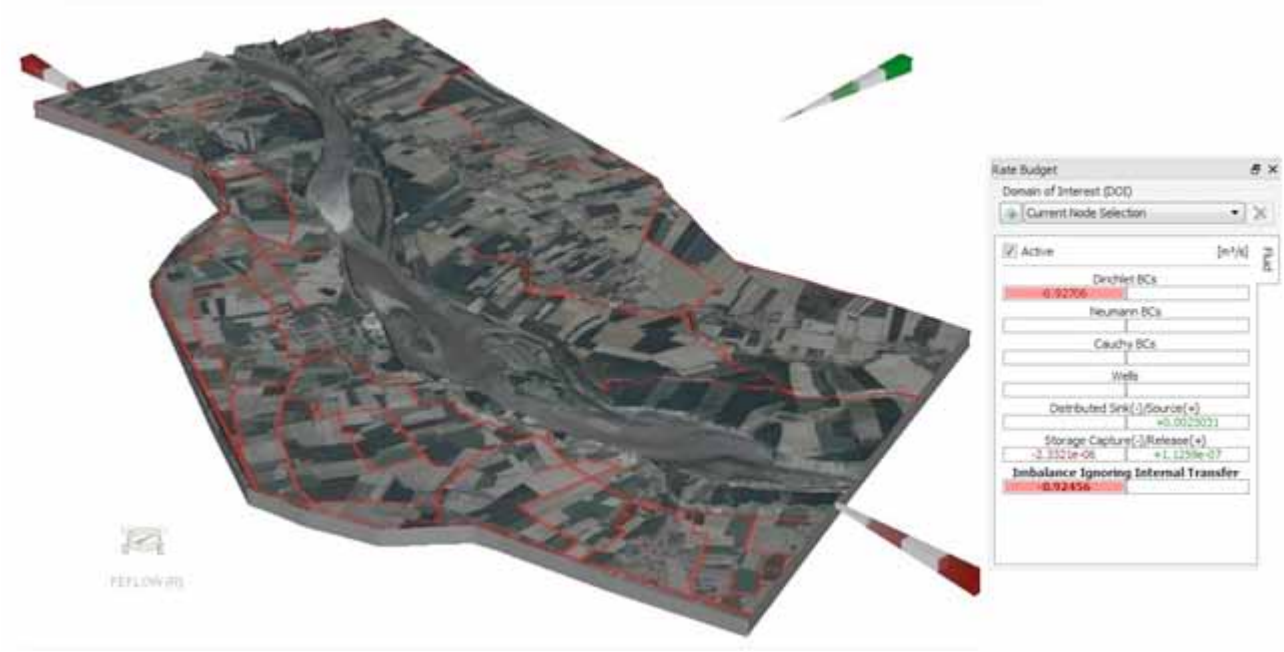


Figura 421 - Portate drenate dalla rete di canali nello stato di progetto – scenario "massimo irriguo" (acquifero: K=5E-4 m/s)

Traversa 5- Simulazione scenario di infiltrazione costante

In Figure 422 e 423 è riportata la piezometria simulata per lo scenario di progetto.

Nelle successive Figura 424 e Figura 425, sono rappresentate, rispettivamente, le aree interessate da affioramento della falda e da soggiacenza inferiore a 0,5 m.

Gli output di modello sono riferiti allo scenario con conducibilità idraulica dell'acquifero inferiore (scenario A: $K=2*10^{-4}$ m/s), cautelativo in quanto caratterizzato, rispetto allo scenario B, da livelli di falda lievemente superiori.

Si può notare come nella condizione di progetto l'affioramento o subaffioramento della falda riguardi estesi settori a tergo dell'argine maestro, sia in destra che in sinistra idrografica.

La problematica principale è riferita all'abitato di Stienta, in sinistra, in corrispondenza del quale dalla simulazione si evidenziano condizioni di falda a piano campagna. La medesima condizione interessa inoltre numerosi cascinali e abitazioni rurali isolate nell'immediata fascia retroarginale.

I nuclei, di Gaiba, Tommaselle, Pilastri (in sinistra) e Ravalle (in destra), non sono invece interessati da affioramento o subaffioramento della falda per lo scenario simulato.

Con riferimento alla Figura 427 e Figura 428 le portate drenate da falda dal complesso della rete di canali nella condizione di progetto, sono valutate dal modello tra 190 l/s (scenario A, $K=2*10^{-4}$ m/s) e 470 l/s (scenario B, $K=5*10^{-4}$ m/s).

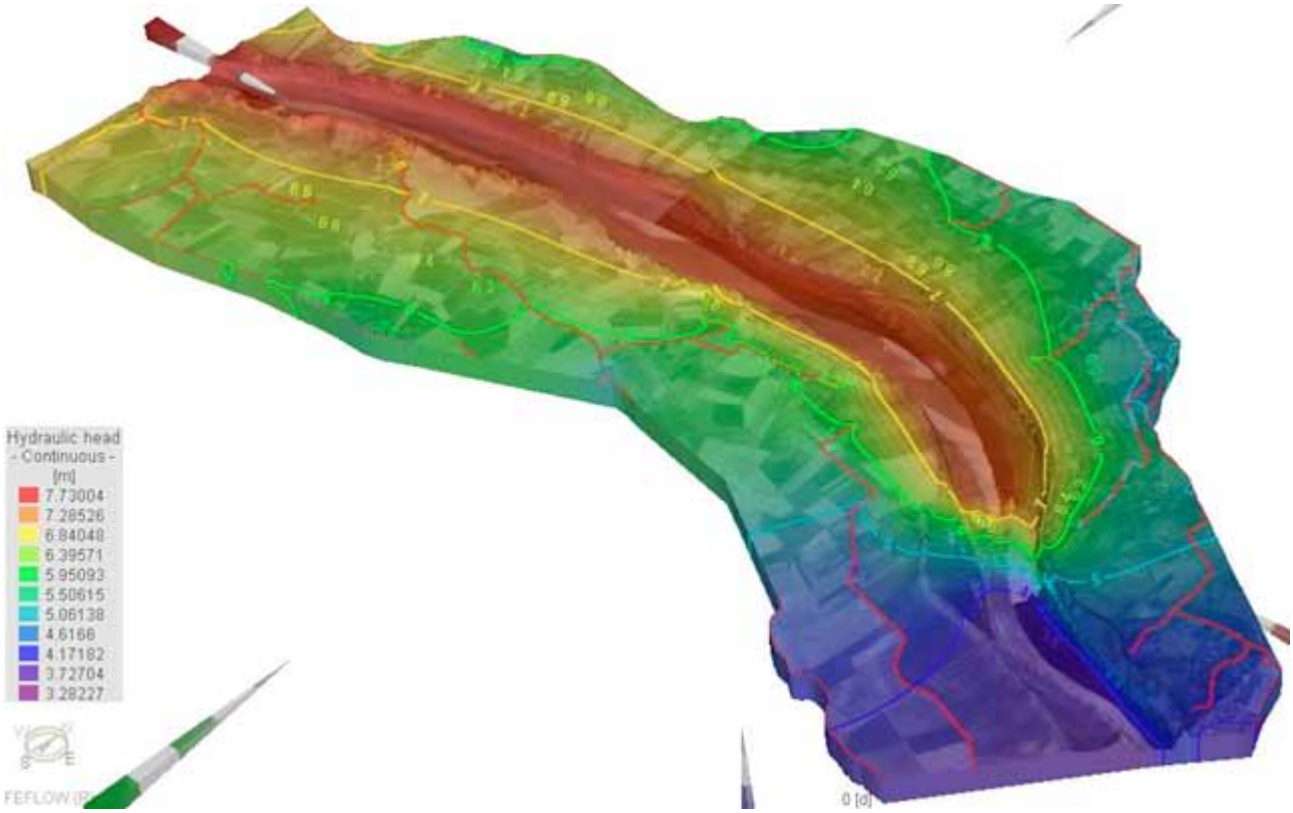


Figura 422 - Piezometria nello scenario di progetto – Schema 3D

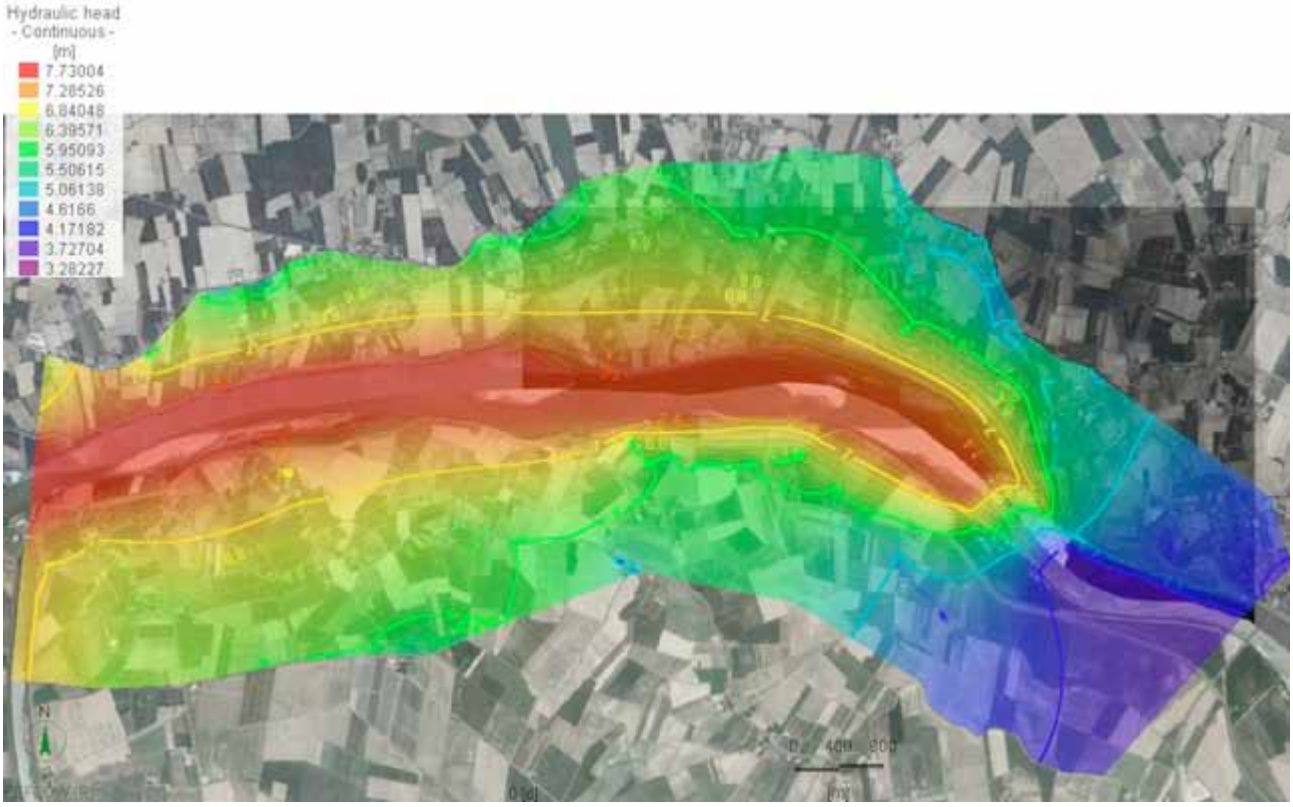


Figura 423 - Proiezione su Slice 1 di modello

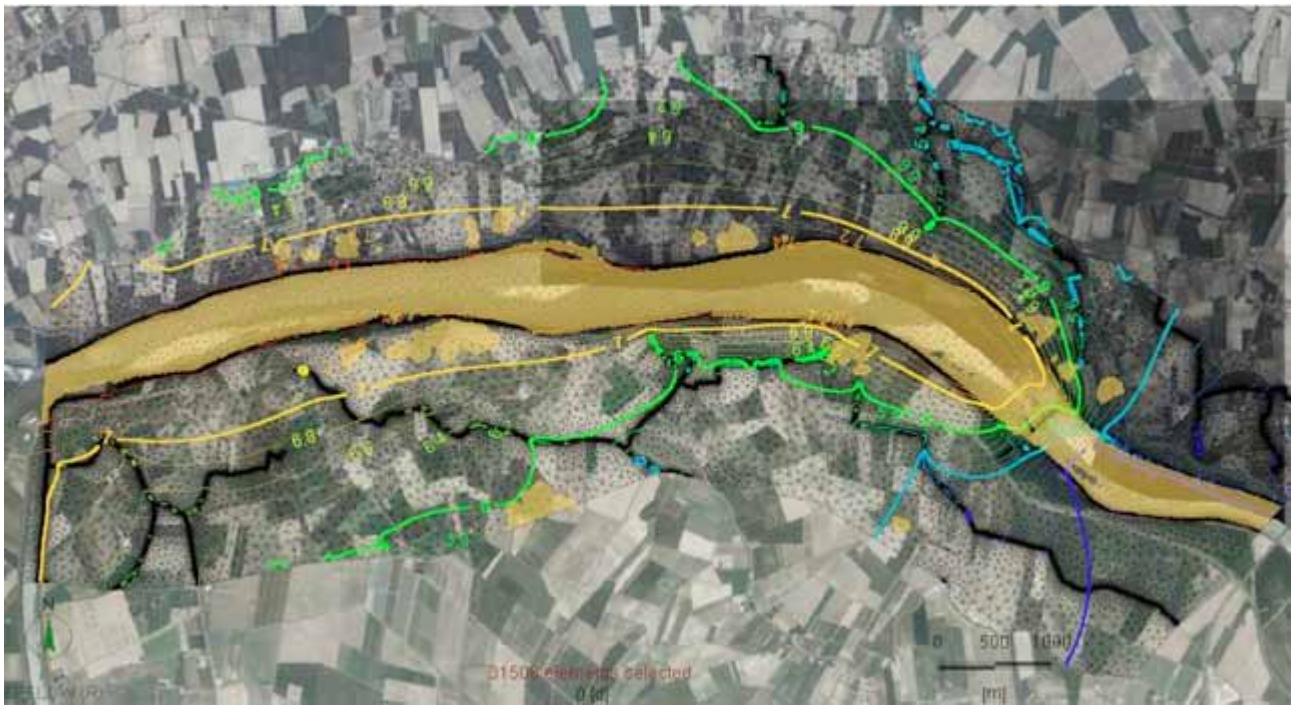


Figura 424 - Settori con falda affiorante (Head > elevation)

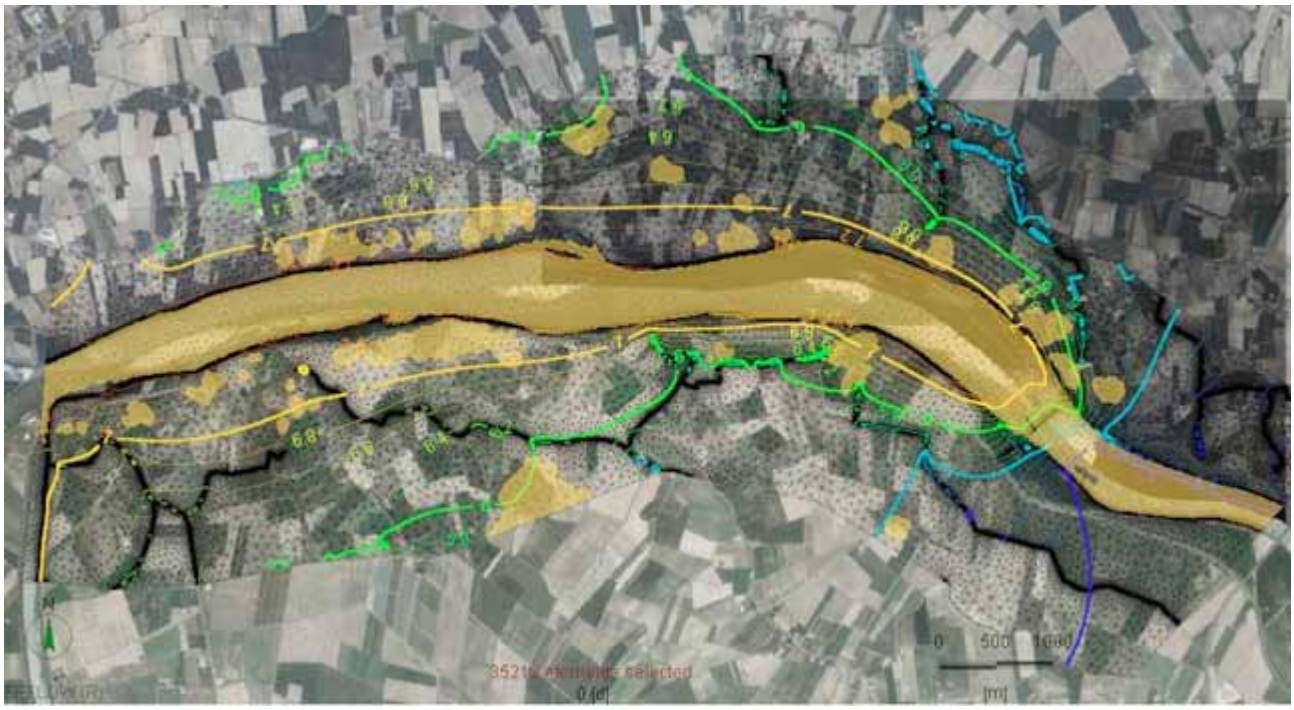


Figura 425 - Settori con soggiacenza falda < 0.5 m da p.c. (Head + 0.5 > Elevation)



Figura 426 - Settori con soggiacenza falda < 1 m da p.c. (Head + 1 > Elevation)



Figura 427 - Portate drenate dalla rete di canali nello stato di progetto (acquifero: K=2E-4 m/s)



Figura 428 - Portate drenate dalla rete di canali nello stato di progetto (acquifero: K=5E-4 m/s)

Traversa 5 - Scenario di infiltrazione "massimo irriguo"

I risultati delle simulazioni per lo scenario cosiddetto "massimo irriguo", come precedentemente definito, sono riportati nella Figura 425. A partire dalla piezometria iniziale, all'equilibrio con l'infiltrazione costante da p.c. pari a 100 mm/a, dal tempo t=0 viene simulata in regime transitorio un'infiltrazione netta pari a 400 mm/a.

Dal diagramma piezometrico nella medesima Figura 429 (localizzazione dei punti di controllo 1-2 in Figura 81), si osserva il raggiungimento dei massimi livelli piezometrici dopo 10 giorni circa dal tempo t=0. E' stata pertanto presa a riferimento per le rappresentazioni di quota falda e di soggiacenza delle figure successive, la condizione di massimo piezometrico per t=10 gg.

In

e Figura 431, sono rappresentate, rispettivamente, le aree interessate da affioramento della falda e da soggiacenza inferiore a 0,5 m.

Rispetto allo scenario a infiltrazione costante, per lo "scenario irriguo" si osserva, nei medesimi settori, una maggiore continuità ed estensione dei settori interessati da affioramento della falda. La situazione più problematica è ancora riferita all'abitato di Stienta, con un'estesa area di affioramento falda interna all'abitato. La medesima condizione interessa inoltre numerosi cascinali e abitazioni rurali isolati sia nella fascia retro arginale, con maggiore frequenza sino a distanza di oltre 400 m dall'argine stesso, ma osservabili entro porzioni e settori isolati in tutta l'area modellizzata.

I nuclei di Gaiba, Tommaselle, Pilastri (in sinistra) e Ravalle (in destra), non sono invece interessati da affioramento o subaffioramento falda anche per lo scenario in esame, pur risultando molto prossimi alle fasce allagate e con interessamento di edificati rurali isolati dai concentrici di pertinenza.

Con riferimento alla Figura 433 e Figura 434 le portate drenate da falda dal complesso della rete di canali nella condizione di progetto, sono valutate dal modello tra 390 l/s (scenario A, $K=2*10^{-4}$ m/s) e 680 l/s (scenario B, $K=5*10^{-4}$ m/s).

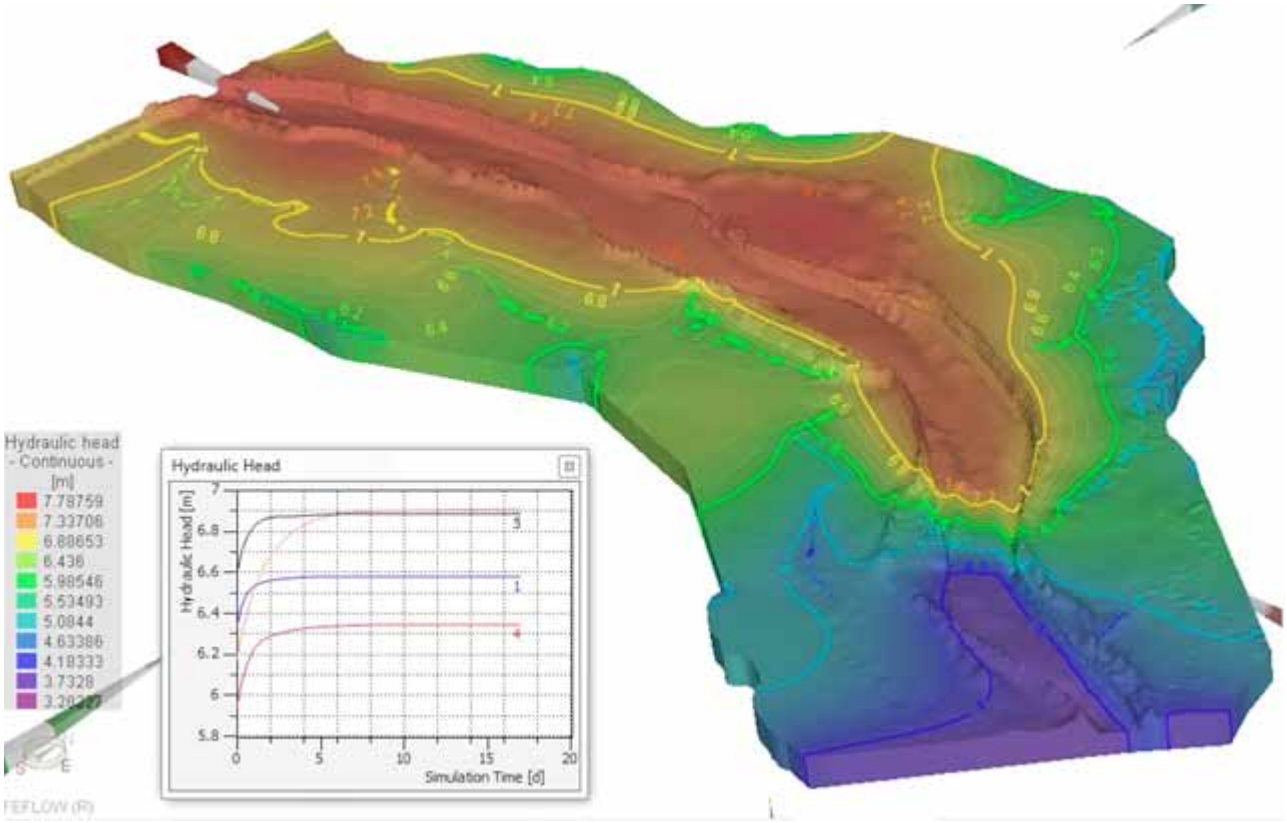


Figura 429 - Piezometria nello scenario di progetto (max piezometrico per t = 10 gg.) – Schema 3D

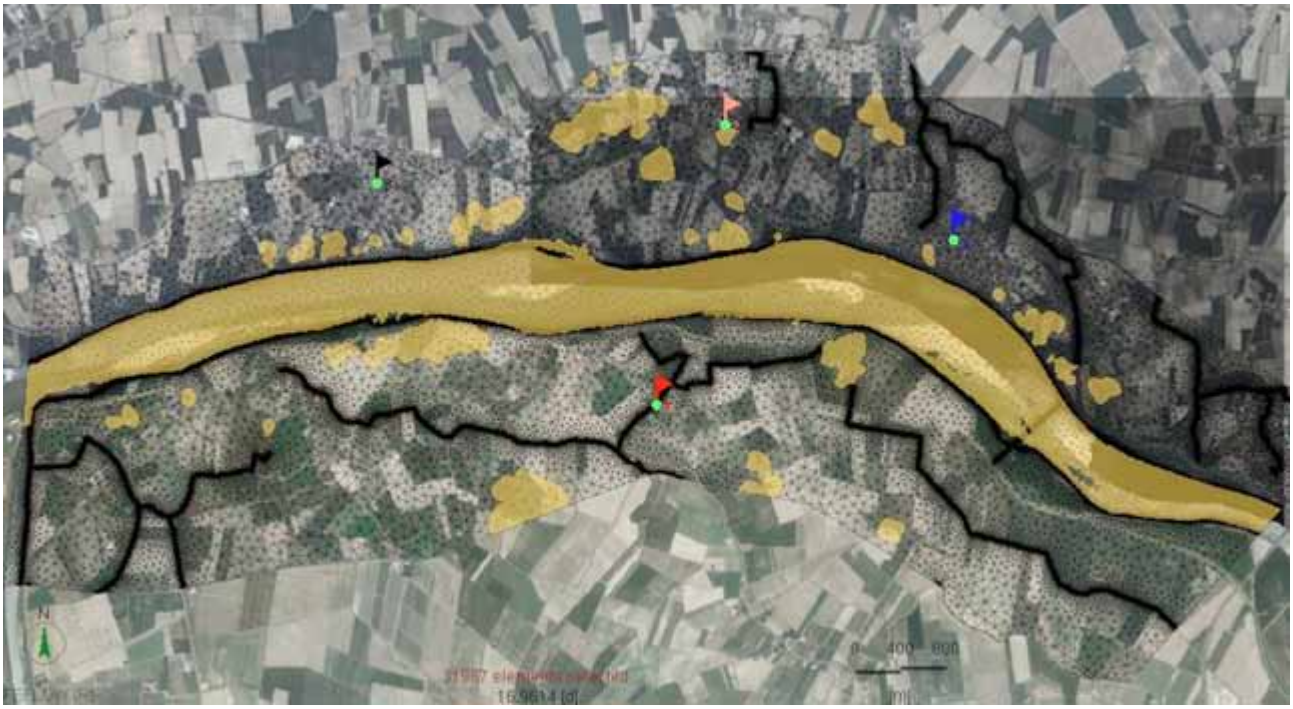


Figura 430 - Settori con falda affiorante (Head > elevation) - quota falda transitoria scenario "massimo irriguo"

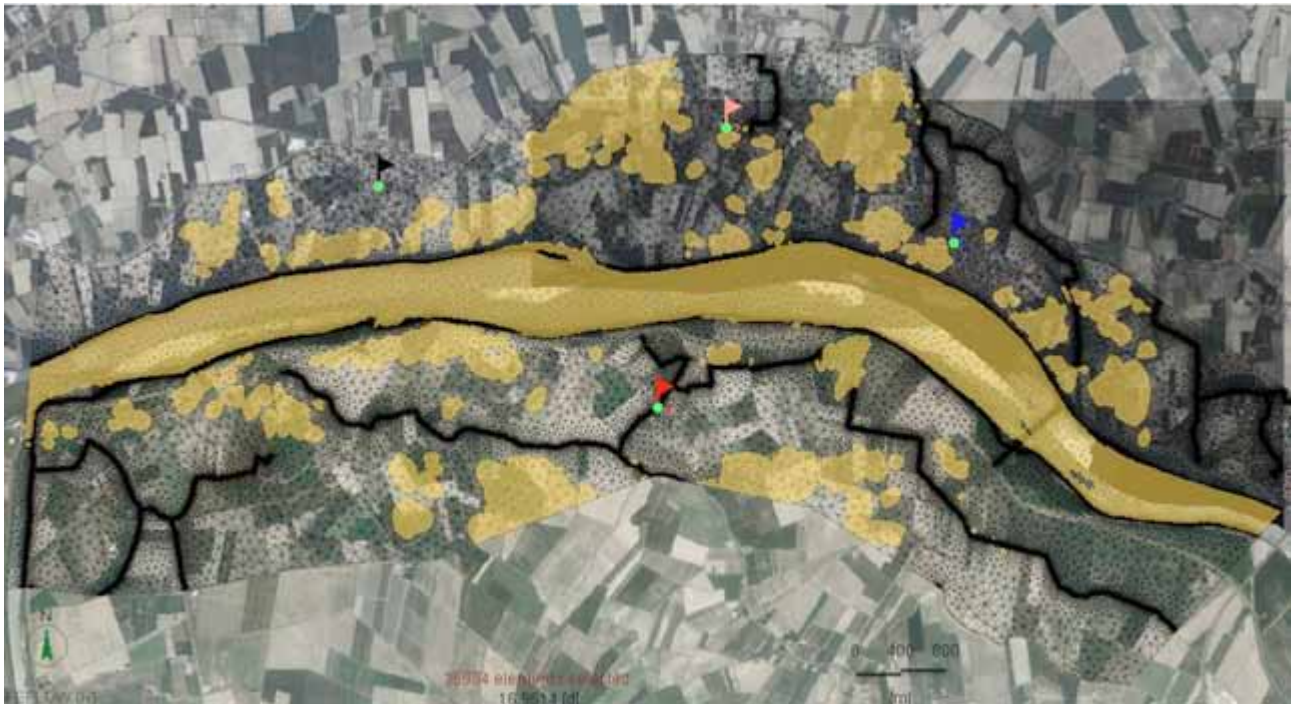


Figura 431 - Settori con soggiacenza falda < 0.5 m da p.c. (Head + 0.5 > Elevation) - quota falda transitoria scenario "massimo irriguo"

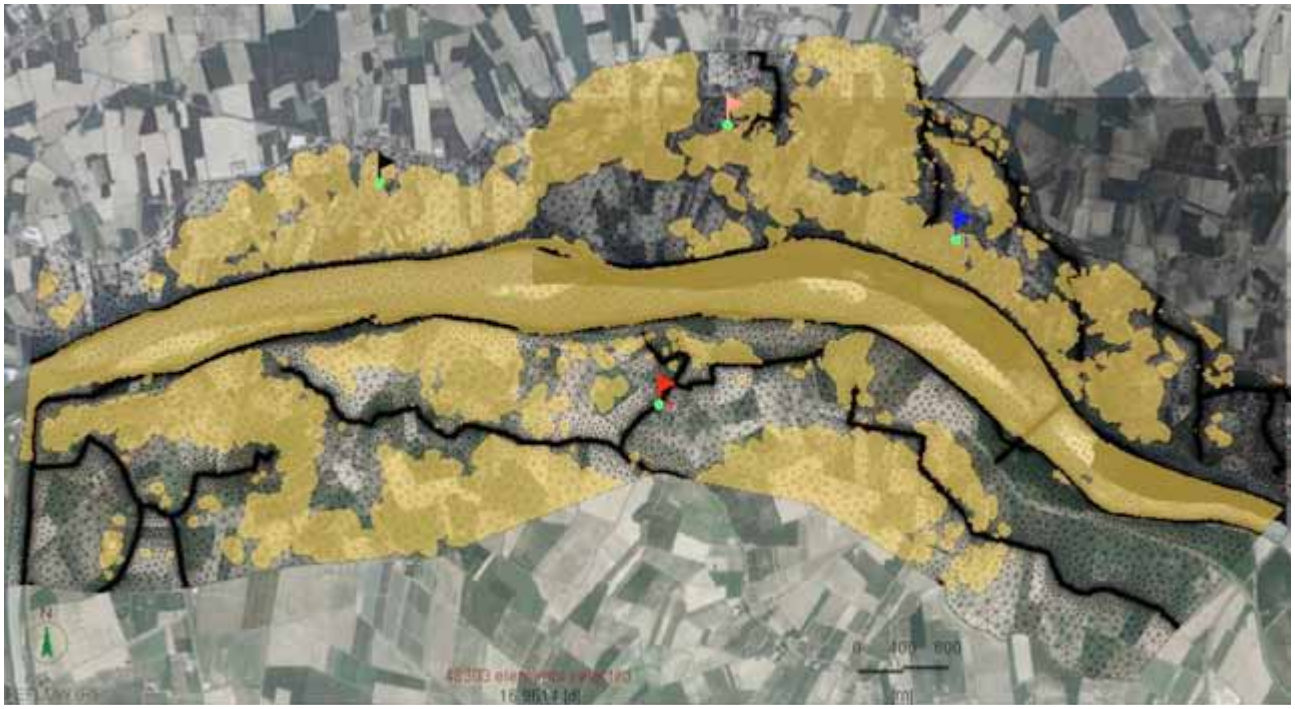


Figura 432 - Settori con soggiacenza falda < 1.0 m da p.c. (Head + 1.0 > Elevation) - quota falda transitoria scenario "massimo irriguo"



Figura 433 - Portate drenate dalla rete di canali nello stato di progetto, scenario "massimo irriguo" (acquifero: K=2E-4 m/s)

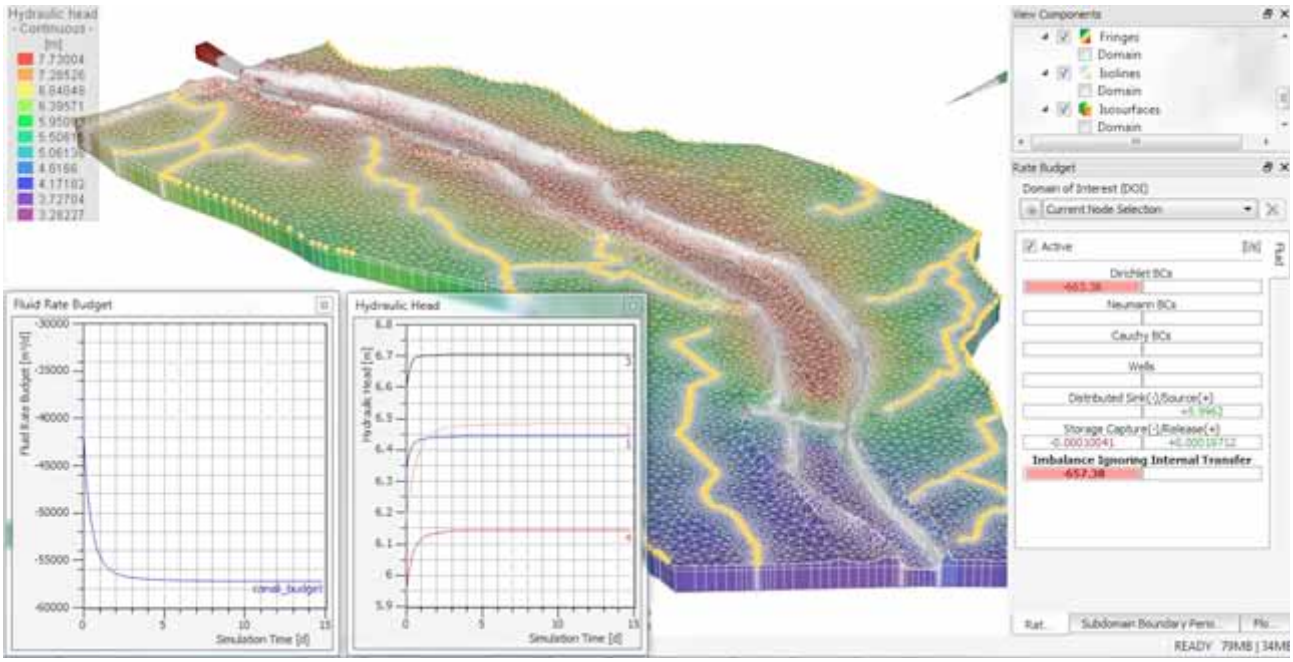


Figura 434 - Portate drenate dalla rete di canali nello stato di progetto, scenario "massimo irriguo" (acquifero: K=5E-4 m/s)

20.3.6 Simulazione di interventi per la mitigazione degli effetti sulla quota falda nello scenario di progetto

I modelli numerici per i settori delle traverse 4 e 5 sono stati applicati per la verifica di interventi di mitigazione, finalizzati al controllo dei livelli di falda. In particolare, la verifica ha riguardato la realizzazione di canali di drenaggio in posizione retro arginale, con l'obiettivo di "confinare" i settori a quota falda anomala nell'ambito della sola fascia golenale, mitigando invece gli effetti delle opere di navigazione sui settori esterni all'argine maestro, interessati da nuclei abitati e infrastrutture significative.

Il tracciato dei canali dovrà essere verificato nel dettaglio in relazione alle interferenze con le aree abitate e con la rete di canali esistenti, con la possibile definizione, ad esempio, di tratti tombati in

corrispondenza della viabilità interna agli abitati.

In questa sede l'obiettivo delle verifiche è riferito alla sola efficienza dell'intervento per il controllo dei livelli di falda. Pertanto, la simulazione è relativa a canali retro arginali continui lungo i settori in esame, alla distanza di 50 m circa a tergo di entrambi i rilevati esistenti, rimandando a una successiva fase di valutazione l'effetto di tracciati di dettaglio e la risoluzione delle interferenze. Allo stesso modo non si tiene conto nelle verifiche di possibili ottimizzazioni con la rete di canali esistente, localmente in sovrapposizione o adiacenza a tratti del canale retro arginale oggetto delle simulazioni.

Le verifiche sono state effettuate considerando i canali in progetto come elementi monodimensionali, con l'attribuzione di una condizione di carico imposto (Head BC, condizione di Dirichlet) all'allineamento di nodi in asse ai canali stessi.

Il profilo idraulico verificato è relativo a livelli d'acqua nel canale a quota -1.5 m da p.c., in coerenza con i livelli di riferimento nella rete di canali esistenti.

La simulazione è relativa allo scenario più gravoso tra quelli ante operam precedentemente analizzati, ovvero:

- "scenario massimo irriguo";
- conducibilità idraulica Kx,y acquifero = $5E^{-4}$ m/s, valore massimo nel campo testato ($2 \div 5E^{-4}$ m/s).

Traversa 4

L'andamento dei canali retro arginali, destro e sinistro è riportato nelle successive Figura 435 e Figura 436. Il canale, in destra, riguarda la sola fascia a valle della confluenza Secchia.

Nella medesima Figura 436 sono riportate le aree con falda affiorante (Head > Elevation) nello scenario di progetto.

In sintesi si evidenzia quanto segue:

l'intervento, nel settore realizzato, determina il confinamento delle aree con falda affiorante o sub affiorante a sole porzioni entro la fascia golenale, compresa entro gli argini maestri; non si osservano invece condizioni di affioramento della falda all'esterno della fascia arginata e segnatamente in corrispondenza degli abitati;

nello scenario considerato, la portata totale dei canali retro arginali è calcolata in circa 0,9 m3/s, con portata totale della rete di drenaggio simulata (esistente + retro arginali in progetto) di circa 1.5 m^3/s.

La presenza dei canali retro arginali consente pertanto di "confinare" i livelli di falda sub affiorante alla fascia golenale, attraverso un'idonea regolazione dei livelli tale da conseguire nei canali stessi i medesimi livelli idrometrici/quote falda esistenti nelle condizioni attuali di assenza di interventi.

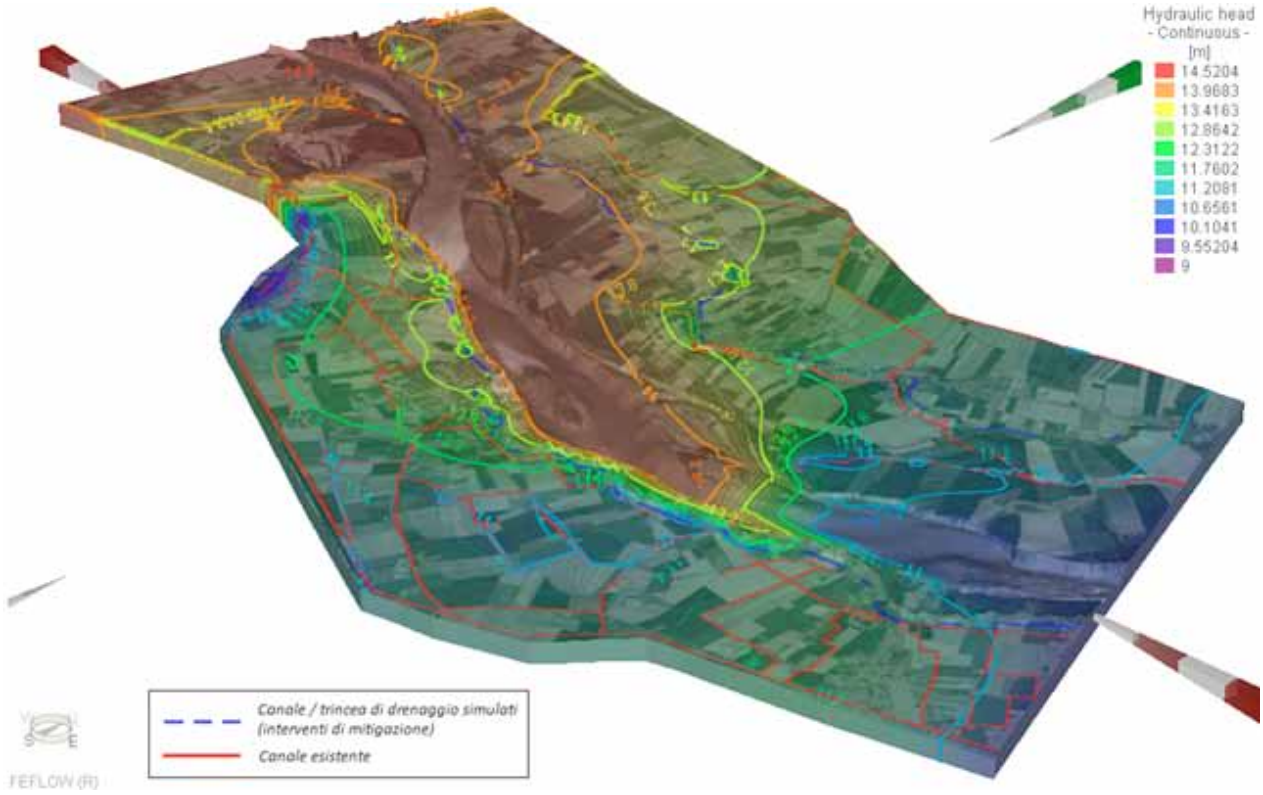


Figura 435 - Simulazione del campo piezometrico con intervento di drenaggio (canale retro arginale).



Figura 436 - Simulazione con intervento di drenaggio e relative portate lungo la rete di canali. In giallo sono evidenziati i residui settori con falda affiorante (Head > Elevation)

Nel solo settore a monte del Secchia, al margine superiore del modello, come detto non interessato dall'intervento di mitigazione e pertanto nelle condizioni di livello freatico analoghe allo scenario senza intervento, si osserva il subaffioramento di falda, non riguardante in ogni caso la fascia edificata immediatamente a tergo dell'argine; tale situazione, come precisato in precedenza, è verosimilmente legata nel modello alle condizioni al contorno di carico attribuite al limite di monte, non riguardando peraltro neppure la fascia golenale monte Secchia in continuità con i nuovi livelli di progetto in Po; a riguardo dovranno essere effettuate ulteriori verifiche in fase successiva, sulla base di una più dettagliata definizione delle quote idrometriche di riferimento nel Secchia e nella rete di canali.

Traversa 5

L'andamento dei canali retro arginali, destro e sinistro è riportato nelle successive Figura 437 e Figura 438.

Nella medesima Figura 438 sono riportate le aree con falda affiorante (Head > Elevation) nello scenario di progetto.

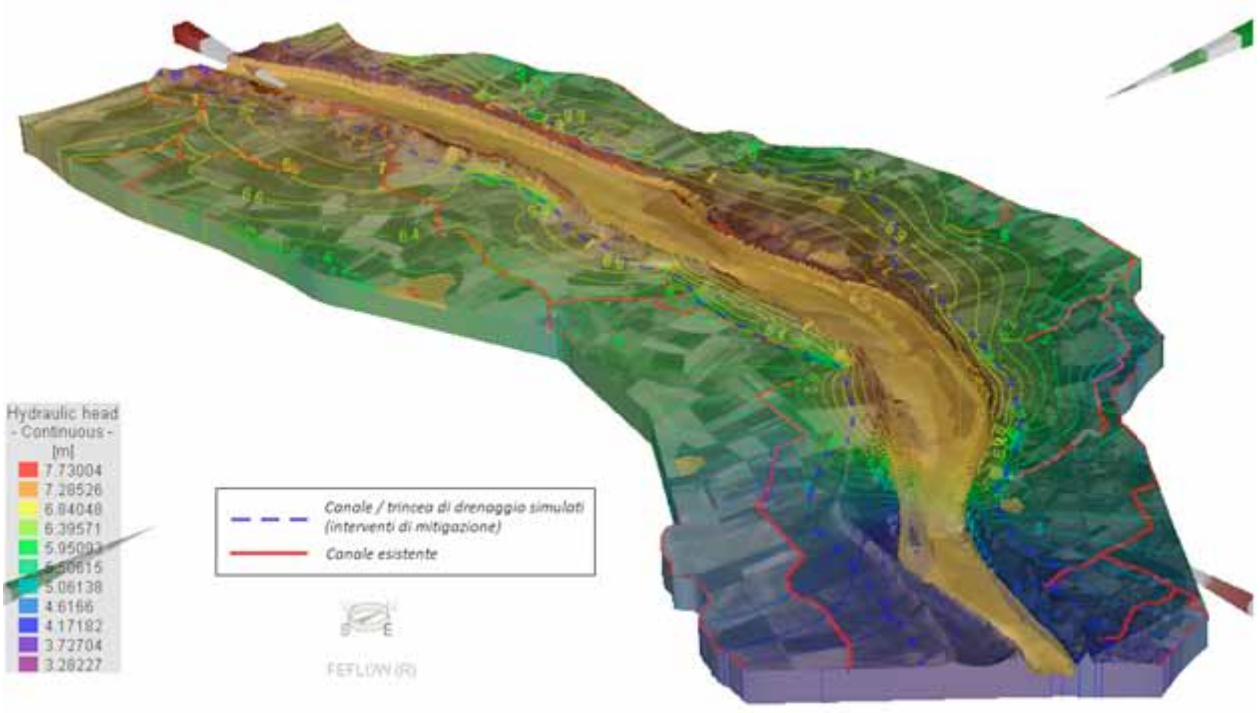


Figura 437 - Simulazione del campo piezometrico con intervento di drenaggio (canale retro arginale).



Figura 438 - Simulazione con intervento di drenaggio e relative portate lungo la rete di canali. In giallo sono evidenziati i residui settori con falda affiorante (Head > Elevation)

Analogamente a quanto osservato per il settore della traversa 4, l'intervento determina il confinamento delle aree con falda affiorante o sub affiorante a sole porzioni entro la fascia golenale, compresa entro gli argini maestri; non si osservano invece condizioni di affioramento della falda all'esterno della fascia arginata e segnatamente in corrispondenza degli abitati.

Nello scenario considerato, la portata totale dei canali retro arginali è calcolata in circa 0,5 m^3/s, con portata totale della rete di drenaggio simulata (esistente + retro arginali in progetto) di circa 1 m^3/s.

20.4 VALUTAZIONI DELLE INTERAZIONI FALDA SUPERFICIALE E RETE SUPERFICIALE DI DRENAGGIO PER GLI SCENARI DI PROGETTO

A seguito delle ricostruzione del modello di simulazione del comportamento del sistema falda freatica e degli approfondimenti eseguiti con modellazione numerica 3D per l'assetto di progetto, è stata redatta una cartografia di sintesi (Allegato 4) in cui sono individuate le aree a maggior criticità per l'innalzamento dei livelli piezometrici della falda superficiale dovuti alla presenza delle traverse di regolazione.

Le aree critiche per interferenza della falda freatica sono state suddivise in 2 classi principali:

- elevata per valori di soggiacenza inferiori o uguali al metro dal piano campagna, tali da comportare effetti sull'utilizzo del suolo, sulla rete drenante consortile e sulle aree antropizzate;
- moderata per valori di soggiacenza compresi tra 1 e 2 m dal piano campagna.

Nel caso di interferenza di tali aree con zone abitate sono state perimetrate le aree coinvolte dagli effetti di innalzamento delle falda superficiale.

Le criticità sono state individuate all'interno delle aree golenali e extragolenali fino al limite della rete di drenaggio consortile esistente. Va ribadito che i fenomeni analizzati fanno riferimento alla condizione di progetto in assenza di interventi di mitigazione e controllo di tali effetti, alcuni dei quali sono di carattere strutturale, mentre altri comportano maggiori oneri ai Consorzi di bonifica per gestire le operazioni di convogliamento e scarico delle acque che già svolgono ordinariamente.

Nel seguito vengono descritte per tratti le principali aree critiche.

Tratto da Cremona a Motta Baluffi – Roccabianca (Traversa 1)

Le aree a maggior interferenza della falda superficiale rispetto al piano campagna sono individuate nella golena sinistra a San Daniele Po con soggiacenze inferiore al metro di alcuni settori all'interno della golena. La presenza di una fitta rete drenante permette lo smaltimento delle acque verso il fiume Po.

In sponda destra la golena di Polesine Parmense, depressa topograficamente, è interessata dall'innalzamento dei livelli piezometrici che si mantengono però entro il limite dell'argine maestro. Più a valle in prossimità dello sbarramento è coinvolta parzialmente la golena di Pieveottoville e Ragazzola.

I centri abitati interessati dall'effetto di innalzamento sono parti dell'abitato di Isola Pescaroli in sinistra idrografica e di Ragazzola e Pieveottoville in sponda destra.

Tratto da Motta Baluffi – Roccabianca a Casalmaggiore-Mezzano (Traversa 2)

Le aree a monte delle traversa 2 maggiormente coinvolte dall'interferenza con la falda superficiale sono quelle della golena di Casalmaggiore e dei tratti rivieraschi fino a Fossa Caprara in sinistra idrografica, mentre in destra idrografica la golena di Sacca-Mezzano Rondani, con quote topografiche superiori, è parzialmente coinvolta in prossimità dell'alveo attivo.

L'interferenza con le arre antropizzate riguarda parti di Casalmaggiore (area industriale, sobborghi nord-occidentali) e Fossa Caprara in sponda sinistra;

Tratto da Casalmaggiore-Mezzano a monte confluenza fiume Oglio (Traversa 3)

A monte della traversa 3 sono coinvolte dall'effetto di innalzamento dei livelli piezometrici della falda superficiale le aree rivierasche golenali e parzialmente extra golenali lungo la sponda destra che va dall'abitato di Tagliata e Torricella; le aree già allo stato attuale vanno in sofferenza durante le piene di morbida del fiume Po, alimentando la rete drenante dei canali di scolo consortili.

Anche in sponda sinistra si ha un coinvolgimento dell'area di Cizzolo e di alcuni centri abitati rivieraschi quali, Il Bugno, Villastrada, Dosolo e Cantone e la golena di Pomponesco; l'abitato con maggior interferenze in sponda destra è Luzzara .

Tratto da confluenza fiume Oglio a Quingentole (Traversa 4)

Le aree a maggior criticità sono quelle antropizzate lungo le sponde rivierasche, in particolare lungo la sponda destra l'abitato di Quingentole e tutta l'area rivierasca fino a monte di San Benedetto Po. Qui viene coinvolta la golena di San Benedetto Po, con innalzamento in alcuni settori golenali del livello piezometrico a circa 1 m dal piano campagna.

In sponda sinistra sono critiche le aree della golena di Bastia mentre, sulla base dei risultati della modellazione numerica 3D minori sono gli effetti sugli abitati di Sustinente, Libiola, Torriana. A confluenza a Mincio lungo la sponda in sinistra di Po si evidenziano le aree di Correggio Micheli Governolo e Malcantone.

A seguito della simulazione numerica 3D, in sinistra Po sono critiche le aree a falda affiorante immediatamente a valle della foce Mincio che costituiscono un'area pressoché continua fino allo Scolo Fisseretto, nell'intorno di aree abitate (tra cui le loc. Ca' Vecchia, Cabina, Malcantone, Sacchetta, Canfore, Palazzone).

Gli effetti di innalzamento della falda si riscontrano anche nelle aree rivierasche di San Giacomo Po e San Nicolò Po e in parte Borgoforte. Tali aree sono già note allo stato attuale per presenza di falda freatica prossima al piano campagna, soprattutto durante le morbide del fiume Po.

Tratto da Quingentole a Stienta (Traversa 5)

Per la traversa 5 in prossimità dello sbarramento sono coinvolte in maniera analoga le aree rivierasche sia in sponda sinistra con gli abitati di Stienta, Sabbioni-Zampine, Gaiba che la sponda destra da Ravalle, Porporana, a Paolecchio-Salvatonica. A seguito della modellazione numerica 3D, i nuclei di Gaiba, Tommaselle, Pilastri (in sinistra) e Ravalle (in destra), non sono interessati da affioramento o subaffioramento falda anche per lo scenario più critico, pur risultando molto prossimi alle fasce allagate e con interessamento di edificati rurali isolati dai concentrici di pertinenza.

A monte della confluenza Panaro gli effetti maggiori dell'innalzamento della falda si rilevano in alcuni settori lungo la sponda sinistra (Ficarolo, Calto, Castelmassa e l'area industriale di Bergantino) mentre in sponda destra riguardano l'area di Moglia e Stellata.

20.5 ANALISI DELLE INTERAZIONI CON GLI AMBIENTI RIPARIALI

20.5.1 Il sistema delle aree protette e della rete natura 2000

Nel seguito viene analizzato il sistema delle aree protette (Parchi nazionali, regionali, di interesse locale, Riserve naturali, Aree di Riequilibrio ecologico, Ramsar) e la rete Natura 2000 (SIC-ZPS e ZSC) presente lungo l'ambito fluviale del fiume Po con particolare riferimento agli effetti potenzialmente indotti dalla soluzione di progetto che prevede la realizzazione di 5 traverse di regimazione.

La rete Natura 2000 è costituita dai Siti di Interesse Comunitario (SIC), identificati dagli Stati Membri secondo quanto stabilito dalla Direttiva "Habitat" (Direttiva 92/43/CEE), che vengono successivamente designati quali Zone Speciali di Conservazione (ZSC), e comprende anche le Zone di Protezione Speciale (ZPS) istituite ai sensi della Direttiva 2009/147/CE, concernente la conservazione degli uccelli selvatici.

Ai sensi dell'Art. 6, paragrafo 3 della Direttiva Habitat "*qualsiasi piano o progetto non direttamente connesso e necessario alla gestione del sito ma che possa avere incidenze significative su tale sito, singolarmente o congiuntamente ad altri piani e progetti, forma oggetto di una opportuna valutazione dell'incidenza che ha sul sito, tenendo conto degli obiettivi di conservazione del medesimo. Alla luce delle conclusioni della valutazione dell'incidenza sul sito e fatto salvo il paragrafo 4, le autorità nazionali competenti danno il loro accordo su tale piano o progetto soltanto dopo aver avuto la certezza che esso non pregiudicherà l'integrità del sito in causa e, se del caso, previo parere dell'opinione pubblica.*"

Per gli interventi ricadenti in aree SIC e ZPS è quindi richiesta la Valutazione di incidenza, procedimento amministrativo, di carattere preventivo, finalizzato alla valutazione degli effetti sulla conservazione della biodiversità delle trasformazioni del territorio determinate dall'intervento.

La Direttiva Habitat è stata recepita a livello nazionale attraverso il D.P.R. n. 357/1997 e sue successive modifiche, e a livello regionale dalle seguenti Delibere di Giunta Regionale:

- D.G.R. della Regione Lombardia n. 7/14106 del 08 agosto del 2003 e sue successive modifiche;
- D.G.R. della Regione Emilia Romagna n. 1191 del 30 luglio 2007;
- D.G.R. della Regione Veneto n. 1662 del 22 giugno 2001 e D.G.R. n. 1180 del 18 aprile 2006 .

In ambito nazionale, la valutazione d'incidenza viene disciplinata dall'art. 6 del D.P.R. 12 marzo 2003, n. 120, che ha sostituito l'art. 5 del D.P.R. 8 settembre 1997, n. 357 (che trasferiva nella normativa italiana i paragrafi 3 e 4 della direttiva "Habitat"). Il DPR 357/97 è stato, infatti, oggetto di una procedura di infrazione da parte della Commissione Europea che ha portato alla sua modifica e integrazione da parte del D.P.R. 120/2003.

In base all'art. 6 del nuovo DPR 120/2003, comma 1, nella pianificazione e programmazione territoriale si deve tenere conto della valenza naturalistico-ambientale dei proposti siti di importanza comunitaria, dei siti di importanza comunitaria e delle zone speciali di conservazione. Si tratta di un principio di carattere generale tendente a evitare che vengano approvati strumenti di gestione territoriale in conflitto con le esigenze di conservazione degli habitat e delle specie di interesse comunitario.

Il comma 2 dello stesso art. 6 stabilisce che, vanno sottoposti a valutazione di incidenza tutti i piani territoriali, urbanistici e di settore, ivi compresi i piani agricoli e faunistico-venatori e le loro varianti.

Sono altresì da sottoporre a valutazione di incidenza (comma 3), tutti gli interventi non direttamente connessi e necessari al mantenimento in uno stato di conservazione soddisfacente delle specie e degli habitat presenti in un sito Natura 2000, ma che possono avere incidenze significative sul sito stesso, singolarmente o congiuntamente ad altri interventi.

Per i piani o gli interventi che interessano siti Natura 2000 interamente o parzialmente ricadenti all'interno di un'area protetta nazionale, la valutazione di incidenza si effettua sentito l'ente gestore dell'area (DPR 120/2003, art. 6, comma 7).

Sono sottoposti a Valutazione di incidenza gli interventi che ricadono all'interno di aree SIC e ZPS o che interessano aree esterne ad esse, ma sono ritenuti in grado di determinare incidenze negative significative sugli habitat o sulle specie animali e vegetali di interesse comunitario presenti nei siti ad essi limitrofi.

La documentazione da produrre ai fini della Valutazione di incidenza è lo Studio di incidenza i cui contenuti sono definiti all'Allegato G del D.P.R. n. 357/1997 che non è stato modificato dal nuovo decreto D.P.R. 120/2003, e nello specifico delle regioni dai D.G.R. e relativi allegati.

Le aree che compongono la rete Natura 2000 non sono riserve rigidamente protette dove le attività umane sono escluse; la Direttiva Habitat intende garantire la protezione della natura tenendo anche "*conto delle esigenze economiche, sociali e culturali, nonché delle particolarità regionali e locali*" (Art. 2). Soggetti privati possono essere proprietari dei siti Natura 2000, assicurandone una gestione sostenibile sia dal punto di vista ecologico che economico.

E' da specificare che la seguente analisi non sostituisce gli Studi di Incidenza da predisporre per ciascun sito SIC e ZPS interferente con le opere in progetto ai sensi della Direttiva 92/43/CEE una volta che si passerà alle fasi progettuali (preliminare, definitivo, esecutivo), ma serve a individuare allo stato attuale di approfondimento le interferenze con gli scenari progettuali.

Nel seguito vengono pertanto descritte le interferenze con il sistema delle aree protette e rete natura 2000 sulla base dell'ubicazione delle traverse di regimazione, non essendo definite in dettaglio le caratteristiche progettuali delle stesse e delle opere di servizio. Nell'Allegato 5 è riportata l'ubicazione planimetrica delle aree protette e siti natura 2000 con le aree occupate dall'alveo bagnato associato alla realizzazione delle traverse di regimazione.

E' da rilevare che uno degli elementi di criticità degli habitat naturali protetti sia la mancanza d'acqua nei periodi siccitosi.

Risulta quindi che il progetto di regimazione, capace di incrementare del 17% la superficie coperta dal fiume proprio nei periodi di magra e la superficie delle aree palustri e canneti (67%), come descritto nell'analisi sugli ambienti ripariali dei successivi paragrafi, possa produrre implicitamente un impatto positivo da questo punto di vista.

Tratto da Cremona a Motta Baluffi – Roccabianca (Traversa 1)

Nel tratto in esame partendo da monte verso valle in sponda sinistra sono presenti:

- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS): Parco del Po e del Morbasco;
- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS): Parco della Golena del Po.

In sponda destra:

- IT4010018 - SIC-ZPS - Fiume Po da Rio Boriacco a Bosco Ospizio: interessa il tratto del fiume Po in corrispondenza del territorio provinciale di Piacenza, quasi per intero dai limiti lombardi con il Cremonese fino all'inizio del territorio parmense;
- IT4020019 - ZPS - Golena del Po presso Zibello: il sito è localizzato a ridosso del confine con la Lombardia e comprende un tratto di circa 5,3 km della golena destra del Po, da Zibello al confine regionale;
- IT20A0015 - SIC e IT20A0401 ZPS – Bosco Ronchetti: SIC in parziale sovrapposizione con una ZPS designata (IT20A0401); porzione di golena del fiume Po dove, in un'area relativamente ridotta, si trova un'insolita varietà di habitat diversi (zone umide, boschi, coltivi) che influenza positivamente le presenze faunistiche, soprattutto per quel che riguarda l'avifauna, che mostra in loco un'importante componente migratoria, anche in virtù della vicinanza dell'asta fluviale che costituisce un corridoio di spostamento per molte specie. Alcuni boschi presenti, seppur relativamente piccoli, costituiscono, all'interno della golena, un raro esempio di vegetazione riconducibile a querceto;
- Riserva Naturale Orientata – Bosco Ronchetti in sovrapposizione a ZPS designata (IT20A0401);
- IT4020022 - SIC-ZPS - Basso Taro: sito include il tratto planiziale terminale del fiume Taro da Viarolo fino al Po, nella bassa pianura parmense, e le vaste golene poste a monte della confluenza presso Roccabianca.

Il SIC-ZPS IT4020022 Basso Taro interferisce direttamente con l'intervento della traversa 1.

Tratto da Motta Baluffi – Roccabianca a Casalmaggiore-Mezzano (Traversa 2)

Nel tratto in esame partendo da monte verso valle in sponda sinistra sono presenti:

- IT20A0013 SIC Lanca di Gerole e IT20A0402 ZPS Riserva Regionale Lanca di Gerole: ZPS comprendente la Riserva Regionale Lanca di Gerole è in parziale sovrapposizione con il SIC IT20A0013; lanca fluviale del Po, che include alcune isole sabbiose e aree ad acqua lenta o ferma. La matrice agricola alle spalle del fiume, estesa fino all'argine maestro, include due meandri dismessi che danno luogo a zone umide interne e a boschetti igrofili;
- Riserva Naturale Orientata Lanca di Gerole;
- IT20A0014 SIC Lancone di Gussola e IT20A0502 ZPS Lanca di Gussola la ZPS si sovrappone all'Oasi di Protezione della fauna "Lancone di Gussola", gestito dalla Provincia di Cremona, e parzialmente al SIC IT20A0014; si tratta di un ampio stagno, inserito in un contesto agricolo, appena a sud dell'abitato di Gussola. La vegetazione è quella tipica di una zona umida, con il corteggio floristico che ne consegue. Il Lancone corrisponde a un'antica ansa del Po (ora distante 3 km), attualmente alimentata dal Canale Riolo;
- IT20A0503 ZPS Isola di Maria Luigia: ZPS che confina ma non si sovrappone con il SIC IT4020017 in sponda emiliana; comprende interamente un'isola fluviale del tratto cremonese del fiume Po e ulteriori zone golenali e spondali adiacenti. Gli elementi di maggiore spicco sono raccolti

intorno a un ramo a corso lento del Po, compreso tra l'Isola e la sponda lombarda del Po. Sono poi inclusi tratti di barra fluviale in sponda destra e frazioni di terreno a conduzione agricola (pioppeto);

- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS): Parco della Golena del Po – Casalmaggiore.

In sponda destra:

- IT4020022 - SIC-ZPS - Basso Taro: il sito include il tratto planiziale terminale del fiume Taro da Viarolo fino al Po, nella bassa pianura parmense, e le vaste golene poste a monte della confluenza presso Roccabianca;
- IT4020017 - SIC-ZPS - Aree delle risorgive di Viarolo, Bacini di Torrile, Fascia golenale del Po: Il sito comprende una vasta zona di pianura che da Viarolo scende fino al Po, in coincidenza con il confine regionale con la Lombardia. E' caratterizzato da un'elevata diversità di ambienti tipici della pianura emiliana quali fontanili, canali, golene fluviali, prati stabili, siepi e filari alberati a cui si sono aggiunti i bacini dello zuccherificio di Torrile e zone umide ripristinate che costituiscono elementi di grande attrazione soprattutto per l'avifauna.

Tratto da Casalmaggiore-Mezzano a monte confluenza fiume Oglio (Traversa 3)

Nel tratto in esame partendo da monte verso valle in sponda sinistra sono presenti:

- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS): Parco della Golena del Po - Casalmaggiore;
- Parco Locale d'Interesse Sovracomunale (PLIS) la Golena e le sue Lanche - Viadana;
- IT20B0501 ZPS Viadana, Portiolo, San Benedetto Po: l'area ricade completamente all'interno del territorio della Provincia di Mantova. La ZPS presenta un'altitudine pressoché costante intorno ai 20 m s.m. e una superficie di 7.223 ha. Si sovrappone parzialmente al SIC IT20B0001 "Bosco Foce Oglio" e al Parco Regionale dell'Oglio Sud;
- IT20B0402 ZPS "Riserva Regionale Garzaia di Pomponesco e IT20B0015 SIC "Pomponesco" incluso nella ZPS designata (IT20B0402); la ZPS ricade in Provincia di Mantova. L'area, che ricalca esattamente i confini dell'omonima Riserva Naturale Regionale, ha una superficie di 96 ha e si sviluppa a una costante altitudine di 20 m s.m. La ZPS comprende un'area umida laterale al fiume Po, occupata da spiagge e barre fluviali, boschi igrofili, aree aperte e cespuglieti e una parte di isola fluviale. La tipologia ambientale più interessante è senz'altro il saliceto;
- Parco Regionale Oglio Sud;
- Riserva Naturale Orientata "Garzaia di Pomponesco".

In sponda destra:

- IT4020025 - SIC-ZPS - Parma Morta: nell'angolo nord-orientale della provincia di Parma, presso il territorio di Mezzani localizzato fra gli abitati di Brescello, Viadana e Colorno, a breve distanza dal Po, si trova un ramo abbandonato del torrente Parma, che negli ultimi secoli ha cambiato più volte percorso a monte della confluenza nel Po all'interno della golena destra. Sito di bassa pianura, include e decuplica verso nord e verso ovest i 65 ettari della Riserva Naturale Orientata Parma Morta, una lunga e sottile zona umida di circa 5 km istituita sul paleoalveo del torrente;
- Riserva Naturale Orientata Parma Morta;
- IT4030020 - SIC-ZPS - Golena del Po di Gualtieri, Guastalla e Luzzara: il sito è costituito da un tratto di circa 10 km della golena destra del Po, a ridosso del confine regionale con la Lombardia. Oltre alla golena, caratterizzata prevalentemente da pioppeti artificiali (circa 70% della superficie del sito), lembi di boschi ripariali, seminativi, lanche, ex cave inondate, sono presenti anche tratti con acque aperte del Po e un vecchio tratto del torrente Crostolo abbandonato. La Crostolina di Guastalla è infatti una lanca senescente, un'area umida di particolare rilievo naturalistico nella pianura fortemente antropizzata. Nella golena che ricade in Comune di Guastalla sono stati realizzati e sono in corso interventi di riqualificazione ambientale principalmente attraverso la piantumazione di alberi e arbusti autoctoni;

- Area di riequilibrio ecologico I Caldaren: la caratteristica più importante dell'area è la presenza di un esteso bosco planiziale, il più "vecchio" delle golene reggiane. Sono presenti almeno 32 specie diverse di alberi ed arbusti autoctoni. Il bosco si è creato spontaneamente nel corso di 50/60 anni con grossi salici, pioppi bianchi e neri, aceri campestri, olmo minore e siberiano. Questa parte di bosco è lasciata evolvere in modo naturale. Sono poi presenti zone umide residui di cave di argilla e di escavazione colonizzate da canneti (Phragmitetum communis);
- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS): Parco San Colombano – Suzzara (MN).

Tratto da confluenza fiume Oglio a Quingentole (Traversa 4)

Nel tratto in esame partendo da monte verso valle in sponda sinistra sono presenti:

- Parco Regionale Oglio Sud;
- IT20B0501 ZPS Viadana, Portiolo, San Benedetto Po : l'area ricade completamente all'interno del territorio della Provincia di Mantova. La ZPS presenta un'altitudine pressoché costante intorno ai 20 m s.m. e una superficie di 7.223 ha. Si sovrappone parzialmente al SIC IT20B0001 "Bosco Foce Oglio" e al Parco Regionale dell'Oglio Sud;
- IT20B0001 SIC "Bosco Foce Oglio";
- IT20B0401 ZPS "Parco Regionale Oglio Sud" : ricade a cavallo dei territori delle Province di Cremona e Mantova; totalmente inclusa nel Parco Regionale Oglio Sud. Si sovrappone in larga misura a diversi SIC, tra cui, nella Golena del Po, il SIC IT20B0001 "Bosco Foce Oglio". Ha un'altitudine media intorno ai 30 m s.m. e una superficie di 4.023 ha. Di questi, 305 ha rientrano nella Golena del Po (33 ha relativi al suddetto SIC);
- Parco Regionale del Mincio;
- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS) in area golenale, lungo un tratto di sponda del Po – Ostiglia (MN).

In sponda destra:

- IT20B0501 ZPS Viadana, Portiolo, San Benedetto Po, Ostiglia;
- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS): Parco Locale d'Interesse Sovracomunale Parco "Golene Foce Secchia";
- Parco Naturale di Quingentole;
- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS) in area golenale, lungo un tratto di sponda del Po – Ostiglia (MN).

Tratto da Quingentole a Stienta (Traversa 5)

Nel tratto in esame partendo da monte verso valle in sponda sinistra sono presenti:

- IT20B0501 ZPS Viadana, Portiolo, San Benedetto Po, Ostiglia;
- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS) in area golenale, lungo un tratto di sponda del Po – Ostiglia (MN);
- IT20B0007 ZPS/SIC "Isola Boschina":interamente ricadenti nel territorio della Provincia di Mantova, i confini della ZPS coincidono con quelli dell'omonima Riserva Naturale Regionale (gestita dall'E.R.S.A.F.) e dell'omonimo SIC IT20B0007. La ZPS ha una superficie di 39 ha ed è completamente pianeggiante, presentando una quota media intorno ai 16 m s.m.;
- Riserva Naturale Orientata "Isola Boschina";
- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS) in area golenale, lungo un tratto di sponda del Po – Ostiglia (MN);
- IT3270017 SIC Delta del Po: tratto terminale e delta veneto; comprende un insieme fluviale caratterizzato da un tratto di fiume di rilevanti dimensioni e portata, con sistema deltizio, sistemi dunali costieri, zone umide vallive, formazioni sabbiose (scanni) e isole fluviali con golene e lanche;

- IT3270022 ZPS Golena del Bergantino: area golenale ricoperta da saliceti e pioppeti con ampie zone a vegetazione erbacea, lanche e cariceti.

In sponda destra:

- IT20B0501 ZPS Viadana, Portiolo, San Benedetto Po, Ostiglia;
- IT20B0006 SIC-ZPS "Isola Boscone": interamente ricadenti nel territorio della Provincia di Mantova, i confini della ZPS coincidono con quelli dell'omonima Riserva Naturale e dell'omonimo SIC IT20B0006. La ZPS ha una superficie di 130 ha ed è completamente pianeggiante, presentando una quota media intorno ai 16 m s.m.; comprende interamente una penisola fluviale del Po, estesamente coperta da vegetazione, in larga parte corrispondente a saliceto a diverso grado di maturazione. La penisola occupa tutta l'ansa che il Po forma nel tratto prospiciente l'abitato di Carbonara, con un fronte rivolto al fiume di circa 2500 m. L'ambiente dominante è il bosco igrofilo planiziale, che ospita una consistente colonia riproduttiva di Ardeidi; alcune aree sono sottoposte a interventi di rimboschimento con specie autoctone. Tra la penisola e la sponda meridionale del fiume vi è in realtà un meandro morto, in cui si sono sviluppate interessanti zone umide, in via di interramento, che presenta elementi di pregio sia tra l'erpetofauna sia tra la fauna invertebrata, oltre ad offrire habitat adeguati all'alimentazione degli aironi e di diverse altre specie di uccelli;
- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS) : Parco Golenale del Gruccione – Sermide (MN);
- IT4060016 - SIC-ZPS - Fiume Po da Stellata a Mesola e Cavo Napoleonico: derivato da un'originaria localizzazione presso Porporana-Isola Bianca per una ventina di chilometri lungo il Po, il sito è stato infine esteso per circa 120 km di ambienti ripariali a includere la riva destra del Po alle radici del Delta (85 km), la confluenza del Panaro a partire da Bondeno (9 km) e infine il Cavo Napoleonico dal Reno (presso Sant'Agostino) fino al Po stesso (18 km). Questo complesso sito (SIC e ZPS) è il più esteso della regione per quanto riguarda le componenti ripariali-golenali della pianura presso il litorale;
- Area di riequilibrio ecologico Stellata: è situata nella zona golenale del Po con presenza di una fascia boscata igrofila e di un bosco di salici tipicamente golenale. L'area protetta è ricompresa nel IT4060016 SIC-ZPS - Fiume Po da Stellata a Mesola e Cavo Napoleonico;
- Area di riequilibrio ecologico Porporana: è ricompresa nel sito della rete Natura 2000 IT4060016 - SIC-ZPS, si trova ad una ventina di chilometri da Ferrara, presso l'abitato omonimo, situato sulla strada che da Ferrara porta a Bondeno costeggiando l'argine del Po. Il bosco è collocato all'interno della golena fluviale e ha caratteristiche di bosco umido, la cui componente arborea vede la presenza di specie tipiche di questo territorio. Salici e pioppi sono disposti verso la riva fluviale mentre, verso l'argine, il bosco è caratterizzato dalla presenza di quercia e olmo.

Sulla base della localizzazione delle traverse si segnalano le seguenti interferenze dirette tra le traverse e le aree protette e i siti della Rete Natura 2000:

Traversa 1:

- SIC-ZPS IT4020022 Basso Taro.

Traversa 2:

- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS): Parco della Golena del Po – Casalmaggiore.

Traversa 3:

- IT20B0501 ZPS Viadana, Portiolo, San Benedetto Po;
- Parco Regionale Oglio Sud.

Traversa 4:

- IT20B0501 ZPS Viadana, Portiolo, San Benedetto Po;
- Parco Locale di Interesse Sovracomunale (PLIS) in area golenale, lungo un tratto di sponda del Po – Ostiglia (MN).

Traversa 5:

- IT4060016 - SIC-ZPS - Fiume Po da Stellata a Mesola e Cavo Napoleonico;
- IT3270017 SIC Delta del Po: tratto terminale e delta veneto.

A valle dell'ultima traversa sono presenti le seguenti aree protette e siti della Rete Natura 2000 che interessano i rami deltizi:

- IT3270017 SIC Delta del Po: tratto terminale e delta veneto; comprende un insieme fluviale caratterizzato da un tratto di fiume di rilevanti dimensioni e portata, con sistema deltizio, sistemi dunali costieri, zone umide vallive, formazioni sabbiose (scanni) e isole fluviali con golene e lanche;
- IT4060016 - SIC-ZPS - Fiume Po da Stellata a Mesola e Cavo Napoleonico: derivato da un originaria localizzazione presso Porporana-Isola Bianca per una ventina di chilometri lungo il Po, il sito è stato infine esteso per circa 120 km di ambienti ripariali a includere la riva destra del Po alle radici del Delta (85 km), la confluenza del Panaro a partire da Bondeno (9 km) e infine il Cavo Napoleonico dal Reno (presso Sant'Agostino) fino al Po stesso (18 km). Questo complesso sito (SIC e ZPS) è il più esteso della regione per quanto riguarda le componenti ripariali-golenali della pianura presso il litorale;
- IT3270023 ZPS Delta del Po: La ZPS ha una vasta sovrapposizione con il SIC IT 3270017 e caratterizza il territorio del Delta del Po compreso nella Provincia di Rovigo e di Venezia. La ZPS si estende per un totale di circa 25.013 ettari;
- Parco Regionale del Delta del Po – Emilia Romagna e Veneto;
- IT3270005 SIC Dune Fossili di Ariano Polesine;
- IT3270006 SIC Rotta di S. Martino;
- IT4060004 SIC-ZPS Valle Bertuzzi, Valle Porticino-Cannevie';
- IT4060005 SIC-ZPS Sacca di Goro, Po di Goro, Valle Dindona, Foce del Po di Volano;
- IT4060010 SIC-ZPS Dune di Massenzatica;
- Riserva Naturale Orientata Dune fossili di Massenzatica;
- IT4060011 ZPS Garzaia dello Zuccherificio di Codigoro e Po di Volano;
- IT4060015 SIC-ZPS Bosco della Mesola, Bosco Panfilia, Bosco di Santa Giustina, Valle Falce, La Goara;
- IT3270024 SIC-ZPS Vallona di Loreo;
- IT3270003 SIC Dune di Donada e Contarina;
- IT3270004 SIC Dune di Rosolina e Volto;
- Riserva Naturale Bocche di Po.

20.5.2 Caratterizzazione degli ambienti ripariali del fiume Po allo stato attuale

La caratterizzazione degli ambienti ripariali è stata condotta prevalentemente sull'analisi delle ortofoto fornite da AIPO del volo eseguito nel marzo 2015, a confronto con la documentazione cartografica disponibile, con particolare riferimento alle carte forestali e dell'uso del suolo della Regione Lombardia, Regione Emilia-Romagna e Regione Veneto. Va detto che tali carte sono relativamente datate e che indubbiamente la disponibilità delle ortofoto sopra citate ha permesso di aggiornare la documentazione disponibile sulla base di un rilievo molto recente dello stato attuale dei luoghi.

Dal punto di vista metodologico si è partiti dalla considerazione che, con le dovute semplificazioni, in ambito fluviale si possono distinguere 3 fasce (o ecotoni), caratterizzate da associazioni ecologiche e vegetali specifiche.

La prima è costituita da aree coperte da acque libere dalla vegetazione, ovvero da acque profonde e/o dotate di una certa corrente che impedisce l'attecchimento di idrofite. Tali condizioni si hanno nell'alveo, lungo i tratti più profondi delle lanche e nei laghi di cava dismessi.

La seconda è caratterizzata da battenti di acqua molto modesti in assenza di corrente o da terreni saturi d'acqua fino in superficie. Si tratta delle aree in cui si ha tipicamente lo sviluppo delle idrofite; sono aree palustri caratterizzate dalla diffusa presenza di canneti in s.l. (in termini tecnici essenzialmente cariceti, tifeti e phragmiteto).

La terza è costituita dai boschi ripariali, costituiti tipicamente da salici, pioppi e ontani, ovvero da specie che tollerano la presenza di terreni saturi d'acqua anche a bassa profondità, ma che richiedono comunque di impiantarsi su superficie sgombre dalle acque per la maggior parte dell'anno.

Nell'attuale fase progettuale si è partiti dal presupposto che le aree alberate naturali siano costituite da formazioni ripariali. E' possibile che vi siano ristretti nuclei di boschi francamente planiziali, con quindi una rilevante presenza della Farnia, talora saltuariamente presente in alcune delle aree protette, e del Carpino anche se non vi sono evidenze in tal senso nella documentazione esaminata, né ve ne è menzione nella documentazione relativa alle aree protette.

Un'ulteriore associazione vegetazionale, assimilabile ad una fascia discontinua posta lungo gli alvei attivi tra la sezione bagnata e le aree emerse è costituita dalle barre sabbiose che si formano in presenza di un substrato permeabile (nel caso specifico sabbioso) soggetto ad alternanze di periodi di sommersione e siccità, condizioni che rendono oltremodo difficoltosa la colonizzazione da parte della vegetazione, salvo alcune particolari essenze pioniere.

Sulla base della documentazione sopra menzionata si è quindi proceduto alla delimitazione delle fasce in relazione alle condizioni attuali. L'estensione dell'analisi corrisponde al territorio coperto dal rilievo delle ortofoto 2015 AIPO.

Tale operazione è stata resa relativamente difficoltosa dal fatto che i rilievi fotografici sono stati effettuati in un periodo in cui la vegetazione è per lo più ancora a riposo, il che rende non agevole la distinzione tra fasce vegetazionali, e in un periodo di morbida che ha seguito un evento di piena relativamente intenso (tratto da foce Mincio a incile Po di Goro), il che ha probabilmente comportato una modesta sovrastima delle aree bagnate e una sottostima dell'estensione delle barre sabbiose.

Gli esiti di tale delimitazione sono riportati nell'Allegato 6. Una tabella riassuntiva con la quantificazione dell'estensione di dette fasce nelle condizioni attuali (a confronto con la previsione delle medesime estensioni in condizioni di progetto), distinte per area di influenza delle singole traverse è riportata nella Tabella 152.

Facendo riferimento al tratto da Cremona alla quinta traversa di Stienta (RO), ovvero al settore in cui sono prevedibili impatti significativi in relazione all'ipotesi dell'inserimento delle opere di regimazione, dall'esame di tale tabella riassuntiva emerge che la fascia di maggiore estensione è costituita dalle acque libere dalla vegetazione a cui è attribuibile un'estensione complessiva di circa 7.850 ha, costituiti essenzialmente dall'alveo del Po e dalle confluenze degli affluenti e solo in modestissima misura dai settori profondi delle lanche e dai laghetti di cava (circa 200 ha pari quindi al 2,5 % della superficie totale).

Le barre sabbiose coprono una superficie di soli 300 ha, mentre alle aree plaustri è stata attribuita un'estensione di poco superiore, 420 ha. Si può quindi affermare che le aree umide in senso stretto, costituite da laghi di cava lanche e collegate aree palustri coprono una superficie complessiva di circa 600 ha.

Si è calcolato, infine, che i boschi ripariali coprono una superficie di 3.250 ha, concentrati per ¾ a monte della terza traversa.

		STATO ATTUALE (ha)	PROGETTO (ha)	DIFFERENZA (ha)	DIFFERENZA (%)
TRAVERSA 1	Alvei e acque ferme profonde	1062,0	1379,6	317,6	30%
	Barre	98,0	13,7	-84,3	-86%
	Canneti e aree palustri	48,9	191,1	142,2	291%
	Bosco ripariale	820,2	2140,2	1320,0	161%
	Aree agricole extragolenali da bonificare	0,0	78,9	78,9	
	Pot. perdita aree coltivabili tot.			1774,4	
	Pot. perdita aree coltivabili in golena			**1695,5**	
TRAVERSA 2	Alvei e acque ferme profonde	1028,9	1164,5	135,6	13%
	Barre	60,4	24,5	-35,9	-59%
	Canneti e aree palustri	116,1	118,1	2,0	2%
	Bosco ripariale	681,2	1195,4	514,2	75%
	Aree agricole extragolenali da bonificare	0,0	14,3	14,3	
	Pot. perdita aree coltivabili tot.			630,2	
	Pot. perdita aree coltivabili in golena			**615,9**	
TRAVERSA 3	Alvei e acque ferme profonde	1297,2	1580,4	283,2	22%
	Barre	57,1	6,1	-51,0	-89%
	Canneti e aree palustri	191,0	250,1	59,1	31%
	Bosco ripariale	845,2	1373,0	527,8	62%
	Aree agricole extragolenali da bonificare	0,0	281,6	281,6	
	Pot. perdita aree coltivabili tot.			1100,7	
	Pot. perdita aree coltivabili in golena			**819,1**	
TRAVERSA 4	Alvei e acque ferme profonde	1984,6	2214,1	229,5	12%
	Barre	39,3	0,0	-39,3	-100%
	Canneti e aree palustri	31,1	121,7	90,6	291%
	Bosco ripariale	449,1	1237,6	788,5	176%
	Aree extragolenali da bonificare		636,4	636,4	
	Pot. perdita aree coltivabili tot.			1705,7	
	Pot. perdita aree coltivabili in golena			**1069,3**	
TRAVERSA 5	Alvei e acque ferme profonde	2471,1	2801,3	330,2	13%
	Barre	44,0	8,4	-35,6	-81%
	Canneti e aree palustri	35,8	24,3	-11,5	-32%
	Bosco ripariale	448,1	419,9	-28,2	-6%
	Aree agricole extragolenali da bonificare		825,4	825,4	
	Pot. perdita aree coltivabili tot.			1080,3	
	Pot. perdita aree coltivabili in golena			**254,9**	
TOTALE	Alvei e acque ferme profonde	7843,8	9139,9	1296,1	17%
	Barre	298,8	52,7	-246,1	-82%
	Canneti e aree palustri	422,9	705,3	282,4	67%
	Bosco ripariale	3243,8	6366,1	3122,3	96%
	Aree agricole extragolenali da bonificare	0,0	1836,6	1836,6	
	Pot. perdita aree coltivabili tot.			6291,3	
	Pot. perdita aree coltivabili in golena			**4454,7**	

Tabella 152 - Sintesi statistica dell'evoluzione delle fasce ripariali dallo stato attuale all'assetto di progetto

Per completezza si riporta che a valle della quinta traversa le fasce sopra menzionate coprono le seguenti superfici:

ACQUE PROFONDE LIBERE DI VEGETAZIONE	2920 ha
BARRE	13 ha
CANNETI	35 ha
BOSCO RIPARIALE	1020 ha

Tabella 153 - Fasce ripariali ed estensione superficiale a valle della traversa 5

20.5.3 INTERFERENZA DELL'ASSETTO VEGETAZIONALE RIPARIALE CON L'INNALZAMENTO DEL LIVELLO IDRICO DEL FIUME PO E DEL LIVELLO FREATICO PER GLI SCENARI DI PROGETTO

L'analisi dell'interazione con gli ambiente ripariali è fondata su una valutazione degli effetti che l'incremento dei livelli idrometrici sul Po, e conseguentemente sull'acquifero superficiale, determinerebbe sull'utilizzo dei territori, nell'ipotesi di una regolazione dei livelli tramite traverse. Non si prevedono viceversa effetti rilevanti in relazione a detto aspetto nel caso di una regolazione a corrente libera.

L'incremento dei livelli idrometrici del Po determina, in misura variabile, un incremento dei livelli idrici o piezometrici della falda superficiale. Tale processo pone, in vario modo, limiti alla destinazione a coltura dei terreni. Infatti, con poche eccezioni, le colture hanno necessità di svilupparsi su terreni umidi ma areati e quindi non saturi d'acqua. Lo spessore minimo necessario affinché tale sviluppo avvenga in modo regolare varia da specie a specie, oltre che in funzione della composizione (granulometria, contenuto in sostanza organica ecc.) del suolo stesso, ed è comunque legato alla profondità raggiunta dall'apparato radicale. Si può quindi affermare, ad esempio, che le colture frutticole sono più sensibili dei seminativi e che gli effetti della risalita della falda sono più dannosi nei terreni limoso-argillosi, quindi "pesanti", rispetto a quelli a prevalente componente sabbiosa.

Per contro vi sono in natura delle formazioni vegetali, di notevole valore ecologico, che si sono adattate e quindi prosperano in presenza di terreni saturi d'acqua. Tali associazioni vegetali hanno visto il loro areale di diffusione ridursi in modo drastico a seguito della progressiva trasformazione e "bonifica" della valle padana e sono ora oggetto di interventi di tutela e protezione. Si tratta delle così dette aree umide a protezione delle quali sono stati istituiti, nella sola area di studio, alcune riserve naturali regionali e Siti di Importanza Comunitaria (SIC).

Se si provoca un innalzamento di falda si avrà un'estensione e migrazione delle fasce ecologiche dall'asse fluviale verso le golene.

In linea di massima le prime due fasce (acque libere di vegetazione e canneti s.l.) si estenderanno a scapito dei boschi ripari e questi ultimi tenderanno a espandersi nelle aree agricole non più utilizzabili in ragione della presenza di terreni saturi a bassa profondità.

E' stata quindi condotta una previsione dell'evoluzione del territorio basata essenzialmente sull'andamento dei livelli di falda di progetto, o meglio della soggiacenza dei livelli piezometrici.

In particolare sono state ridefinite le fasce di cui sopra in base ai seguenti criteri:

- alla fascia delle acque libere sono state attribuite le aree che, in funzione delle condizioni di progetto, costituiscono l'alveo attivo "bagnato", con relativi canali interconnessi, nonché le zone delle lanche e dei laghi di cava con battenti indicativamente superiori a 0,3 m;
- alla seconda fascia (aree palustri o canneti) sono state attribuire le zone con acque ferme aventi battenti indicativamente inferiori a 0,3 m e soggiacenze dei livelli di falda non superiori a 0,3 m e le aree per lo più emerse aventi soggiacenze medie dei livelli inferiori a 0,3 m;
- alla fascia dei boschi ripari sono stati attribuite le aree aventi soggiacenze dei livelli di falda compresi tra 0,3 e 1,0 m e le aree boscate esistenti non ricadenti nelle due classi precedenti.

E' stata infine creata una quarta classe in cui sono comprese le aree esterne alle aree golenali, oltre gli argini maestri quindi, ma aventi soggiacenze inferiori al metro. Si tratta infatti di zone in cui, in alternativa a una rinaturalizzazione, è possibile procedere a una loro bonifica.

Resta il fatto che salvo casi particolari non pare sostenibile, quanto meno dal punto di vista socioeconomico, la possibilità di rinaturalizzare ampi tratti dei territori agricoli posti a tergo degli argini maestri.

Le barre sabbiose, infine, tenderebbero a diminuire in seguito alla regolarizzazione dei livelli, in quanto, come si è visto, si formano in presenza di un substrato permeabile (nel caso specifico sabbioso) soggetto ad alternanze di periodi di sommersione e siccità, condizioni che rendono oltremodo difficoltosa la colonizzazione da parte della vegetazione, salvo alcune particolari essenze pioniere.

I risultati di tali elaborazioni sono riportate nell'Allegato 7 di cui si riporta uno stralcio cartografico in Figura 439.

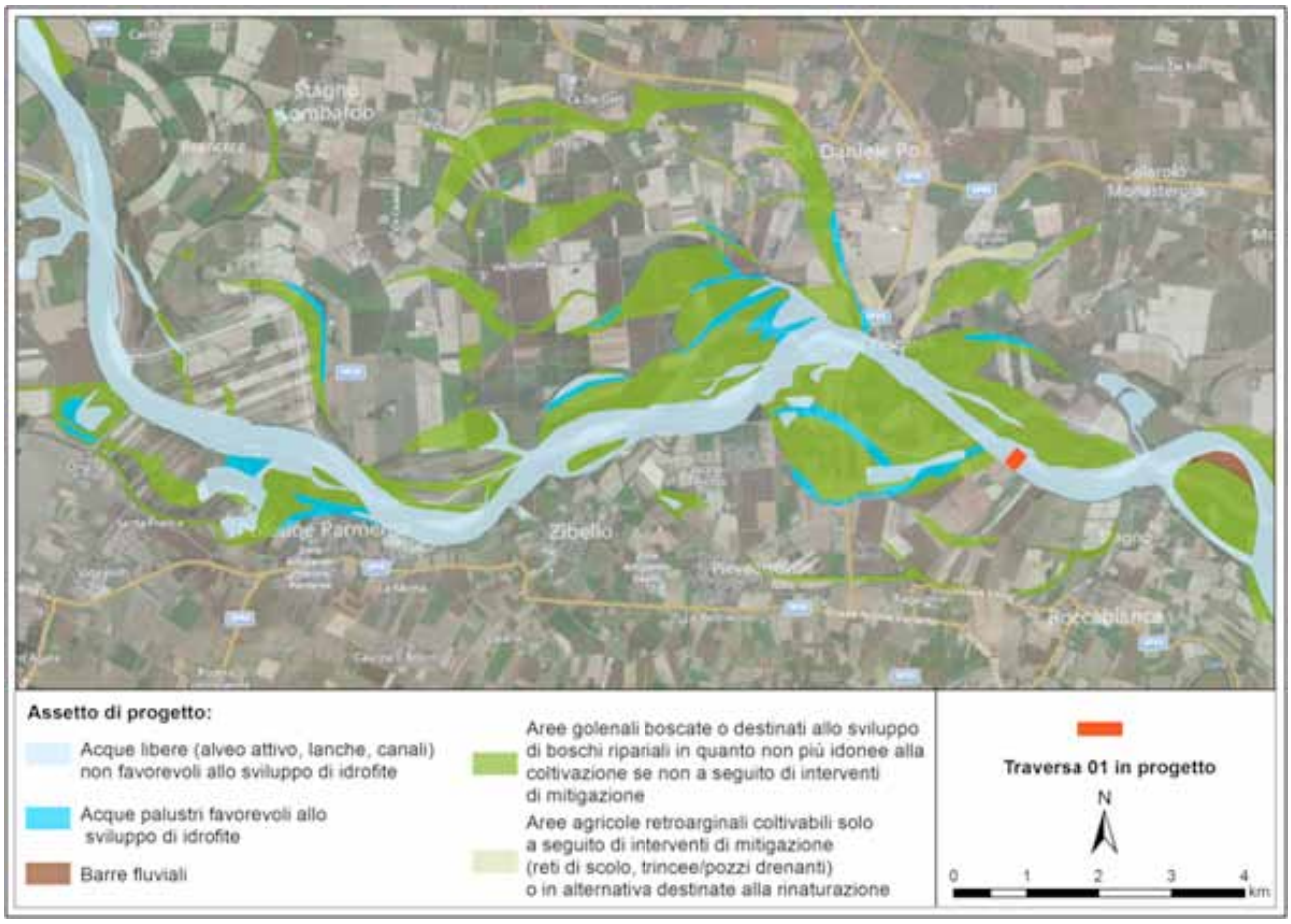


Figura 439 - Previsione delle trasformazioni vegetazione degli ambienti ripariali nell'assetto di progetto a monte della traversa 1

Nel tratto da Cremona alla traversa 5 (a valle non ci si attendono modificazioni significative), a fronte di un superficie bagnata pari a circa 9.100 ha, di cui il 93% (8.500 ha circa) corrispondente all'alveo attivo del Po e affluenti e il resto a lanche e laghi di cava, si ha un incremento delle acque libere rispetto alla situazione attuale di poco meno del 20%.

Le aree palustri (canneti in s.l.), passerebbero da 420 ha a 700 ha, con un incremento del 67%, mentre i boschi ripariali passerebbero da una superficie di 3.200 ha ad una di 6.400 ha con un incremento dell'ordine di circa il 100%.

Le barre sabbiose, per contro, tenderebbero a diminuire fortemente, riducendosi a una superficie complessiva dell'ordine di alcune decine di ettari concentrate nelle aree subito a valle degli sbarramenti.

Per quanto riguarda le aree agricole esterne alla fascia arginata e soggette a limitazioni d'uso per l'innalzamento della falda, e quindi in linea di massima destinati a interventi di bonifica, tenendo conto della sola fascia di analisi, ovvero i primi 200 m a tergo degli argini maestri, si arriva a una superficie dell'ordine circa di 1.800 ha.

E' stata stimata una perdita potenziale di terreno agricolo, legata all'innalzamento della falda di complessivi 6.300 ha, che si riduce a circa 4.500 ha se si considerano le sole aree golenali.

Passando all'analisi dell'effetto dei singoli sbarramenti, si osserva che, mentre l'espansione della superficie bagnata è abbastanza omogenea nei tratti rigurgitati dalle varie traverse (circa 200-300 ha con valori decisamente più bassi solo a monte della traversa 2), l'incremento delle fasce boscate riparie (comprese le aree palustri) e la conseguente perdita di terreni coltivati si ha soprattutto a

monte della prima traversa (soprattutto in sponda lombarda) e, in minor misura, della quarta. Per quest'ultima tuttavia gli effetti potrebbero essere molto più limitati se si decidesse di preservare con interventi di bonifica l'area golenale di San Benedetto Po.

Quasi trascurabili viceversa, in ragione della scarsa estensione delle aree golenali, le perdite potenziale di terreni coltivati a seguito della realizzazione della traversa 5. Quest'ultima traversa, per altro, è l'unica per cui il saldo delle aree naturali tra condizione attuale e di progetto appare essere stabile se non leggermente negativo.

Tramite elaborazioni GIS, utilizzando le carte dell'uso del suolo regionali redatte nell'ambito del Programma Europeo CORINE LAND COVER, (Lombardia DUSAF 2012, Emilia Romagna Uso del Suolo 2008 Edizione 2013, Veneto Uso del Suolo 2013) si è infine proceduto a una verifica preliminare del tipo di colture potenzialmente minacciate dall'innalzamento della falda legato alla realizzazione degli sbarramenti.

Si è visto che sul totale delle aree coltivate minacciate dall'innalzamento della falda, la cui somma sulla base delle carte uso suolo è risultati pari a circa 6.450 ha è sostanzialmente concordante con i 6.291 ha della Tabella 152, il 53% è costituito da seminativi, il 41% da pioppeti e il restante 6% è equamente suddiviso tra colture orticole, frutteti (compreso qualche vigneto per un totale dell'ordine di circa 60 ha) prati stabili e colture legnose diverse dai pioppeti.

Quindi le colture più sensibili all'innalzamento della falda (frutteti, colture orticole talune colture legnose) costituiscono una frazione minima della superficie potenzialmente a rischio, al contrario sono minacciati dei tipi di coltura che, tutto sommato, mostrano una maggiore resistenza alla saturazione dei terreni (il che in fondo non deve stupire visto che già oggi la soggiacenza della falda è abbastanza bassa).

Si intende che l'analisi finora condotta può essere approfondita nelle successive fasi progettuali tenendo conto di altri fattori (tipo di coltura, struttura del terreno ecc.) che potrebbero portare a rivedere e magari a ridurre le superfici interessate, così come le modificazioni indotte potrebbero tradursi in riduzioni di produttività complessivamente accettabili (eventualmente da compensare), così come possono essere individuati tipi di colture o di attività (ad esempio l'acquacoltura) in grado di meglio utilizzare l'accresciuta disponibilità di acqua.

Per contro è presumibile che proprio l'incremento delle fasce riparie naturali che si avrebbe nelle condizioni di progetto, costituisca una significativa compensazione rispetto all'impatto ambientale delle opere in progetto (regimazione dei flussi, parziale interruzione della continuità del corpo idrico, riduzione della fascia di divagazione del Po ecc.).

Va infine considerato che la messa in servizio delle traverse porterà ad una migrazione verso l'esterno delle fasce vegetazionali. Questo comporta che, in parte, le attuali fasce riparie saranno sommerse; se quindi complessivamente il bilancio in termini di superfici boscate sarà positivo, nel transitorio si rischia una riduzione temporanea delle aree naturali. Infatti, per quanto le essenze riparie siano in genere di rapida crescita e attecchimento, la costituzione di formazioni alberate richiede comunque un tempo non indifferente. L'operazione dovrà quindi essere programmata cercando di minimizzare gli effetti negativi dal punto di vista ambientale che potrebbero verificarsi nel regime transitorio. Questo non significa solo programmare un passaggio graduale dal regime attuale a quello regolato ma, anche, ad esempio, procedere preliminarmente al rimboschimento di una parte dei coltivi che dovessero essere destinati alla rinaturazione.

20.6 DEFINIZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE A SEGUITO DELLE INTERAZIONI CON LA FALDA FREATICA, CON LA RETE E OPERE GESTITE DAI CONSORZI DI BONIFICA, IL RETICOLO IDRICO SUPERFICIALE, LE AREE GOLENALI ED EXTRA-GOLENALI E GLI AMBIENTI RIPARIALI

Sulla base degli effetti indotti dagli scenari di progetto precedentemente descritti vengono illustrati i criteri di intervento con cui poter rendere compatibile il nuovo assetto del fiume Po attraverso interventi di natura strutturale, di gestione, regolazione e manutenzione delle opere consortili e di conversione dell'utilizzo del suolo .

In particolare le interazioni con gli scenari di progetto possono essere riassunte nei seguenti punti:

- interazione del livello regolato con le opere di scolo e di derivazione irrigua dei Consorzi di Bonifica;
- interazione del livello regolato con le aree golenali esterne all'alveo inciso;
- interazione del livello regolato con le aree ripariali;
- interazione dell'innalzamento falda freatica con le aree golenali ed extragolenali e le aree antropizzate.

Per quanto riguarda le interazioni del livello regolato con le opere consortili sono stati valutati i possibili effetti e proposti i relativi interventi di mitigazione, tenendo in debito conto degli oneri integrativi per la gestione e manutenzione delle opere e della rete di bonifica, al fine di permette lo scarico delle acque ine Po nell'ipotesi di scenario di progetto con regimazione di 5 traverse.

Gli effetti dell'innalzamento del livello idrometrico a monte degli sbarramenti influisce soprattutto sulla gestione delle opere di scolo e degli impianti di sollevamento meccanico esistenti.

Nel caso in cui la quota di regolazione del livello idrometrico del fiume Po sia superiore allo zero di bonifica sarà necessario intervenire con nuove opere di sollevamento meccanico o adeguamento degli impianti idrovori già esistenti, con aumento dei costi di gestione e manutenzione dovuti al prolungamento del periodo di sollevamento rispetto a quello della gestione attuale.

In questi casi i maggiori oneri sono legati ai costi energetici per il sollevamento, agli eventuali adeguamenti degli impianti e alla manutenzione ordinaria e straordinaria degli stessi, in previsione anche delle maggiori portate da smaltire legate all'innalzamento dei livelli di falda.

In alcune aree a maggiore criticità sarà quindi necessario intervenire sulla rete consortile con adeguamento dei canali di scolo esistenti o realizzazione di nuovi tratti.

Per quanto riguarda gli impianti consortili di derivazione irrigua, gli effetti dell'innalzamento del livello regolato comportano benefici nei costi di sollevamento dove il livello idrometrico regolato porta ad un innalzamento significativo della quota minima di prelievo.

Il beneficio dei costi di sollevamento sarà in parte ridotto dagli eventuali costi di adeguamento degli impianti alla nuova quota di presa (da definire in dettaglio caso per caso in quanto nel periodo relativamente recente molti impianto si sono dovuti adeguare agli abbassamenti consistenti dei livelli di magra) e all'aumento dei costi della manutenzione ordinaria e straordinaria delle opere per pulizia delle bocche di presa dai sedimenti per gli impianti prossimi agli sbarramenti.

Gli effetti sulle aree golenali esterne all'alveo inciso si hanno soprattutto nelle zone attualmente depresse topograficamente e che non raggiungono la quota del livello regolato.

In tali aree si può intervenire con una nuova rete di drenaggio o con l'adeguamento di quella esistente (con maggiori oneri legati alla manutenzione ordinaria e straordinaria del reticolo drenante) o decidere in alcuni casi la riconversione con realizzazione di nuove unità ambientali (zone umide e riapertura di lanche e canali secondari), prevedendo comunque gli oneri da corrispondere ai proprietari dei terreni agricoli che verranno parzialmente sommersi.

L'innalzamento del livello regolato sugli ambienti ripariali porterà a un ampliamento della superficie bagnata dal regime di magra ordinaria, mutando le condizioni attuali, dovute alla tendenza degli ultimi 50 anni alla progressiva canalizzazione dell'alveo attivo del fiume, con l'abbassamento del fondo alveo, che ha in parte isolato le aree rivierasche e golenali per tratti estesi a scapito dello sviluppo di habitat tipici dell'ambiente fluviale.

La regimazione del fiume Po potrebbe quindi essere utile ad avviare il processo di riqualificazione fluviale attraverso la ricostruzione di nuove unità ambientali quali la riapertura di lanche e rami secondari, che ricreando gli habitat tipici degli ambienti fluviali, rendono più efficace la salvaguardia degli ambienti vitali all'avifauna e alla fauna ittica.

L'obiettivo è quello di instaurare un regime idrico in grado di mantenere i livelli idrici per portate di magra non solo compatibili con l'assetto ecologico esistente, ma anche capaci di incrementare la presenza di biotopi naturali e/o di crearne di artificiali.

Anche in questo caso si prevedono oneri da corrispondere ai proprietari dei terreni agricoli che verranno parzialmente sommersi, o interessati dalla ricostruzione di nuove unità ambientali.

L'interazione dell'innalzamento della falda superficiale con le aree golenali, extra golenali e le aree antropizzate tocca diversi aspetti, che compartano interventi di mitigazione significativi al fine di mantenere l'efficienza del reticolo drenante, la sicurezza idraulica e la salvaguardia delle infrastrutture sotterranee esistenti, con particolare interesse alle zone urbanizzate.

Va inoltre considerato che l'innalzamento della falda nelle aree a monte delle traverse di regimazione può portare alla generazione di effetti positivi quali:

- contrasto alla diminuzione dei livelli di falda, correlato ai sensibili abbassamenti subiti dal fondo alveo del Po e ai livelli idrometrici (effetto drenante del corso d'acqua);
- mantenimento di un livello stabile della falda per un periodo prolungato, con benefici alle opere di captazione per uso irriguo;
- aumento delle portate nella rete a gestione mista (scolo/irriguo) da utilizzare soprattutto nel periodo estivo o nei periodi siccitosi.

In seguito alla realizzazione delle opere di regimazione la funzione del reticolo di drenaggio sarà per alcuni tratti sovraccaricata rispetto alle condizioni attuali, seppur limitatamente ai periodi di magra, ricordando che la regimazione dei livelli viene annullata per portate superiori all'ordine di grandezza della portata media, e quindi per un periodo temporale limitato nel corso dell'anno (in questo scenario si sono stimate maggiori portate specifiche comprese tra alcune decine e un centinaio di l/s per chilometro).

A questo fine, ove necessario, si dovrà intervenire per adeguare la rete dei canali esistenti, in modo da incrementare la capacità di portata degli stessi.

In generale l'innalzamento della falda superficiale provoca una minor capacità di assorbimento di acqua in caso di pioggia e un maggior afflusso di acque nella rete di scolo attuale e agli impianti finali di sollevamento meccanico. Pertanto sono stati previsti i maggiori oneri di gestione e manutenzione della rete scolante esistente (per effetto di filtrazione e drenaggio della falda lungo le sezioni dei canali non rivestiti), dell'aumento delle portate e dei relativi oneri di sollevamento e di manutenzione degli impianti idrovori per periodi prolungati, rispetto alla situazione attuale.

Per quanto riguarda l'effetto di alimentazione del livello regolato del Po sulla falda è significativo nelle zone prossime agli sbarramenti con un'azione alimentante del corso d'acqua verso l'acquifero superficiale ed inversione del gradiente idraulico fino al limite della rete di bonifica.

La distanza tra l'alveo a piene rive del Po e la rete di bonifica è, salvo casi particolari, compresa tra 1 e 2 km e comunque quasi mai inferiore ad alcune centinaia di metri, tenendo conto che il livello massimo regolato previsto è contenuto nell'alveo attivo e di conseguenza raramente raggiunge il piede del rilevato arginale.

E' pertanto da segnalare che nelle aree distali dall'alveo attivo è di fatto ininfluente la presenza di diaframmi ai piedi dei rilevati arginali, non influenzando le relazioni di scambio idrico tra l'acquifero e il fiume.

Nelle aree golenali gli interventi di mitigazione riguardano le zone di soggiacenza della falda superficiale prossime al piano campagna, attraverso il potenziamento della rete di scolo esistente e la realizzazione di nuovi collettori che intercettano la risalita del livello di falda e scaricano per gravità, ove possibile, le acque direttamente in Po o nella rete drenante esistente.

Tali interventi sono prioritari nelle golene chiuse, spesso a gestione privata, dove si voglia salvaguardare l'utilizzo del suolo esistente e infrastrutture di valore storico-archeologico, con presenza di colture di pregio che potrebbero essere danneggiate dall'innalzamento della falda, salvo la conversione a tipologie colturali differenti.

In fase di progettazione dovranno essere definite le quote di fondo della rete di smaltimento, l'eventuale necessità di nuovi impianti di sollevamento meccanico o di adeguamento di quelli già esistenti al fine di scaricare le acque nella rete di bonifica o direttamente nel fiume Po a valle degli sbarramenti.

Nelle aree extra-golenali sono previsti potenziamenti della rete di scolo con allacciamenti alla rete drenante esistente. Nel caso di interferenza con le aree abitate e presenza di infrastrutture sotterranee è prevista la realizzazione di trincee e pozzi drenanti al fine di abbassare in modo stabile il livello di falda. In tal senso le modellazioni numeriche 3D eseguite per le traverse 4 e 5 interessate nelle aree rivierasche da aree fortemente urbanizzate e prossime al sistema arginale maestro, hanno mostrato l'efficacia degli interventi strutturali simulati (canali drenanti retro-arginali) al fine di contenere l'innalzamento del livello piezometrico della falda all'interno delle aree golenali.

In sintesi sono riportati in Tabella 154 gli effetti e gli interventi di mitigazione legati alle varie tipologie di interazione.

INTERAZIONE		EFFETTI	INTERVENTI DI MITIGAZIONE
Interazione del livello regolato con le opere consortili di gestione della rete di scolo e irrigua	Opere di scolo	Quota di regolazione del livello idrometrico del fiume Po superiore allo zero di bonifica	• Nuovo impianto di sollevamento • Adeguamento impianto di sollevamento esistente • Nuove modalità di gestione chiaviche di regolazione per scarico a gravità e dell'impianto di sollevamento meccanico esistente
	Opere di derivazione irrigua	Quota di regolazione del livello idrometrico del Po superiore a quella di derivazione	• Adeguamento impianto idrovoro di sollevamento alla nuova quota minima di presa; • Manutenzione ordinaria/straordinaria per gestione accumulo dei sedimenti in vicinanza dell'opera di presa dovuta allo sbarramento
Interazione del livello regolato con le aree golenali esterne all'alveo inciso		Aree depresse topograficamente che vengono parzialmente sommerse rispetto al livello regolato del fiume Po	• Nuova rete scolante o adeguamento della rete drenante esistente • Manutenzione della rete drenante esistente • Modifica della destinazione d'uso del suolo delle aree coltivate o adeguamento dei tipi colturali • Creazione di nuovi ambienti, riattivazione di lanche e apertura canali laterali e rami secondari
Interazione del livello regolato con le aree ripariali		Aree ripariali sommerse	• Creazione di nuovi ambienti, riattivazione di lanche e apertura canali laterali e rami secondari
Interazione innalzamento falda freatica con le aree golenali, extragolenali, aree antropizzate	Aree golenali	Soggiacenza del livello freatico prossima al piano campagna	• Nuova rete scolante o adeguamento della rete drenante esistente • Manutenzione della rete drenante esistente • Modifica della destinazione d'uso del suolo delle aree coltivate o adeguamento dei tipi colturali
	Aree extragolenali	Soggiacenza del livello freatico prossima al piano campagna	• Nuova rete scolante o adeguamento della rete drenante esistente (risagomatura,, rivestimenti, etc) • Connessione della nuova rete scolante ai canali principali di scolo esistenti possibilmente per gravità o con impianti di sollevamento o adeguamento di quelli esistenti • Manutenzione della rete drenante esistente per effetto di filtrazione e drenaggio della falda lungo le sezioni dei canali non rivestiti • Adeguamento degli impianti idrovori esistenti per maggiorazione della portata dovuta all'innalzamento del livello di falda • Modalità di gestione degli impianti idrovori di scarico (periodi di sollevamento, gestione impianti, etc
	Aree antropizzate	Soggiacenza del livello freatico prossima al piano campagna	• Nuova rete scolante o adeguamento della rete drenante esistente (risagomatura,, rivestimenti, etc) • Pozzi e trincee drenanti per abbattimento del livello piezometrico nelle aree maggiormente antropizzate • Oneri per `infrastrutture sotterranee già esistenti

Tabella 154 - Sintesi delle interazioni, effetti ed interventi di mitigazione

Per quanto riguarda gli interventi di mitigazione, essi sono stati individuati e quantificati anche attraverso una valutazione economica di larga massima, tenendo conto anche della vita nominale delle opere in progetto (50 anni) e sono distinguibili nelle seguenti tipologie:

- realizzazione di sistemi di drenaggio di carattere esteso, con recapito nell'esistente rete di bonifica a protezione delle aree agricole e degli insediamenti esistenti nelle aree retro-arginali;
- realizzazione di sistemi di drenaggio e sollevamento in corrispondenza di alcuni insediamenti in condizioni di particolare criticità;
- miglioramenti delle canalizzazioni di bonifica esistenti in alcuni tratti a rischio di criticità a causa del possibile incremento degli apporti idrici;
- nuovi sistemi di sollevamento o potenziamento degli esistenti per il recapito a Po in grado di smaltire i maggiori apporti conseguenti al drenaggio della falda;
- riconoscimento dei maggiori oneri stagionali di sollevamento (energia elettrica, manutenzione ordinaria impianto) nelle stazione di pompaggio interessate dai maggiori apporti;
- interventi specifici di mitigazione all'interno delle aree golenali:
- oneri da corrispondere ai proprietari privati dei terreni agricoli.

Per gli oneri energetici di sollevamento per gli impianti esistenti si è fatto riferimento al costo medio orario di funzionamento degli ultimi 5 anni di esercizio (2010-2014) dichiarati dai Consorzi di Bonifica, ove disponibile.

Nel seguito viene riassunta la stima dei costi degli interventi di mitigazione per i tratti a monte di ogni traversa.

TRAVERSA 1	IMPORTO (Euro)
Realizzazione di sistemi di drenaggio di carattere esteso, con recapito nell'esistente rete di bonifica a protezione delle aree agricole e degli insediamenti esistenti nelle aree extra-golenali	2.475.000
Realizzazione di sistemi di drenaggio e sollevamento in corrispondenza di alcuni insediamenti in condizioni di particolare criticità	10.000.000
Miglioramenti delle canalizzazioni di bonifica esistenti in alcuni tratti a rischio di criticità a causa del possibile incremento degli apporti idrici	3.170.000
Nuovi sistemi di sollevamento o potenziamento degli esistenti per il recapito a Po in grado di smaltire i maggiori apporti conseguenti al drenaggio della falda	2.500.000
Interventi specifici di mitigazione all'interno delle aree golenali	3.375.000
Riconoscimento dei maggiori oneri stagionali di sollevamento per la vita delle opere (50 anni)	25.000.000
Oneri da corrispondere ai proprietari privati dei terreni agricoli	39.123.000
TOTALE (Euro)	85.643.000

Tabella 155 - Stima dei costi degli interventi di mitigazione per la Traversa 1

TRAVERSA 2	IMPORTO (Euro)
Realizzazione di sistemi di drenaggio di carattere esteso, con recapito nell'esistente rete di bonifica a protezione delle aree agricole e degli insediamenti esistenti nelle aree extra-golenali	4.750.000
Realizzazione di sistemi di drenaggio e sollevamento in corrispondenza di alcuni insediamenti in condizioni di particolare criticità	16.000.000
Miglioramenti delle canalizzazioni di bonifica esistenti in alcuni tratti a rischio di criticità a causa del possibile incremento degli apporti idrici	4.700.000
Nuovi sistemi di sollevamento o potenziamento degli esistenti per il recapito a Po in grado di smaltire i maggiori apporti conseguenti al drenaggio della falda	2.000.000
Interventi specifici di mitigazione all'interno delle aree golenali	2.750.000
Riconoscimento dei maggiori oneri stagionali di sollevamento per la vita delle opere (50 anni)	20.000.000
Oneri da corrispondere ai proprietari privati dei terreni agricoli	13.907.500
TOTALE (Euro)	64.107.500

Tabella 156 - Stima dei costi degli interventi di mitigazione per la Traversa 2

TRAVERSA 3	IMPORTO (Euro)
Realizzazione di sistemi di drenaggio di carattere esteso, con recapito nell'esistente rete di bonifica a protezione delle aree agricole e degli insediamenti esistenti nelle aree extra-golenali	7.250.000
Realizzazione di sistemi di drenaggio e sollevamento in corrispondenza di alcuni insediamenti in condizioni di particolare criticità	25.000.000
Miglioramenti delle canalizzazioni di bonifica esistenti in alcuni tratti a rischio di criticità a causa del possibile incremento degli apporti idrici	6.950.000
Nuovi sistemi di sollevamento o potenziamento degli esistenti per il recapito a Po in grado di smaltire i maggiori apporti conseguenti al drenaggio della falda	2.800.000
Interventi specifici di mitigazione all'interno delle aree golenali	2.500.000
Riconoscimento dei maggiori oneri stagionali di sollevamento per la vita delle opere (50 anni)	25.000.000
Oneri da corrispondere ai proprietari privati dei terreni agricoli	24.266.000
TOTALE (Euro)	93.766.000

Tabella 157 - Stima dei costi degli interventi di mitigazione per la Traversa 3

TRAVERSA 4	IMPORTO (Euro)
Realizzazione di sistemi di drenaggio di carattere esteso, con recapito nell'esistente rete di bonifica a protezione delle aree agricole e degli insediamenti esistenti nelle aree extra-golenali	15.250.000
Realizzazione di sistemi di drenaggio e sollevamento in corrispondenza di alcuni insediamenti in condizioni di particolare criticità	40.000.000
Miglioramenti delle canalizzazioni di bonifica esistenti in alcuni tratti a rischio di criticità a causa del possibile incremento degli apporti idrici	12.125.000
Nuovi sistemi di sollevamento o potenziamento degli esistenti per il recapito a Po in grado di smaltire i maggiori apporti conseguenti al drenaggio della falda	2.400.000
Interventi specifici di mitigazione all'interno delle aree golenali	5.375.000
Riconoscimento dei maggiori oneri stagionali di sollevamento per la vita delle opere (50 anni)	28.214.725
Oneri da corrispondere ai proprietari privati dei terreni agricoli	38.281.450
TOTALE (Euro)	141.646.175

Tabella 158 - Stima dei costi degli interventi di mitigazione per la Traversa 4

TRAVERSA 3	IMPORTO (Euro)
Realizzazione di sistemi di drenaggio di carattere esteso, con recapito nell'esistente rete di bonifica a protezione delle aree agricole e degli insediamenti esistenti nelle aree extra-golenali	14.000.000
Realizzazione di sistemi di drenaggio e sollevamento in corrispondenza di alcuni insediamenti in condizioni di particolare criticità	34.000.000
Miglioramenti delle canalizzazioni di bonifica esistenti in alcuni tratti a rischio di criticità a causa del possibile incremento degli apporti idrici	9.790.000
Nuovi sistemi di sollevamento o potenziamento degli esistenti per il recapito a Po in grado di smaltire i maggiori apporti conseguenti al drenaggio della falda	3.000.000
Interventi specifici di mitigazione all'interno delle aree golenali	950.000
Riconoscimento dei maggiori oneri stagionali di sollevamento per la vita delle opere (50 anni)	18.928.025
Oneri da corrispondere ai proprietari privati dei terreni agricoli	23.832.000
TOTALE (Euro)	104.500.025

Tabella 159 - Stima dei costi degli interventi di mitigazione per la Traversa 5

21 APPROFONDIMENTO DELLE INTERAZIONI CON LA RISALITA DEL CUNEO SALINO

21.1 PREMESSA

Il delta del fiume Po è interessato negli ultimi decenni da un grado crescente di risalita dell'intrusione salina che viene ricondotto all'influenza di diversi fattori. Gli effetti negativi indotti sono numerosi, tra cui l'interruzione delle derivazioni irrigue e degli approvvigionamenti acquedottistici, la salinizzazione delle falde freatiche, l'inaridimento delle zone litoranee e le alterazioni degli habitat e degli ecosistemi.

Il fenomeno dipende da una serie di variabili che si combinano tra loro in modo complesso; da monte dipende dalla portata defluente; da valle dalla marea, che a suo volta è influenzato dal livello idrico, dalla morfologia, dalla scabrezza e ancora dalla portata. E' più o meno pronunciato nei vari periodi dell'anno e interessa, con diverse intensità, i diversi rami; negli anni '50-'60 del secolo scorso si estendeva a non più di 2-3 km dalla foce, nel 1970-80 arrivava a circa 10 km, negli anni recenti la sua estensione è stata rilevata a oltre 20 km dalla foce.

Nel presente studio tale fenomeno viene approfondito in rapporto ai possibili effetti che possono essere indotti dalle due opzioni di sistemazione dell'alveo del fiume in tutto il tratto a monte del delta che sono state più volte descritte.

Gli interventi in progetto non comportano impatti diretti, in quanto non determinano variazioni nell'assetto idrologico e idrodinamico dei deflussi in ingresso al sistema deltizio. Essi possono però offrire, nel caso della soluzione di regimazione, un'importante opportunità per mitigare gli effetti negativi del fenomeno, nelle situazioni di magra più critiche, contrastando l'ingressione del cuneo salino mediante il rilascio di portate integrative ottenute svasando i volumi di acqua dolce trattenuti dagli sbarramenti.

Tale ipotesi di intervento, che rende disponibile una maggiore quantità di risorsa idrica "da monte", può essere integrata con le altre tipologie di intervento a carattere più diretto, quali la realizzazione di barriere antisale e di bacini di accumulo in aree all'interno del sistema deltizio. L'operazione è in linea con una delle azioni previste dal Progetto di Gestione del Distretto Idrografico per il raggiungimento/mantenimento degli obiettivi di qualità ambientale pianificati, che prevede di definire la portata ecologica del Po anche in relazione alle problematiche di ingressione del cuneo salino.

Nel seguito vengono descritte le caratteristiche generali del sistema deltizio, gli elementi conoscitivi disponibili relativi in specifico alla caratterizzazione del fenomeno e le valutazioni relative all'influenza degli interventi.

21.2 CARATTERISTICHE GENERALI DEL DELTA

21.2.1 Caratteristiche idrografiche

Il delta del fiume Po si estende a nord fino all'Adige e a sud fino al Reno ed è costituito da un territorio completamente al di sotto del livello del mare, fatta eccezione per gli argini, le coste e le dune fossili interne. Il delta, che si protende in mare per circa 25 km, su un arco meridiano di circa 90 km, occupa una superficie di circa 400 km2. Il bacino idrografico sotteso, tradizionalmente chiuso alla stazione di Pontelagoscuro (a 91 km dalla foce), è pari a 70.091 km2.

I rami attivi, da nord a sud, il Po di Maistra, il Po Grande o di Venezia, di Tolle, di Gnocca, e di Goro, definiscono il "Delta attivo".

Il Po di Goro costituisce il ramo più a sud; tutta la vasta area compresa tra tale ramo e la sponda del fiume Reno, nota come "Delta fossile", presenta ancora vaste zone umide (le Valli di Comacchio, la Valle Bertuzzi e altre valli minori), testimonianza degli antichi rami non più attivi, tra cui il Po di Volano, che mantiene oggi la funzione dorsale principale, a cui è collegato il reticolo idrografico di bonifica che drena l'intera area compresa tra gli argini.



Figura 440 - Delta del fiume Po

Il sistema deltizio è stato soggetto nei periodi storici a significative variazioni sia in ragione di fattori naturali che antropici. Negli ultimi secoli è stato stimato un allungamento medio di 65 m/anno; la completa regimazione con i lavori di sistemazione e bonifica del secolo scorso, ha modificato in modo significativo il regime di deflusso rispetto alle condizioni tipiche dei secoli precedenti, molto più prossime a un assetto naturale, rendendo non più significativa l'estrapolare al futuro degli andamenti medi riscontrati su base storica.

I rami costituenti hanno inizio all'altezza di Papozze (Rovigo), al km 604 della progressiva lungo l'asse del Po principale (Po Grande o di Venezia), dove il corso devia verso nord per riprendere successivamente la direzione ovest - est. Dal ramo principale si dipartono in destra il Po di Goro, diretto verso sud - est, e il Po della Gnocca, al km 634, con un percorso parallelo al Po di Goro; in sinistra il Po di Maistra al km 635.

Al km 644 il Po di Venezia si biforca in due rami, il Po della Pila, il più importante, che prosegue in direzione est e il Po delle Tolle, in destra, verso sud. I rami del Po della Gnocca, del Po di Venezia e del Po delle Tolle delimitano l'isola della Donzella rispettivamente a ovest, nord ed est. Le ulteriori diramazioni del Po della Pila prendono il nome di buse (la busa Dritta è considerata la foce principale del fiume).

Le ampie insenature formate dal protendersi nel mare di questi rami prendono il nome di sacche o lagune, direttamente collegate con il mare con una o più bocche; quando queste vengono isolate dal mare diventano valli, con acqua più o meno salmastra.

21.2.2 Caratteristiche geologiche e geomorfologiche

La formazione del delta, impostato in una depressione tettonica delimitata dai rilievi sepolti di Adria e da quelli del sottosuolo del ravennate, è il risultato dei fenomeni di sedimentazione del materiale

trasportato dal Po; le sequenze stratigrafiche plio-quaternarie che la costituiscono assumono potenze notevoli, pur essendo stati deposti a quote prossime a quelle del mare, in conseguenza di un processo naturale di subsidenza, determinato dal progressivo costipamento e abbassamento dei sedimenti. Gli spessori dei sedimenti quaternari raggiungono valori medi di circa 2.000-2.200 m, passando da circa 500 m nei pressi di Rovigo a più di 2.000 m alla foce; i sottostanti livelli pliocenici hanno potenza inferiore a 1.000 m e sono formati da argille grigie, con intercalazioni sabbiose nella parte inferiore, caratterizzati da microfaune di mare aperto e profondo.

I terreni in argomento sono tuttora interessati da fenomeni di costipamento dovuti al peso proprio del materiale; i coefficienti di compattazione sono ovviamente più elevati per i termini più recenti delle locali serie stratigrafiche.

In una simile situazione di compressibilità dei depositi risulta evidente come la risposta a variazioni delle locali condizioni naturali indotte dall'azione dell'uomo si traduca in manifestazioni di disequilibrio e di dissesto, che costituiscono appunto l'esasperazione e l'accelerazione di processi evolutivi, tra cui appunto la subsidenza. L'area è particolarmente fragile anche rispetto alle sollecitazioni esterne quali ad esempio le mareggiate e le variazioni del livello medio marino dovute ai cambiamenti climatici.

I terreni che si sono depositati nel delta negli ultimi 3000 anni presentano granulometrie alquanto variabili: i terreni più argillosi, entro cui sono frequenti le intercalazioni torbose, occupano le antiche paludi; terreni sabbiosi marcano invece gli antichi alvei dei rami del Po, le tracce di tracimazione e i cordoni litorali dei delta successivi. Le sequenze litostratigrafiche e le variazioni laterali di granulometria indicano la continua variazione della configurazione del delta e dell'andamento dei singoli rami, che doveva avere peraltro anche periodi abbastanza lunghi di costanza delle condizioni di sedimentazione, come evidenziato da depositi di notevole spessore con omogeneità delle caratteristiche litologiche.

I materiali costituenti i depositi quaternari derivano dalla disgregazione dei diversi tipi di rocce costituenti le Alpi e gli Appennini; essi possono dividersi nei seguenti gruppi fondamentali:

- argille pure, generalmente plastiche, in qualche caso compattate, se ricche di sostanze calcaree;
- argille miste a sabbia fine;
- argille nerastre per presenza di sostanze torbose;
- letti di torba derivanti da trasformazione di vegetali trasportati dai fiumi o costituenti la flora di zone temporaneamente emerse e poi ricoperte da depositi alluvionali;
- sabbie fini e, più raramente, grossolane.

Nella serie quaternaria sono stati distinti 5 orizzonti gassiferi principali, indicati con numerazione progressiva a partire dall'alto; a essi vanno affiancati orizzonti superficiali di limitata estensione e importanza e un orizzonte talora gassifero alla base del Quaternario.

Le attività di estrazione di gas dal primo e dal secondo orizzonte ebbero praticamente termine verso il 1950; gli altri tre orizzonti furono invece sfruttati fino alla chiusura obbligatoria dei pozzi. Il terzo orizzonte, limitato da due banchi argillosi, è caratterizzato da "rocce magazzino" di ottima permeabilità. Il quarto orizzonte nella parte occidentale è improduttivo per la presenza di sabbie molto argillose, in quella orientale è produttivo poiché le rocce magazzino sono formate da sabbie e sono di buona permeabilità. Il quinto orizzonte è compreso fra la potente serie argillosa del Calabriano-Emiliano e un banco argilloso del Siciliano medio di spessore variabile tra 8 e 20 m. Anche questo orizzonte è improduttivo nell'area occidentale dove le rocce magazzino sono costituite da sabbie molto fini a elevato contenuto d'argilla o addirittura da argille sabbiose; nella parte orientale, dove la permeabilità è alta, il suo sfruttamento ebbe inizio nel 1949-1950.

Nei vari orizzonti il gas è generalmente disciolto in acqua da salmastra a marina; le percentuali di cloruro di sodio aumentano con la profondità. Con questa aumenta pure il gas disciolto nell'acqua. Alla sommità delle formazioni gassifere, specialmente in una fascia più vicina al mare, si sono individuate anche modeste sacche di gas secco, la cui entità dipende dall'andamento strutturale e dalle variazioni laterali di facies, ma che si sono esaurite molto rapidamente.

Da un punto di vista morfologico, nell'area del delta si rilevano particolarità significative rappresentate da forme tipiche dei territori litoranei e lagunari, quali, procedendo dalla linea di costa verso l'entroterra, cordoni litoranei sabbiosi parzialmente sepolti, tracce di rami fluviali estinti, cordoni litoranei sabbiosi complessi e di dimensioni anche notevoli,. La linea di costa presenta una tendenza evolutiva variabile a seconda dei tratti, alcuni dei quali risultano in erosione, altri in avanzamento.

L'assetto altimetrico è caratterizzato da estese aree al di sotto del livello del mare, con quote tra -1 e -2 m s.m e localmente anche inferiori a – 3 m s.m., per lo più zone bonificate. I rilievi morfologici naturali sono costituiti prevalentemente dai cordoni litorali e dagli argini, con quote comprese tra 1 e 3 m s.m e solo localmente superiori a 3 m s.m.. In molti tratti di litorale sono proprio la duna attuale o gli antichi apparati dunali a costituire l'unica barriera tra mare e le aree depresse retrostanti.

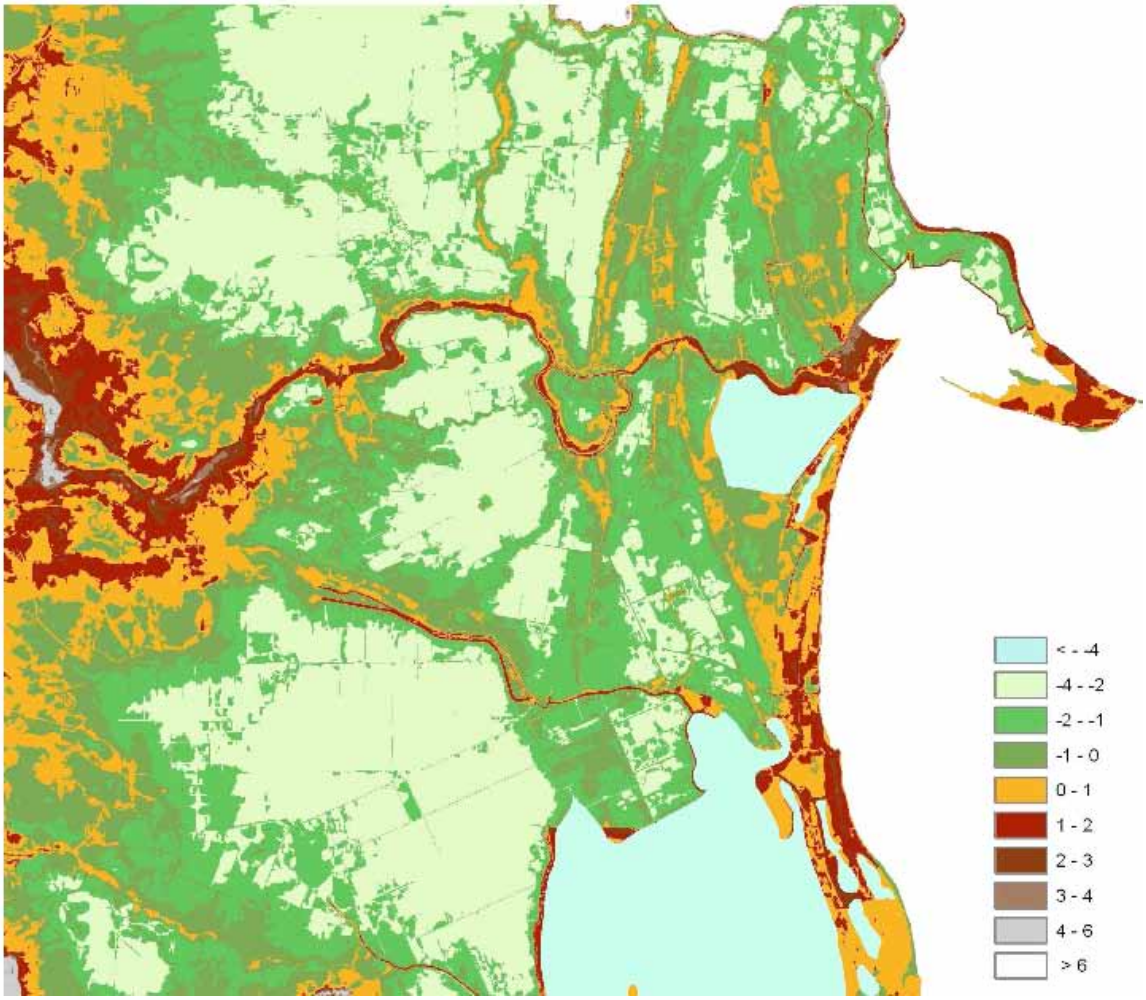


Figura 441 - Altimetria del delta del Po (da: Autorità di bacino del fiume Po, attività per la redazione di mappe della pericolosità e del rischio di alluvione, 2012)

21.2.3 Evoluzione storica

Nella tarda Età del Bronzo (circa 3000 anni fa) erano attivi due grandi rami del fiume: il Po di Adria, a nord, e il Po di Spina, a sud. Quest'ultimo ramo, che aveva una maggiore efficienza, si suddivise in seguito in due rami: l'Olana (poi Po di Volano) e il Padoa, da cui il nome "Po", noto anche come "Eridano".

Tale assetto idrografico si sviluppa in concomitanza di un notevole peggioramento climatico che probabilmente fu la causa, con l'aumento in intensità e frequenza degli alluvionamenti, della pressoché totale scomparsa degli insediamenti dell'Età del Ferro nell'area. La conformazione idrografica descritta si mantenne pressoché immutata per tutto il periodo romano e portò alla formazione di un ampio delta cuspidato, che si estendeva da Ravenna a Comacchio e si protendeva in mare per oltre 2-3 km dall'attuale linea di costa.

Durante il periodo etrusco e quello romano (VI a.C.-V d.C.), il fiume Po passa per Bondeno e Ferrara; in prossimità di Codrea si divide in due rami principali che si ripartivano poi in diversi rami di foce.

Con la fine del peggioramento climatico medievale (476-750 d. C.) e soprattutto con la rotta di Sermide, avvenuta nel VIII secolo d. C., si ha una progressiva decadenza dei rami che sfociano in territorio veneto. In epoca tardo-medioevale particolarmente evidente è il protendimento deltizio del Po di Volano (delta di Pomposa-Volano), accresciutosi di circa 7,5 km rispetto al periodo etrusco-romano. In seguito a una serie di rotte, avvenute nel XII secolo, la maggior parte del deflusso occupa un alveo coincidente all'incirca con l'attuale Po Grande (o Po di Venezia) che dà origine, in epoca rinascimentale, a un'ampia piattaforma deltizia.

In questo periodo si sviluppa il Gaurus, un ramo del Volano attivo per tutto il medioevo. Il Gaurus nasce dal Volano a Codigoro (Caput Gauri), si dirige verso nord passando per Mezzogoro (Medium Gauri) e Massenzatica. Successivamente i processi d'interrimento portarono all'occlusione del Gaurus, fino alla sua definitiva scomparsa nel XV secolo. Il percorso del Gaurus è ancor oggi evidenziato dalla strada che da Codigoro porta a Massenzatica e che ne costituiva uno degli argini. Nel IX secolo la foce del Gaurus raggiungeva e superava la posizione ora occupata da Mesola e a sud si consolidava il grande cordone litoraneo, detto poi Isola Pomposiana, che da Massenzatica si raccordava al Delta del Volano. Su quest'area, sopraelevata e al sicuro dalle alluvioni, fu costruita la via Romea e, dopo il VII secolo, si stabilì la comunità di monaci benedettini che diede origine all'insediamento di Pomposa. Verso il X secolo la subsidenza del suolo determinò il progressivo ingresso delle acque marine, che portò alla nascita e all'espansione delle grandi valli salmastre di Comacchio.

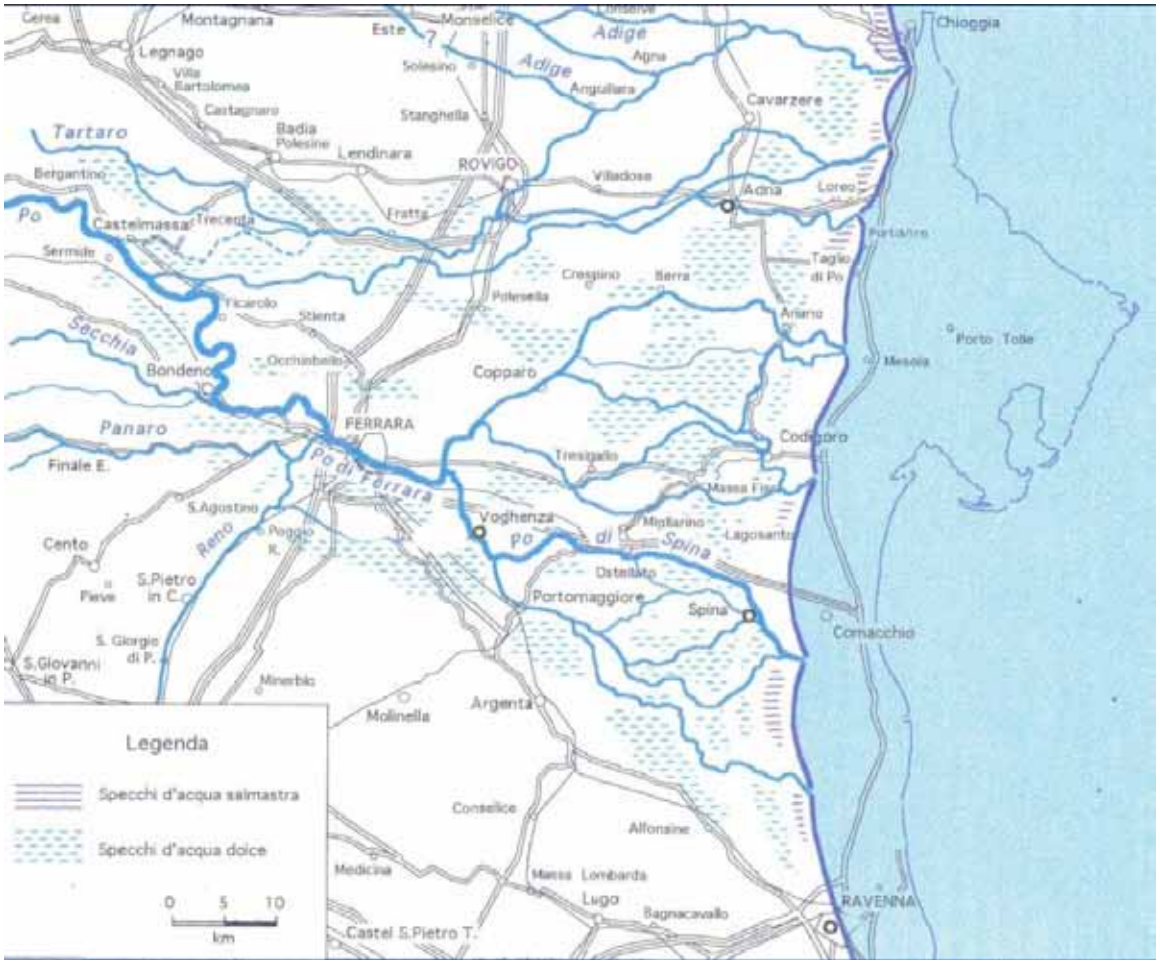


Figura 442 - Assetto del delta del Po attorno al V sec. a.C.

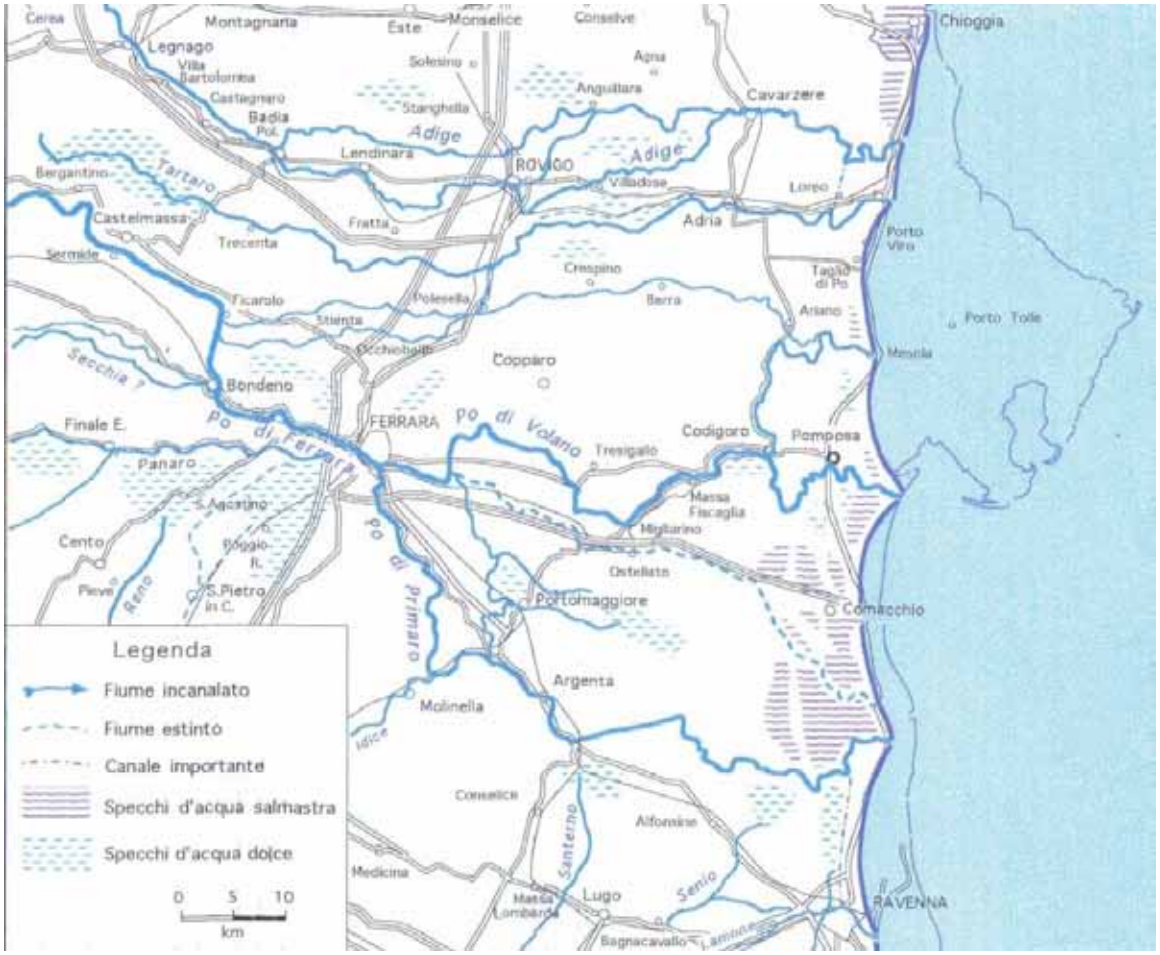


Figura 443 - Assetto del delta del Po attorno al X sec. d.C.

Le attuali condizioni di assetto dei rami del Delta derivano da due fatti storici fondamentali: la rotta di Ficarolo del 1152 e il taglio di Porto Viro del 1604.

Nel XII secolo, in occasione di piene particolarmente elevate, si manifestarono una serie di rotte presso Ficarolo (Rovigo), le quali portarono il fiume Po a percorrere l'alveo attuale (probabilmente il letto di un colatore preesistente), inizialmente denominato per l'appunto Po di Ficarolo. Tale nuovo corso determinò nei secoli una sempre minor efficienza dei rami di Volano e di Primaro.

Con la rotta di Ficarolo, l'assetto idraulico del fiume, assestatosi e consolidatosi fino al basso Medioevo, si viene dunque a spostare verso nord riattivando il protendimento del territorio verso il mare. A seguito del nuovo assetto venne anche estromesso il Reno, in precedenza anch'esso affluente del Po, mentre il Primaro divenne un ramo secondario del Po di Volano.



Figura 444 - Assetto del delta del Po a metà del XIV secolo

Nel Trecento la linea di costa passava poco a est di Mesola e il nuovo Po di Ficarolo aveva lo sbocco a mare vicino a Donada (Rovigo); tra il XIII e il XIV secolo una diramazione del Po, il Po di Ariano, si articolò in due rami di foce, quello propriamente detto di Goro, verso nord, e quello dell'Abate verso sud, tra i quali era compresa l'isola di Mesola. L'avanzamento della foce del ramo di Goro determinò la formazione di due lagune: a nord la Sacca di Goro, a sud la Sacca dell'Abate (attuale Sacca di Goro).

Nell Cinquecento, per prosciugare la grande area paludosa tra Copparo, Codigoro e Mesola (Polesine di Ferrara) fu avviata la Grande Bonifica Estense (1566-1572); regolando il deflusso verso il mare con due chiaviche principali: la Chiavica dell'Abate (attuale Torre Abate), che immetteva nella Sacca dell'Abate, e la Chiavica di Volano, nel Po di Volano; le opere non si mostrarono molto efficaci nel tempo per svariati motivi (peggioramento climatico, subsidenza, effetti del taglio di Porto Viro).

Alla fine del Cinquecento la Repubblica di Venezia progettò il taglio di Porto Viro che avrebbe indirizzato le acque del Po verso sud, preoccupata della possibilità di interrimento della laguna. I lavori (all'avanguardia per l'epoca) consistettero nello scavo di un canale di sei chilometri tra Porto Viro e la Sacca di Goro (che al tempo era a nord di Mesola), iniziarono nel 1600 e si protrassero per quattro anni.

Quest'opera segnò lo sviluppo del Delta moderno e causò molti problemi sulle coste ferraresi: la Sacca di Goro fu in breve tempo interrata dai sedimenti, si interrò il Porto dell'Abate e fu inondato quello di Volano (al tempo presso l'attuale abitato di Volano). Il conseguente malfunzionamento delle chiaviche qui situate decretò la fine della Grande Bonifica Estense; inoltre, per l'apporto di sedimenti del Po di Donzella (Po di Gnocca), il Po di Goro cominciò a piegare verso sud ingrandendo la Sacca dell'Abate. Il porto di Goro seguirà nel tempo l'avanzamento della foce del Po di Goro e nel

Novecento la Sacca dell'Abate prenderà l'attuale nome di Sacca di Goro.

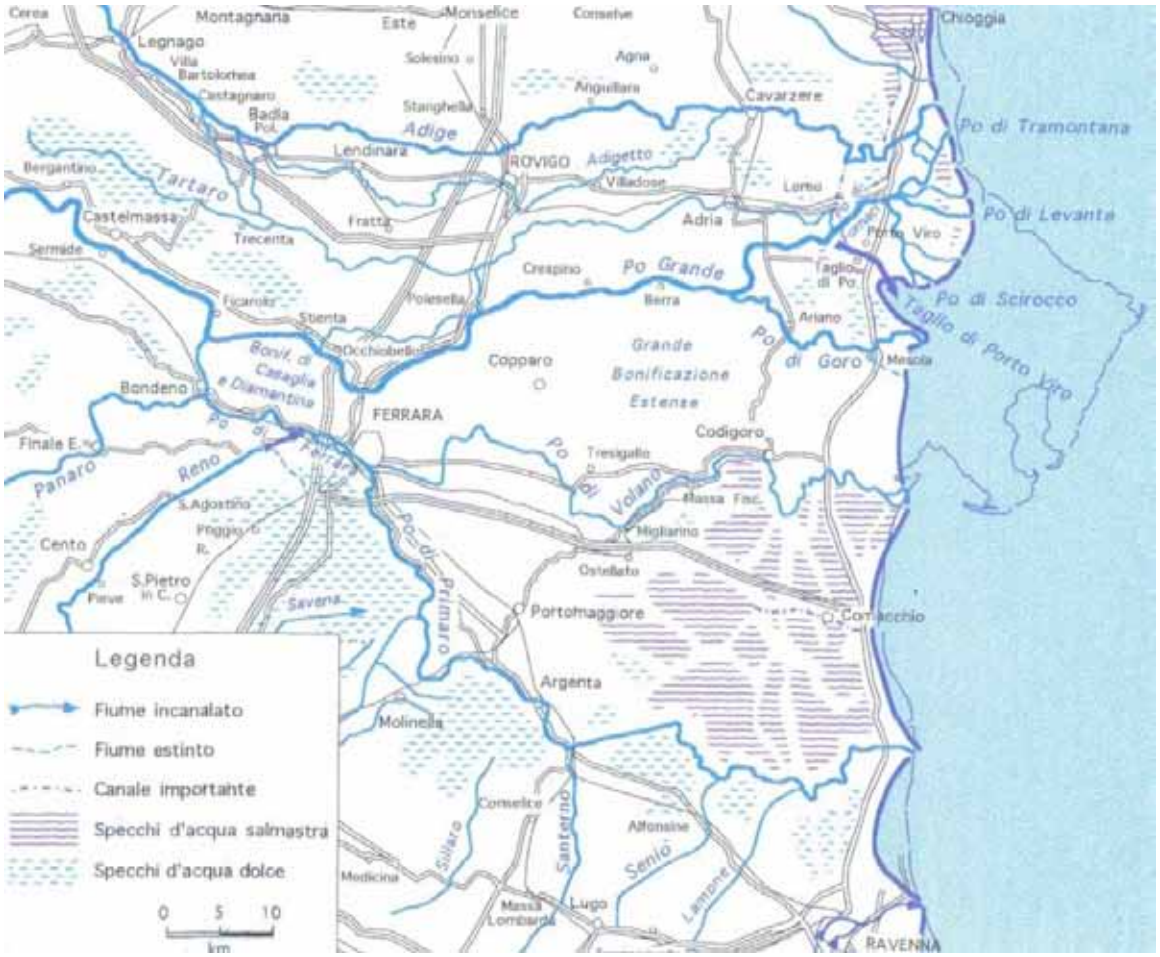


Figura 445 - Assetto del delta del Po alla fine del Cinquecento

Il taglio di Porto Viro e le grandi opere di bonifica realizzate a partire dal secolo scorso (e in particolare negli anni dal 1900 al 1970), sono i principali fattori della formazione dell'attuale morfologia deltizia.

Poco prima del taglio di Porto Viro, la posizione che ora è occupata dal territorio di Taglio di Po e di Porto Tolle lasciava il posto al mare e alla Sacca di Goro, formatasi in seguito all'avanzamento del Po delle Fornaci a Nord, con i suoi 3 rami (ramo di Tramontana, di Levante e di Scirocco), e del Po di Goro a Sud. La formazione del territorio di Porto Tolle risale agli inizi del XVIII secolo e si è sviluppata in maniera più accentuata durante tutto il 1800. La forte attività del Po di Goro e del Po di Gnocca, favorita dalla chiusura artificiale di alcuni rami del Po di Maistra, viene così a formare il primo embrione della Sacca di Scardovari, che troverà comunque come principale artefice il Po di Tolle, che sarà anche causa della formazione della parte sud orientale di Polesine Camerini.

Stime effettuate su un intervallo di tempo di 240 anni indicano un incremento di lunghezza dei rami del Po di oltre 83 m/anno: 20 km il Po di Goro, 24 km il Po di Maistra e 23 km il Po di Tolle.

Con gli inizi del XX secolo il fenomeno deposizionale subisce prima un rallentamento e quindi un'inversione, prevalentemente dovuta alla subsidenza innescata dal considerevole emungimento di acque metanifere. Nel periodo compreso tra il 1950 e il 1960 si assiste infatti a un arretramento della linea di costa, alla conseguente immersione di aree precedentemente formate e allo spostamento verso costa dei banchi sabbiosi.

Con la cessazione delle attività estrattive dal sottosuolo, la subsidenza si stabilizza verso valori simili agli anni precedenti al 1940, ma la diminuzione delle portate solide dei rami del Po, dovuta all'estrazione di materiali litoidi, determina ancora oggi problemi di apporto, particolarmente evidenti sin dalla seconda metà degli anni '60.

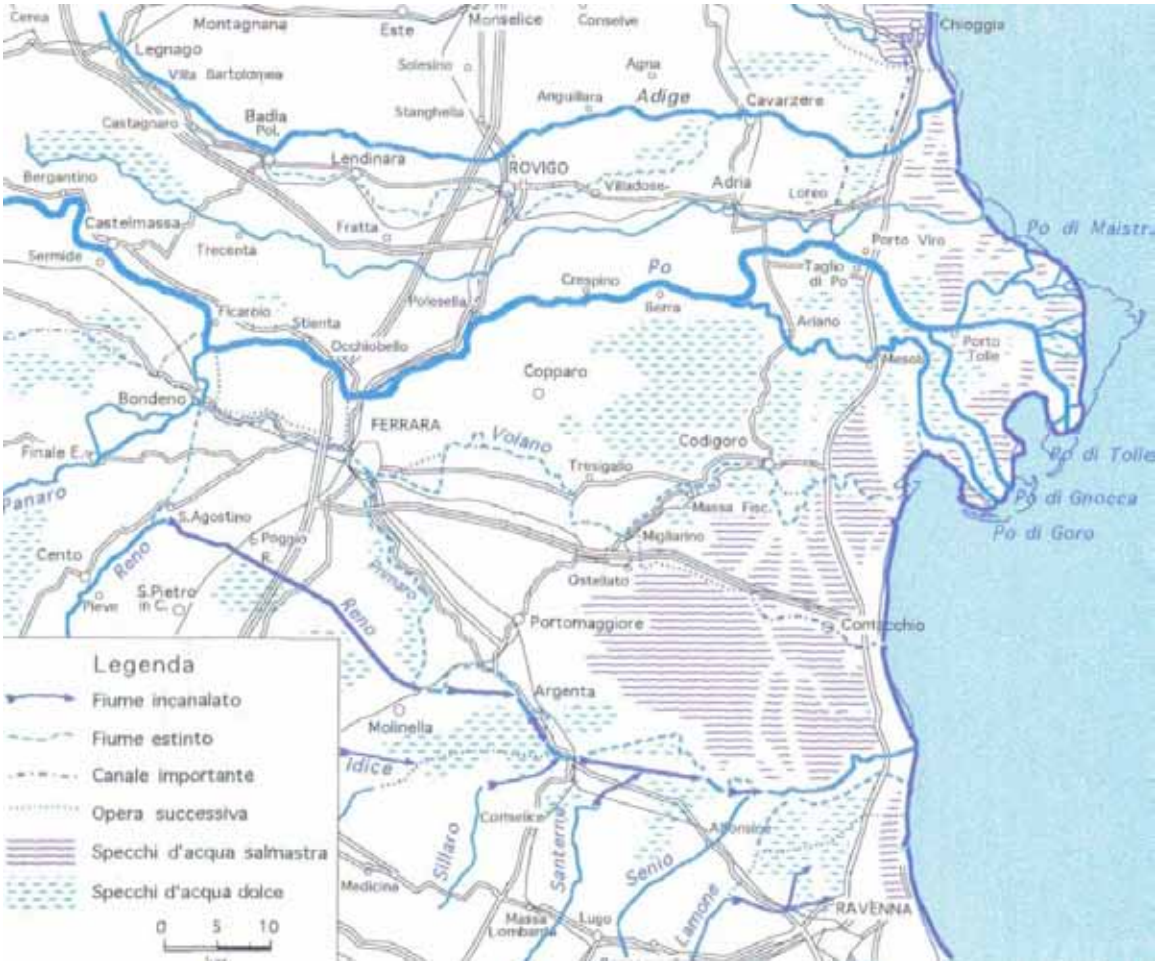


Figura 446 - Assetto del delta del Po nel 1860

Oggi il Po alimenta un delta che si protende a mare per circa 25 km, occupa una superficie di circa 400 km2 ed è bordato da un'ampia zona di prodelta sommerso, che si protende in mare per circa 6 km a settentrione e 10 km nell'area centro-meridionale.

Si stima che, attraverso i rami attuali, oggi siano portati a mare circa 4,7 milioni di t/anno di sedimenti che vanno ad alimentare le spiagge e i fondali antistanti. Questo apporto solido, ridotto di circa un terzo rispetto a quello della prima metà del '900, ha determinato l'instaurarsi, attorno agli anni "50 del secolo scorso, di una generale fase regressiva del litorale, con la sommersione di ampie zone costiere. In base alla classificazione triangolare, fondata essenzialmente sui rapporti tra fattori dinamici (apporti fluviali, marea e moto ondoso), l'assetto morfologico dell'attuale delta del Po è dunque rappresentativo di un regime dominato dalle onde, mentre in funzione della sua forma (classificazione morfologica) è assimilabile a un delta lobato e, infine, sulla base della dinamica sedimentaria (progradazione degli apparati), il delta risulta passivo o distruttivo, essendo la sua forma determinata e modellata dai processi marini.

L'evoluzione del territorio del delta è stata, dunque, determinata dalla successione e sovrapposizione di eventi ambientali complessi ai quali va sommata, specie negli ultimi secoli, l'azione modificatrice dell'uomo. La presenza di un fitto reticolo di canali, di numerose idrovore e di quote topografiche prossime allo zero testimoniano gli estesi interventi di bonifica, iniziati nel VI-X secolo d.C., che hanno ridotto drasticamente l'estensione delle aree paludose. Questi interventi, unitamente all'estrazione d'acque metanifere dai giacimenti quaternari, hanno accentuato gli abbassamenti dell'area del delta, già per sua stessa natura subsidente. Oggi la maggior parte del territorio si trova sotto il livello del mare (con bordi elevati verso mare e una vasta depressione al centro) ed è dominato, per parecchi metri, dalle piene dei rami pensili del Po.

21.2.4 Clima e maree

Il clima medio costiero è caratterizzato da venti provenienti dal I, II e IV Quadrante. I valori di massima altezza d'onda sono attribuibili ai venti di Bora (ESE) e di Levante (E) mentre le tempeste più frequenti sono prodotte dai settori compresi tra 60° e 120° (venti di Scirocco).

Al largo, l'altezza d'onda significativa (ovvero la media del terzo più alto delle onde presenti in una data superficie del mare) è inferiore a 0,5 m con provenienza principale da est mentre l'altezza d'onda massima più frequente, calcolata nel periodo 2000÷2004, risulta compresa tra 1,8 e 2 m con provenienza da NE ed E. Il regime tidale è asimmetrico con componenti sia diurne sia semi-diurne e la massima escursione di marea è di 1,2 m in sizigie.

E' stato osservato che i fenomeni di acqua alta sono il frutto di una combinazione di effetti astronomici e meteorologici; gli effetti "di sovralzo" costituiscono cioè lo scostamento tra l'andamento della marea osservata e la corrispondente marea astronomica.

Gli studi statistici condotti sui livelli massimi di marea in funzione del tempo di ritorno, secondo la distribuzione probabilistica di Weibull, portano a stimare, sulla base delle serie storiche disponibili, che un'altezza di 1,50 m corrisponde al tempo di ritorno di 25 anni e una di 2,00 m a circa 400 anni. Tra gli eventi storici più gravosi va ricordata la mareggiata che si è manifestata in concomitanza con la piena del Po del 1966, in cui all'idrometro di Tolle si è registrata un'altezza pari a 2,07 m s.m. che ha superato tutti i massimi storici precedenti.

L'analisi della serie storica delle altezze idrometriche nella stazione idrometrica di Pila nell'ultimo quindicennio mette in evidenza alcuni episodi di valori prossimi a 1,50 m e un caso in cui si è prossimi a 2,0 m.

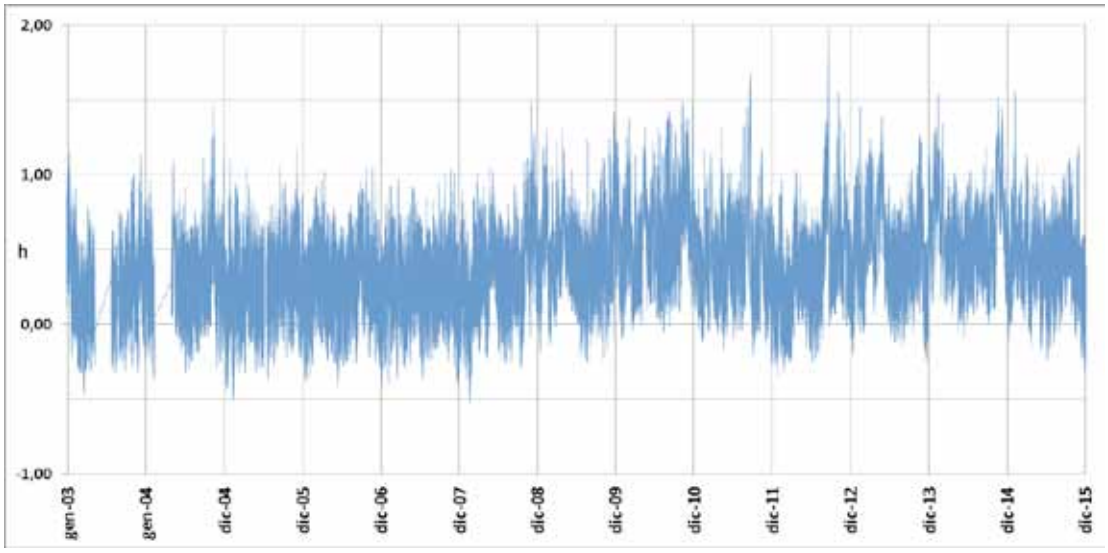


Figura 447 - Stazione idrometrica di Pila: serie storica delle altezze idrometriche orarie dal 2003 al 2015 (AIPO – Servizio di monitoraggio idrografico)

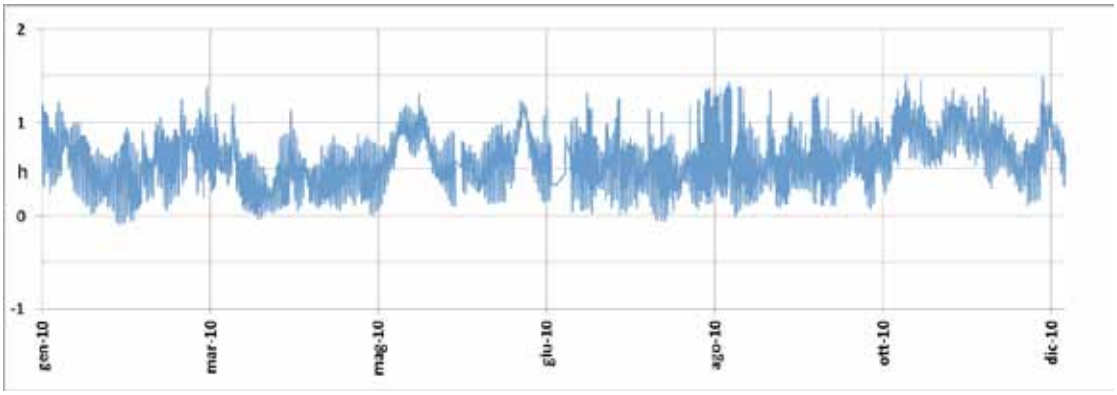


Figura 448 - Stazione idrometrica di Pila: serie storica delle altezze idrometriche orarie nell'anno 2010 (AIPO – Servizio di monitoraggio idrografico)

21.2.5 Batimetria

L'abbassamento dell'alveo nei rami del delta del Po è considerato una delle concause che interagiscono nel determinare il progressivo accentuarsi del fenomeno della risalita del cuneo salino.

Il ramo principale del Po nel tratto deltizio ha una serie di rilievi topografici delle sezioni trasversali eseguiti su un intervallo temporale significativo che permettono una lettura dell'evoluzione che è intervenuta (Figura 449 e Figura 450). La stessa informazione conoscitiva non è purtroppo disponibile per i rami minori. In ogni caso le trasformazioni del ramo principale sono un buon indicatore della batimetria complessiva.

Lungo il ramo principale, è stato considerato il tratto compreso tra la stazione idrometrica di Pontelagoscuro (progr. km 564,224 – sez. Brioschi 65) e lo sbocco diretto a mare della Busa Dritta (progr. km 655,553 – sez. 90) per una lunghezza complessiva di circa 91 km.

Il periodo di rilevamento per il quale sono disponibili i dati relativi alle campagne di rilievo topografico delle sezioni trasversali va dal 1954 al 2005, con numero complessivo di sezioni variabile tra una campagna di rilievo e l'altra.

Complessivamente sono stati esaminati i dati topografici relativi ai seguenti anni di rilievo:

- 1954, per un totale di 18 sezioni (da 65 a 82, quest'ultima posta in corrispondenza dell'incile del Po di Tolle) per una lunghezza di asta pari a 79 km;
- 1968-69, per un totale di 55 sezioni (da 65 a 82n, quest'ultima posta in corrispondenza del faro sulla Busa Dritta) per una lunghezza di asta pari a 89 km;
- 1979, per un totale di 18 sezioni (da 65 a 82, quest'ultima posta in corrispondenza dell'incile del Po di Tolle) per una lunghezza di asta pari a 79 km;
- 1984, per un totale di 10 sezioni (da 65 a 74, quest'ultima posta poco a valle dell'incile del Po di Goro) per una lunghezza di asta pari a 42 km;
- 1991, per un totale di 18 sezioni (da 65 a 82, quest'ultima posta poco a valle dell'incile del Po di Tolle) per una lunghezza di asta pari a 79 km;
- 2000, per un totale di 54 sezioni (da 65 a 90, quest'ultima posta allo sbocco diretto a mare della Busa Dritta) per una lunghezza di asta pari a 91 km;
- 2005, per un totale di 55 sezioni (da 65 a 90, quest'ultima posta allo sbocco diretto a mare della Busa Dritta) per una lunghezza di asta pari a 91 km.

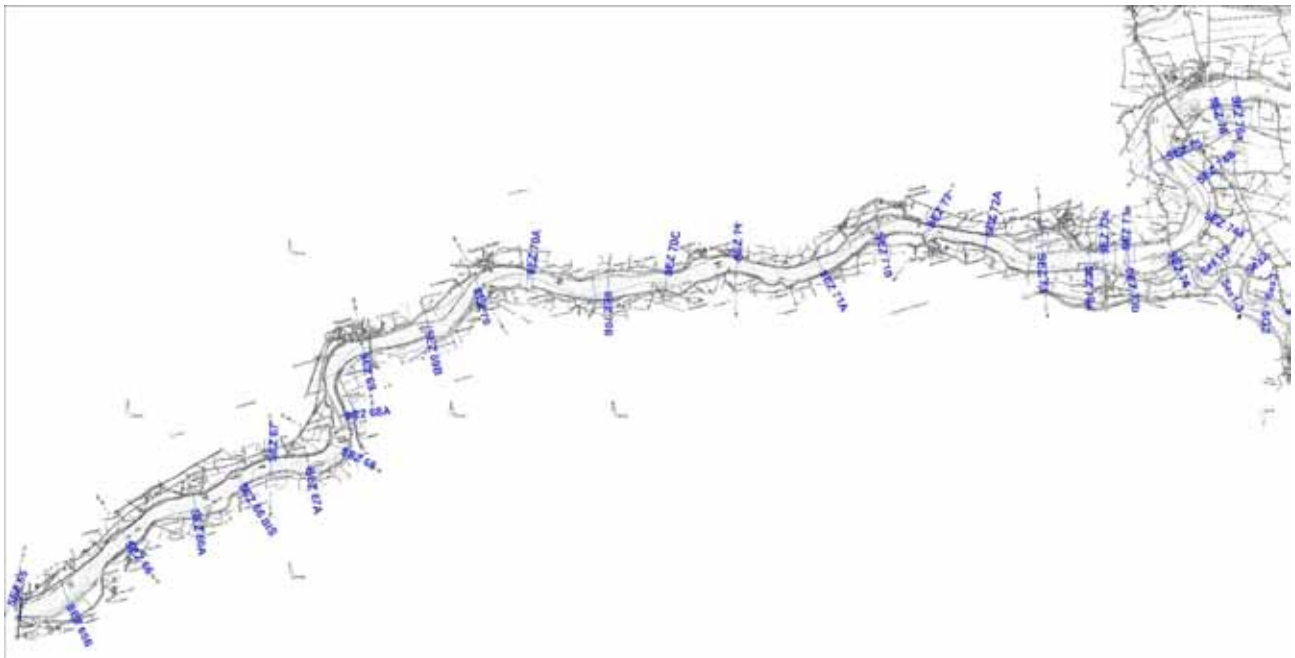


Figura 449 - Tratto Pontelagoscuro – incile del Po di Goro: ubicazione delle sezioni trasversali dell'alveo

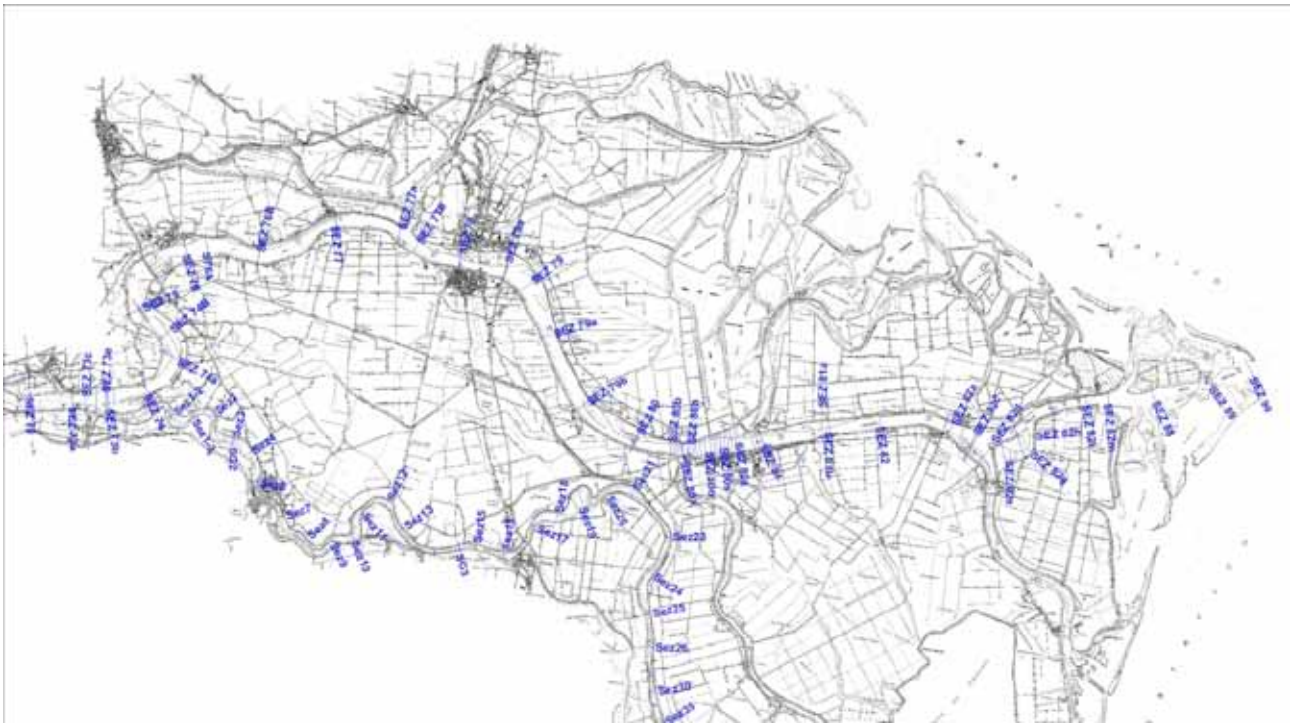


Figura 450 - Ramo principale del delta dal Po di Goro alla foce: ubicazione delle sezioni trasversali dell'alveo

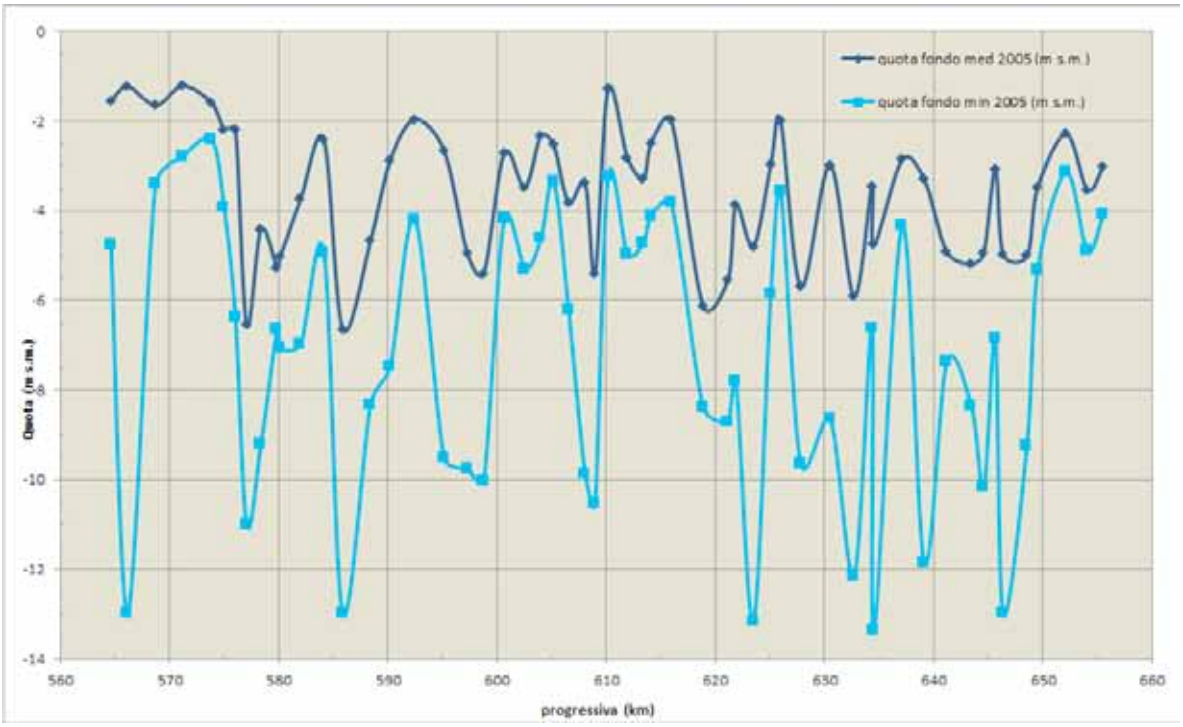


Figura 451 - Andamento dei valori del fondo minimo e del fondo medio lungo l'asta del Po tra Pontelagoscuro e la foce del ramo principale del delta

Gli indicatori utilizzati per l'analisi delle variazioni batimetriche sono costituiti dai seguenti due parametri:

- quota del fondo minimo, rappresentata dal punto più depresso della sezione trasversale (thalweg);
- quota del fondo medio, costituita dal valore della quota di fondo della sezione rettangolare equivalente, con larghezza pari a quella della superficie libera.

- Sulla base dei confronti effettuati emergono alcune considerazioni circa le modifiche della batimetria del fondo alveo che si sono manifestate nel corso degli ultimi 60 anni (Figura 452, Figura 453, Figura 454, Figura 455, Figura 456, Figura 457):
- le dinamiche risultanti devono essere interpretate anche alla luce di quanto si è manifestato nel tratto di Po a monte di Pontelagoscuro; a questo proposito va ricordato che da Isola Serafini a foce Parma si è avuto a partire dalla fine degli anni '60 del secolo scorso un continuo processo di erosione del fondo dell'alveo, soprattutto tra foce Adda e foce Arda; tale fenomeno non si è verificato in tali termini tra foce Parma e foce Oglio e si è invece manifestato in maniera consistente tra foce Oglio e Bergantino (MN); a valle di quest'ultimo punto, fino a Pontelagoscuro, l'alveo ha presentato condizioni di sostanziale stabilità;
- il primo rilievo disponibile, relativo all'anno 1954, è relativo a una condizione morfologica dell'alveo nel tratto a monte di Pontelagoscuro precedente al periodo in cui si sono innescati ed evoluti i consistenti fenomeni di erosione del fondo che hanno provocato gli abbassamenti di fondo che si sono riscontrati successivamente; tale rilievo è inoltre di pochi anni successivo alla piena storica del 1951 e quindi anche dal punto di vista strettamente idrologico costituisce un riferimento importante;
- con riferimento alle quote di fondo minimo, rispetto al 1954 il fondo "attuale" (rappresentato dal rilievo del 2005) denuncia un abbassamento distribuito lungo tutto il tratto dell'ordine del metro; per altro si osserva che tale abbassamento è concentrato (naturalmente in valore maggiore) nella porzione a monte dell'incile del Po di Goro, mentre a valle – e quindi lungo il ramo principale del delta vero e proprio – i valori delle quote sono molto più prossimi; in sostanza quindi il ramo propriamente deltizio non pare avere subito abbassamenti significativi delle quote di thalweg rispetto al 1954;
- si osserva inoltre, tra la situazione del 2000 e quella del 2005, un andamento molto simile, con il 2005 che mostra una leggera presenza di valori più elevati, probabilmente da correlare agli effetti della piena dell'ottobre 2000;
- se si prende a riferimento invece la condizione del 1979, l'assetto più recente (2000 e 2005) mostra un chiaro innalzamento per valori decisamente apprezzabili in particolare con riferimento all'anno 2005 (valore medio pesato lungo il tratto di circa 1 m); in questo caso i valori più accentuati si manifestano decisamente nella parte a valle del Po di Goro;
- risulta infine che il massimo abbassamento di fondo si ha tra il 1954 e il 1979 (circa 2 m), anche in questo caso localizzato prevalentemente a monte dell'incile del Po di Goro; tale abbassamento è stato in parte recuperato nel periodo successivo;

1954-1979	1954-1991	1954-2000	1954-2005	1979-1991	1979-2000	1979-2005
2,12	1,51	1,23	0,92	-0,35	-0,63	-0,96

Tabella 160 - Abbassamento medio pesato (m) nel tratto tra Pontelagoscuro e la foce del fondo minimo

- le valutazioni precedenti relative all'evoluzione del fondo minimo sono sostanzialmente confermate anche se si fa riferimento alle quote di fondo medio; in questo caso il bilancio complessivo sul tratto esaminato porta un confronto tra 1954 e anni 2000-2005 con valori quasi in parità e l'analisi dell'andamento lungo il tratto mostrano nel tratto a monte del Po di Goro un fondo medio al 1954 più alto di quello recente (quindi con un certo valore di erosione) e la situazione opposta nel tratto deltizio);
- viene confermata decisamente la condizione rispetto al 1979, con l'assetto più recente (2000 e 2005) che risulta ovunque più elevato in particolare in tutta la parte a valle del Po di Goro;
- il massimo abbassamento di fondo medio rispetto al 1954 si è manifestato nel 1979 (con il 1991 che ha mantenuto caratteristiche poco diverse) localizzandosi in maniera decisamente più accentuata a monte dell'incile del Po di Goro.

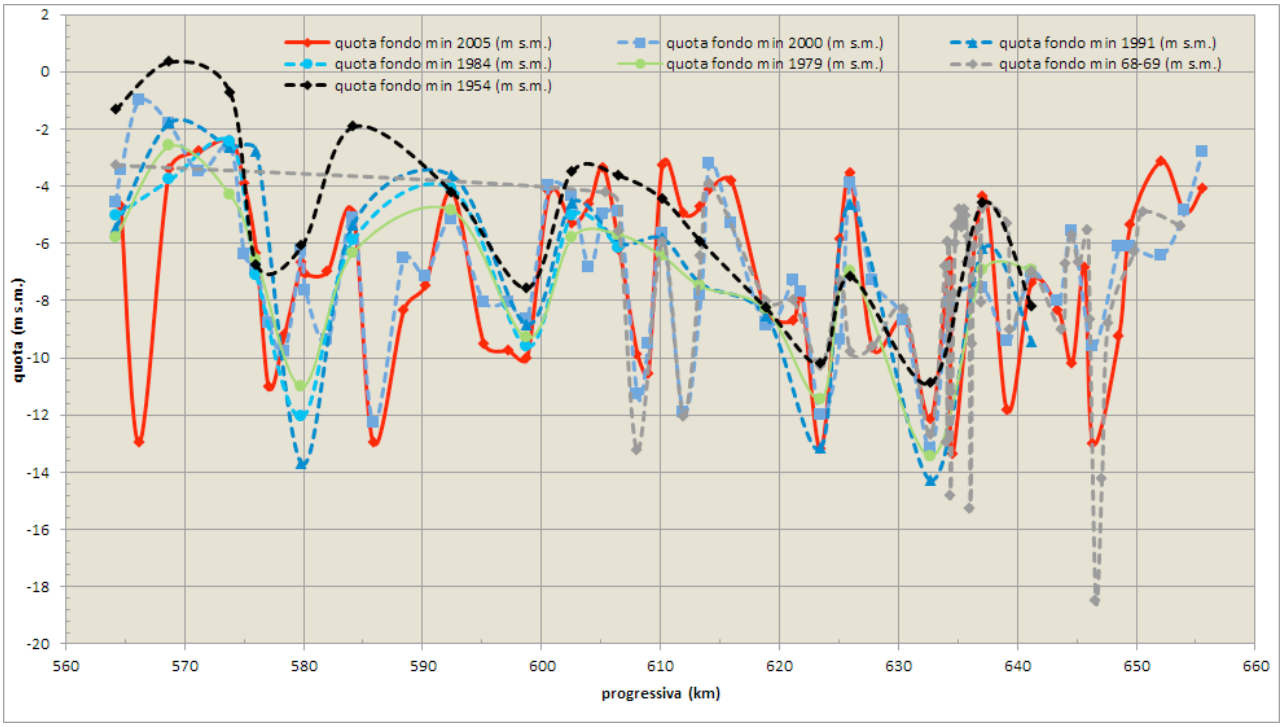


Figura 452 -Andamento delle quote di fondo minimo dell'alveo nel tratto tra Pontelagoscuro e la foce sulla base delle sezioni dell'alveo rilevate negli anni 1954, 1968-69, 1979, 1984, 1991, 2000 e 2005

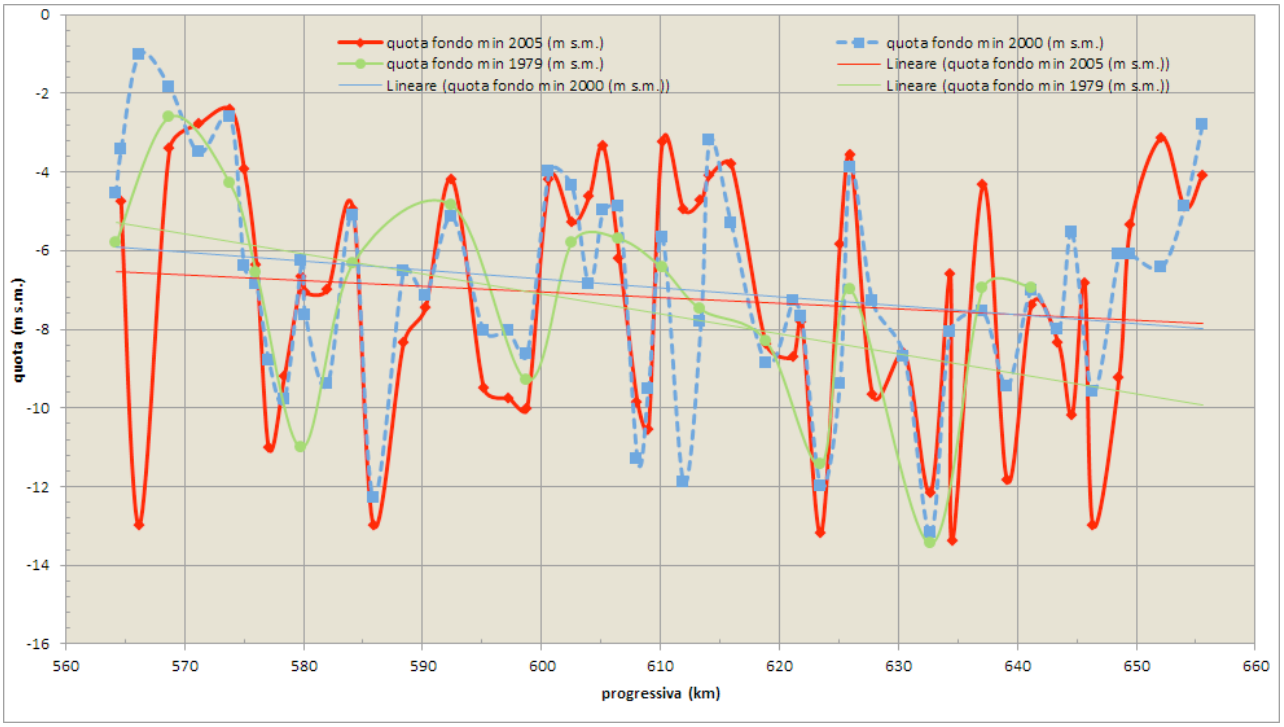


Figura 453 - Andamento delle quote di fondo minimo dell'alveo nel tratto tra Pontelagoscuro e la foce sulla base delle sezioni dell'alveo rilevate negli anni 1979 , 2000 e 2005

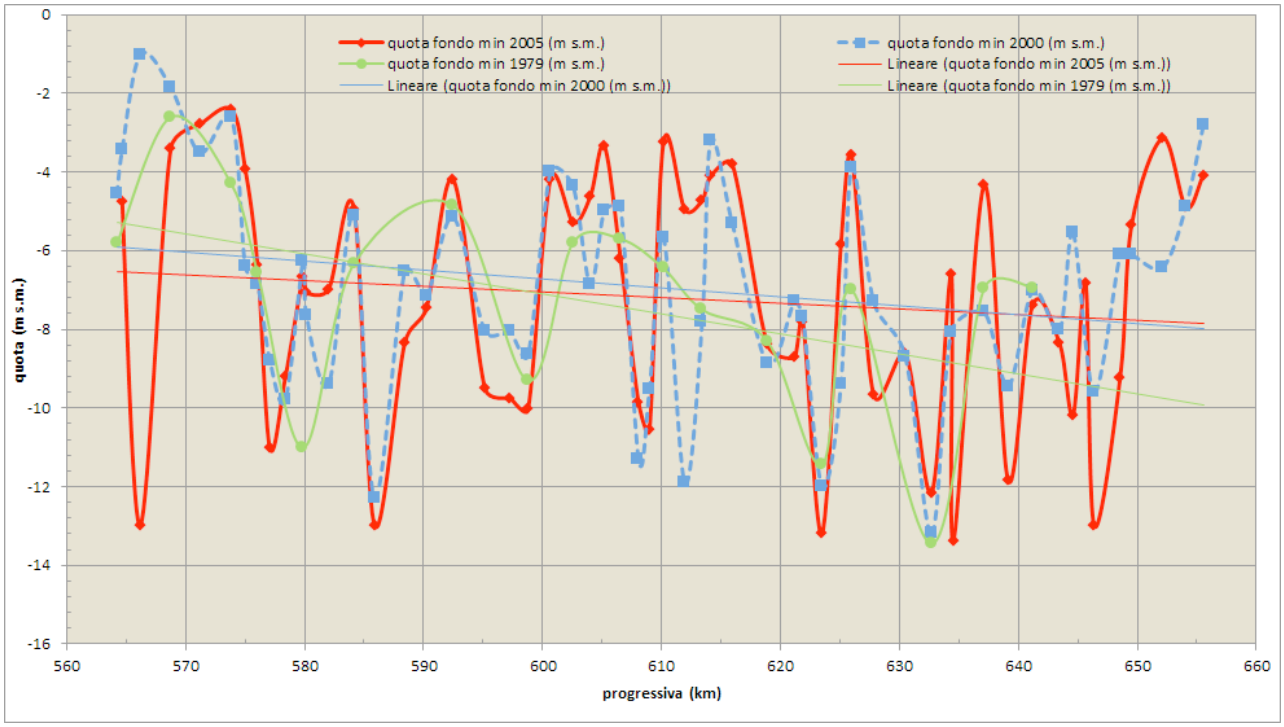


Figura 454 - Andamento delle quote di fondo minimo dell'alveo nel tratto tra Pontelagoscuro e la foce sulla base delle sezioni dell'alveo rilevate negli anni 1954 , 2000 e 2005

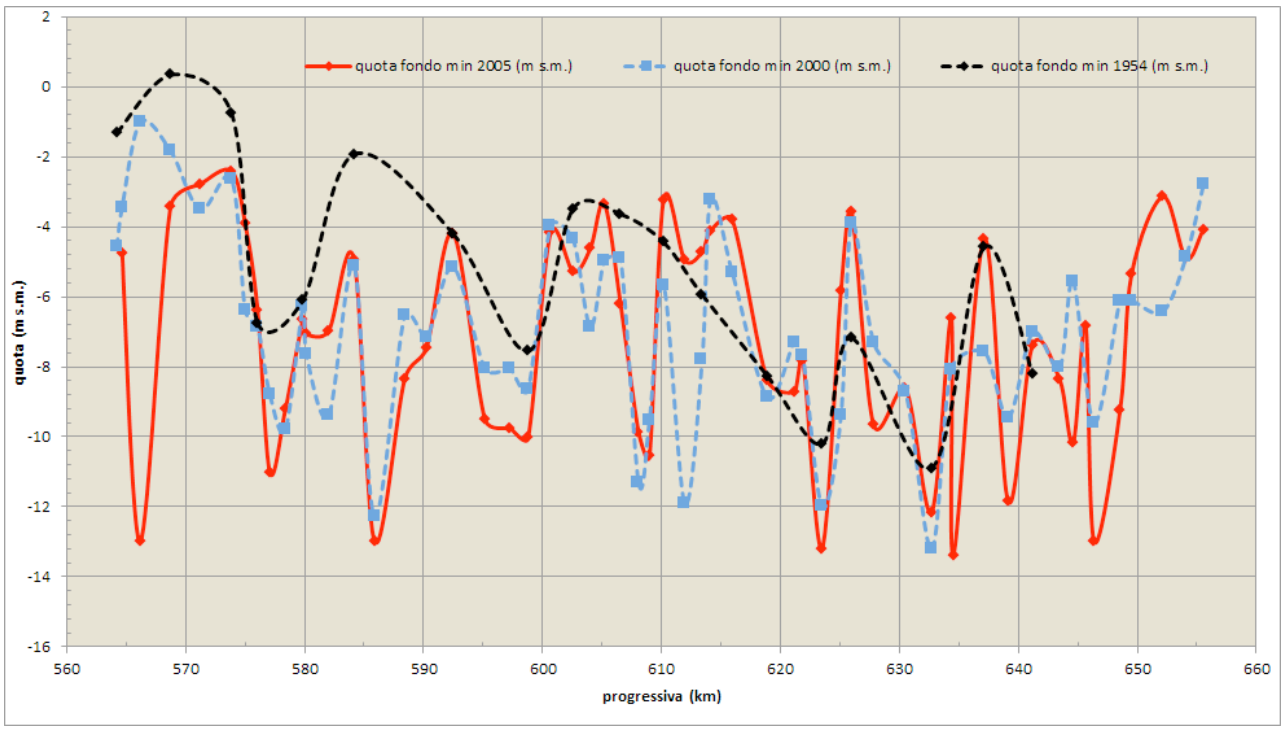


Figura 455 - Andamento delle quote di fondo medio dell'alveo nel tratto tra Pontelagoscuro e la foce sulla base delle sezioni dell'alveo rilevate negli anni 1954, 1968-69, 1979, 1984, 1991, 2000 e 2005

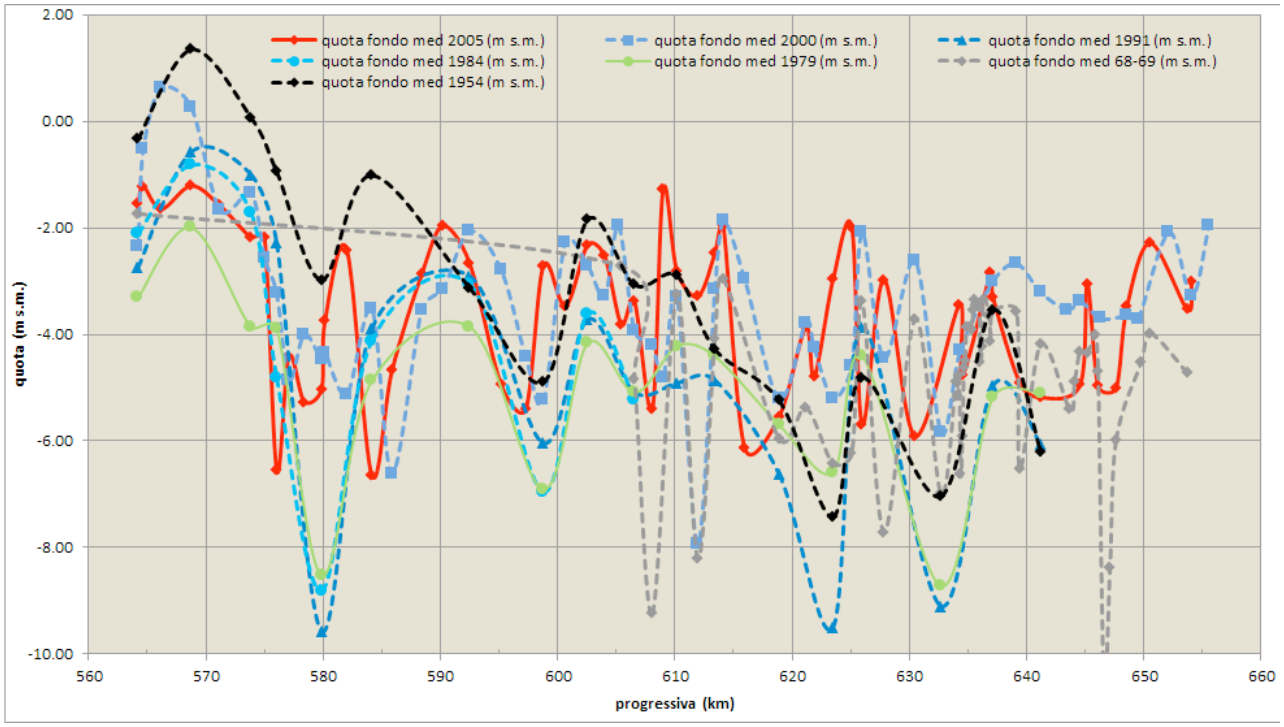


Figura 456 - Andamento delle quote di fondo medio dell'alveo nel tratto tra Pontelagoscuro e la foce sulla base delle sezioni dell'alveo rilevate negli anni 1979 , 2000 e 2005

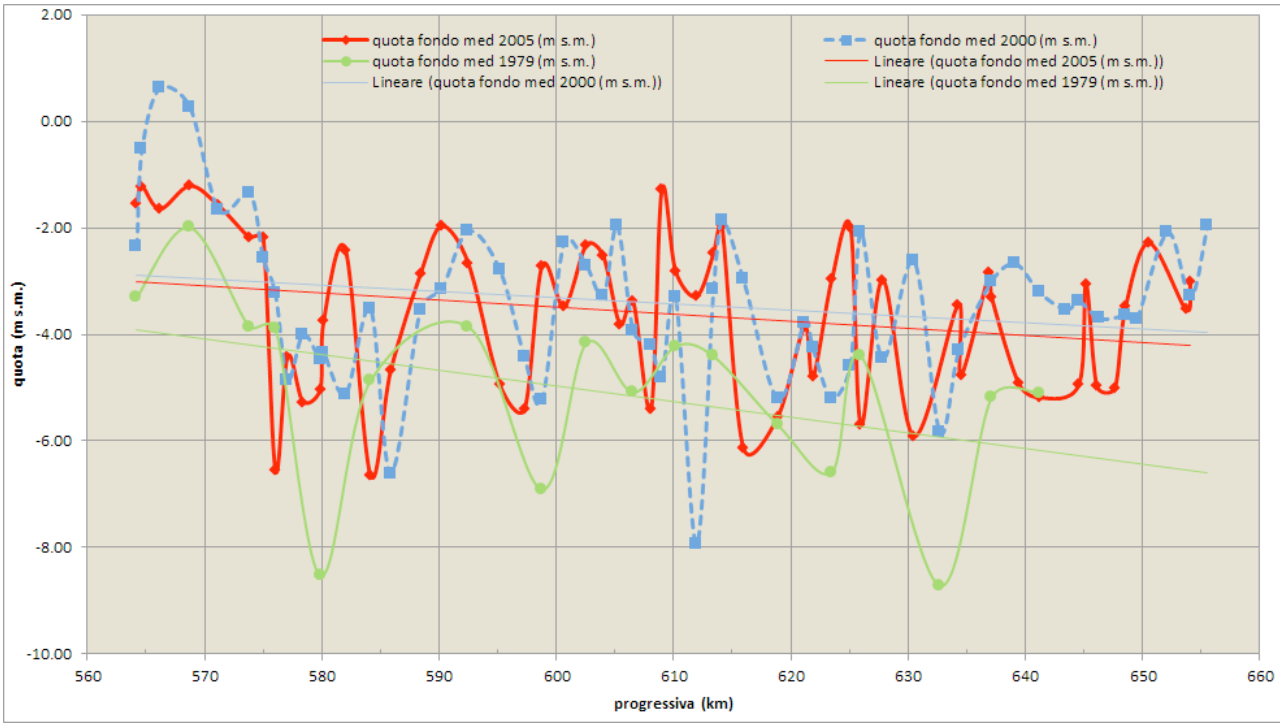


Figura 457 - Andamento delle quote di fondo medio dell'alveo nel tratto tra Pontelagoscuro e la foce sulla base delle sezioni dell'alveo rilevate negli anni 1954 , 2000 e 2005

ABBASSAMENTO MEDIO PESATO (M) NEL TRATTO TRA PONTELAGOSCURO E LA FOCE DEL FONDO MEDIO						
1954-1979	1954-1991	1954-2000	1954-2005	1979-1991	1979-2000	1979-2005
1,83	1,52	-0,01	0,18	-0,24	-1,78	-1,63

21.2.6 Caratteristiche idrologiche

Le caratteristiche idrologiche sono rappresentate dalla stazione di misura di Pontelagoscuro, la cui serie storica inizia del 1922 (la stazione funziona a partire dal 1807) che costituisce la sezione di chiusura dell'intero bacino idrografico del fiume Po. La stazione è posta a circa 91 km dalla foce e a 41 km dall'incile del Po di Goro.

Le caratteristiche principali della stazione sono rappresentate dai seguenti valori:

superficie del bacino idrografico sotteso: 70.091 km^2;

- portata massima: 10.300 m^3/s (14 nov. 1951);
- portata minima: 156.39 m^3/s (21 lug. 2006);
- portata media: 1500 m^3/s (1923-1990 e 1992-2000 e 2003-2013).

Rispetto alla serie storica disponibile, è stato preso in considerazione il periodo più recente, compreso tra il 1990 e il 2013, che attraverso i valori di portata giornaliera dà modo di osservare il regime idrologico in relazione alle condizioni sia climatiche che di uso della risorsa idrica a monte.

In questo periodo si sono verificate due piene di gravosità eccezionale soprattutto per il tratto alto e medio del corso d'acqua – rispettivamente nel 1994 e nel 2000 – e numerosi anni critici a causa di magre estive (2003, 2004, 2005, 2006, 2007); per quest'ultimo aspetto si osserva che la portata minima storica precedente al 1990, pari a 275 m^3/s nel 1949, è stata abbassata una prima volta nel 2003 con 239 m^3/s e una seconda volta con 156 m^3/s nel 2006.

Nel 2003 il periodo continuativo di portate inferiori a 330 m^3/s (16 giorni in luglio e 9 in agosto), fu sufficiente per mettere in crisi il sistema irriguo locale; nel 2005 il periodo critico iniziò il 15 giugno e terminò il 12 agosto con brevi interruzioni, per un totale di 35 giorni; nel 2006, già dal 9 giugno la magra ha causato l'intrusione dell'acqua salata fino a oltre 20 km dal mare per 60 giorni complessivi.

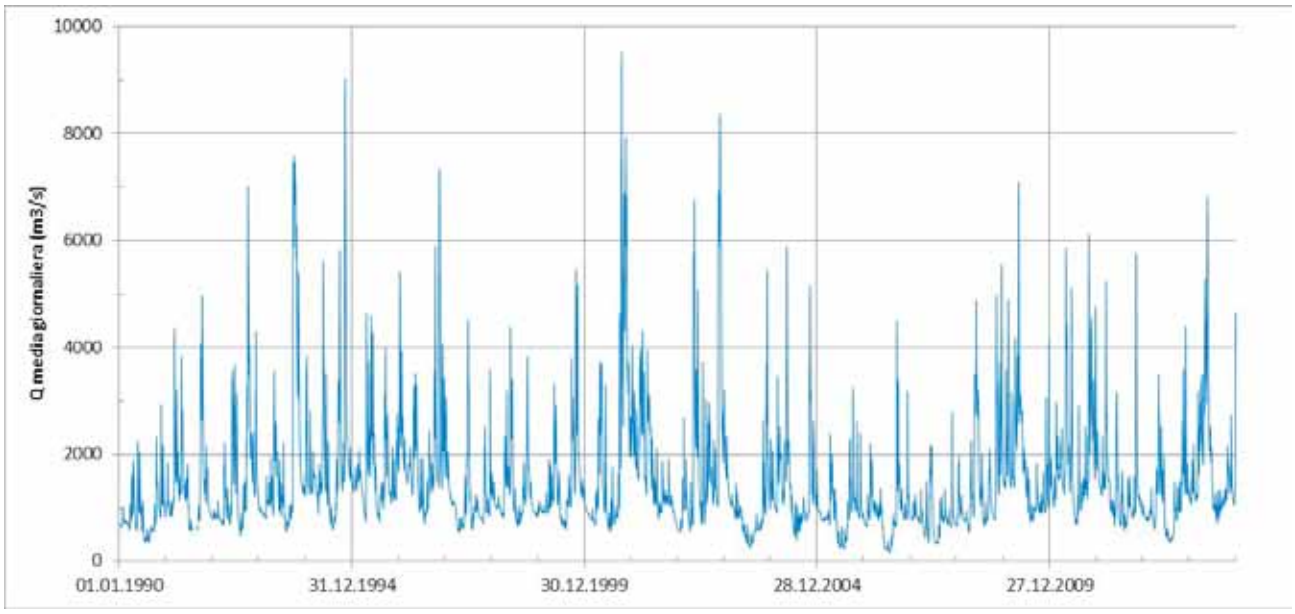


Figura 458 - Serie storica delle portate giornaliere a Pontelagoscuro relative al periodo 1990÷2013

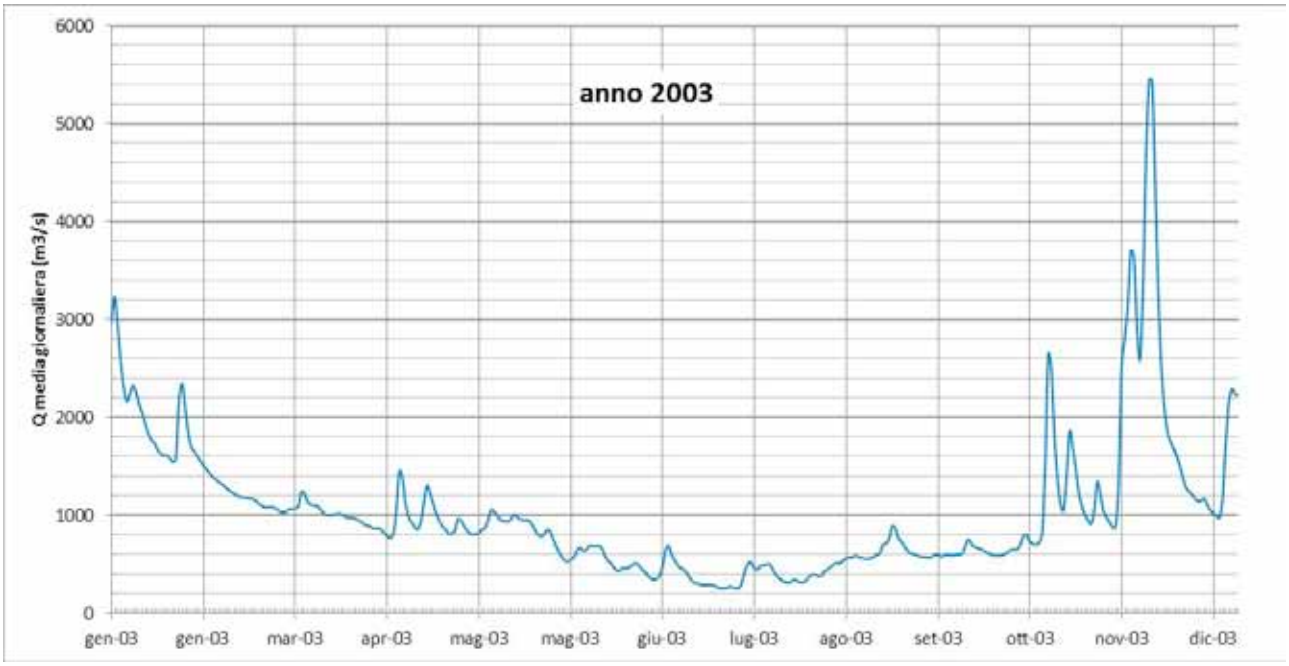


Figura 459 - Serie storica delle portate giornaliere a Pontelagoscuro relative all'anno 2003

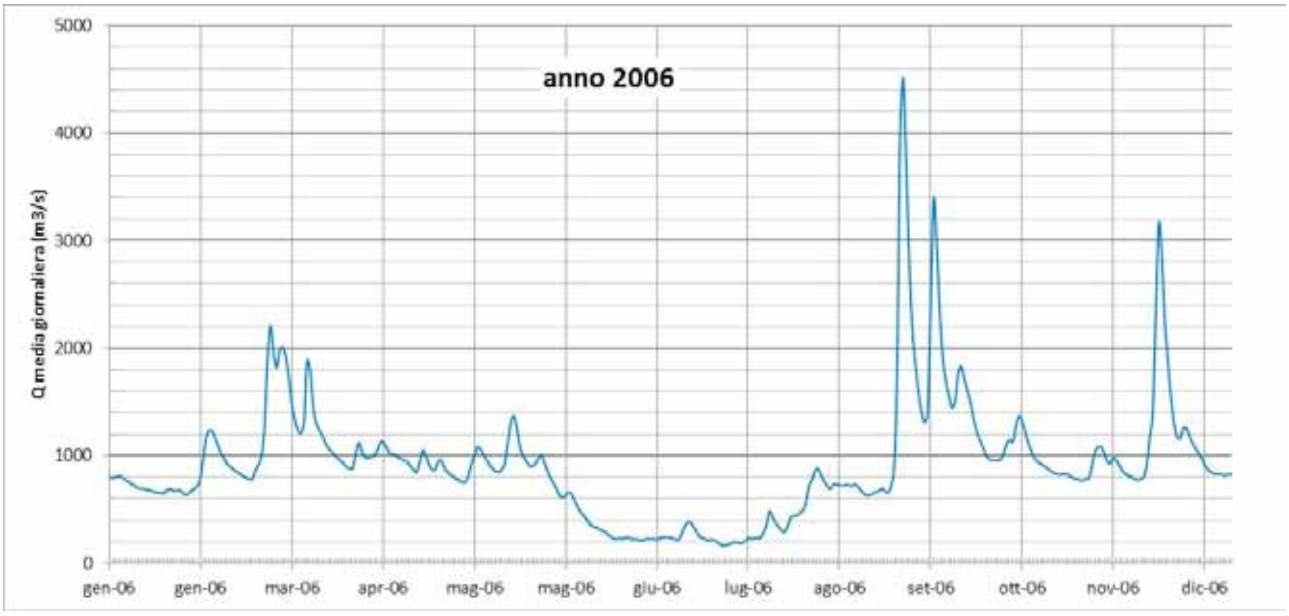


Figura 460 - Serie storica delle portate giornaliere a Pontelagoscuro relative all'anno 2006

In specifico per i valori delle magre, nella stazione di Pontelagoscuro è disponibile una serie storica notevolmente estesa (a partire dal1923); su di essa sono pertanto piuttosto attendibili le analisi di tipo statistico, naturalmente nell'ipotesi di assenza di mutamento del clima (ossia di assenza di variazioni di lungo periodo della serie).

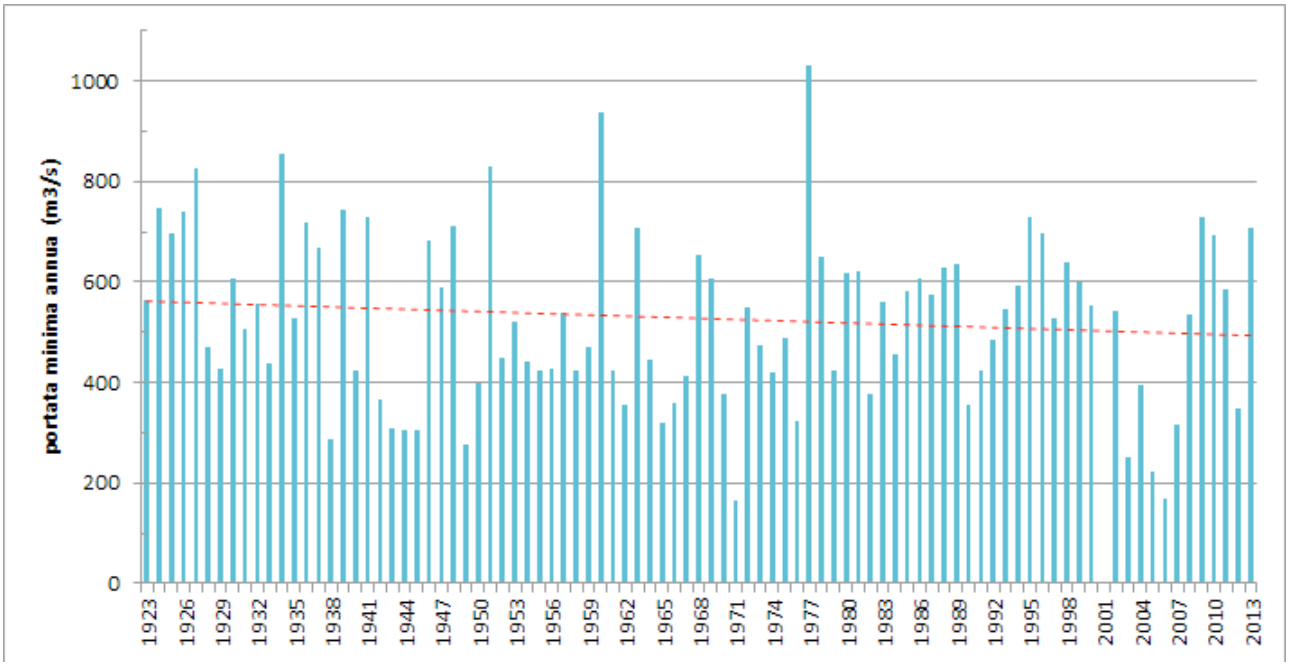


Figura 461 - Serie storica delle portate minime annue a Pontelagoscuro nel periodo 1923-2013

In realtà una semplice analisi della serie permette di evidenziare un debolissimo trend a decrescere dell'ordine di 0,75 m^3/s all'anno sui 90 anni di osservazioni. Va tenuto conto che nel periodo considerato, mentre gli effetti di un possibile mutamento del clima sono di quantificazione molto complessa, si è sicuramente manifestato un forte incremento delle derivazioni idriche a uso irriguo in tutto il tratto a monte, che hanno sicuramente effetti molto più diretti sull'entità dei deflussi estivi.

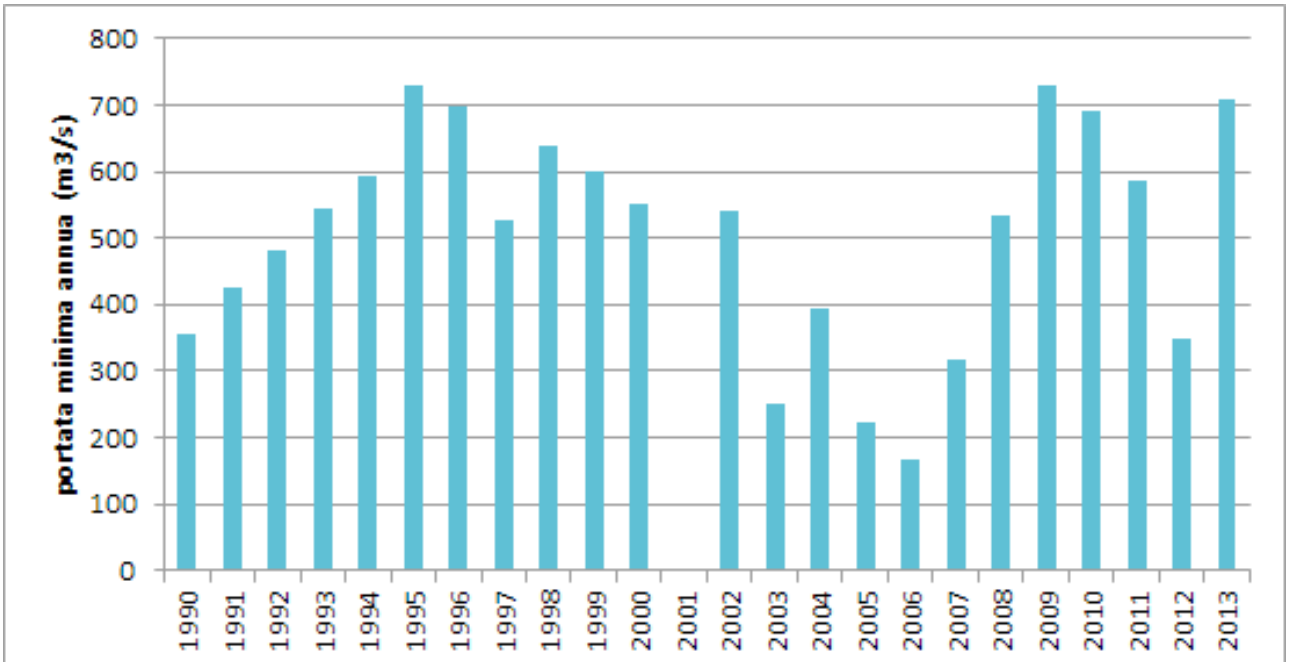


Figura 462 - Serie storica delle portate minime annue a Pontelagoscuro nel periodo 1990-2013

Facendo riferimento all'ipotesi di stazionarietà del clima per questo specifico fenomeno la serie storica è stata analizzata per la caratterizzazione statistica dei valori di portata minima annua attesa in funzione del tempo di ritorno.

E stata utilizzata la distribuzione di Pearson a 3 parametri, considerando sia la serie storica completa (1) sia quella relativa al solo periodo 1990-2013 che risulta molto più gravoso in termini di ricorrenza

dei valori più bassi. Naturalmente la secondo serie è meno rappresentativa essendo costituita da un campione meno numeroso.

Si ottengano i valori di seguito esposti:

T (anni)	Q1(*) (m3/s)	Q2(**) (m3/s)
1,33	634	616
10	317	289
20	273	245
50	228	201
100	197	174

(*) serie completa 1923-2013 (**) serie parziale (1990-2013)

Il valore della magra ordinaria (definita come la portata che supera o uguaglia le minime portate annuali verificate in una sezione idrometrica in 3/4 degli anni di osservazione, quindi con tempo di ritorno di 1,33 anni) risulta essere compresa tra 616 e 63a m3/s; risulta invece che la minima storica registrata nel 2006 (156 m3/s) avrebbe un tempo di ritorno superiore ai 100 anni, mentre il valore di poco superiore a 200 m3/s corrisponderebbe a 50 anni circa.

Rispetto alla caratterizzazione del regime idrologico attuale, cioè quale emerge dalle serie storiche delle misure di portata disponibili, sono state svolte da diversi soggetti analisi rivolte a prevederne l'evoluzione mettendo in conto il fenomeno della mutazione climatica con lo scopo principale di valutare le azioni da porre in atto per i necessari adattamenti.

Ad esempio l'ARPA Emilia-Romagna ha proposto recentemente un'elaborazione per stimare la variazione della magra ordinaria alla sezione del Po a Pontelagoscuro in condizioni di cambiamento climatico, simulato mediante una modellistica numerica integrata di tipo climatico, idrologico e di bilancio idrico. Rispetto al valore attuale, stimato in 650 m3/s, coerente con le valutazioni statistiche prima esposte, i risultati portano a una riduzione significativa: 530 m^3/s nel 2030, 490 m^3/s nel 2050 e 400 m^3/s nel 2100.

Un ultimo elemento di interesse per la caratterizzazione idrologica è rappresentato dalla r**ipartizione delle portate tra i diversi rami del delta**.

Il tema è di notevole importanza in quanto la conoscenza del regime idrodinamico nelle differenti condizioni idrometriche assume un ruolo rilevante sia per la definizione degli interventi strutturali di difesa dalle piene sia, in regimi di magra, per la previsione e la prevenzione dei fenomeni di intrusione del cuneo salino lungo i diversi rami.

Inoltre l'officiosità idraulica dei diversi rami è correlata al trasporto di sedimenti verso il tratto costiero. In questo ambito, ARPA Veneto, ARPA Emilia-Romagna e il Consorzio di Bonifica Delta Po Adige operano da tempo in collaborazione per l'esecuzione di misure di portata liquida e torbida.

Va infine ricordato che le prime campagne di misura sulle portate dei rami del Delta risalgono al periodo 1926-1938 (M. Visentini, UIPO - Ricerche idrografiche nel Delta del Po; Ministero dei Lavori Pubblici, Servizio Idrografico, Pubblicazione n.14, Vol. 2, Roma, 1940) e che le indagini nei periodi successivi fino agli ultimi anni sono state impostate mantenendo le stesse modalità, in particolare per quanto riguarda la localizzazione delle sezioni di misura. Si tratta quindi di una serie storica complessiva del tutto confrontabile e omogenea.

In proposito, il rapporto del 2012 di ARPA Veneto "*Sulla ripartizione delle portate del Po tra i vari rami e le bocche a mare del delta: esperienze storiche e nuove indagini all'anno 2011*" dopo avere esposto i risultati delle ultime campagne di indagine condotte, esprime le seguenti valutazioni sulla base dell'analisi della serie storica dei dati di misura:

- il Po di Goro manifesta nel tempo un incremento di efficienza idraulica in tutti i regimi idrometrici, in particolare all'aumentare della portata complessiva; le misure dirette di ripartizione tra Po di

Venezia e Po di Goro in acque medie mostrano un significativo scostamento rispetto al trend dei dati storici;

- i dati recenti sul Po di Gnocca evidenziano una certa stazionarietà del suo comportamento in tutti i regimi idrometrici;
- il Po di Maistra ha evidenzia un progressivo incremento di officiosità nell'arco di un intero secolo, pur essendo ancor oggi il ramo meno significativo; la sua officiosità tende a crescere per crescenti valori degli apporti complessivi;
- il Po di Tolle mostra, fino alla fine degli anni '50 una leggera riduzione della sua efficienza idraulica in tutti gli stati idrometrici; i dati successi invece suggeriscono un'inversione di tendenza, soprattutto in condizioni di "acque alte"; speculare è invece il comportamento del Po di Pila, con una progressiva diminuzione della capacità idraulica con andamento tendenzialmente decrescente all'aumento della portata complessiva.

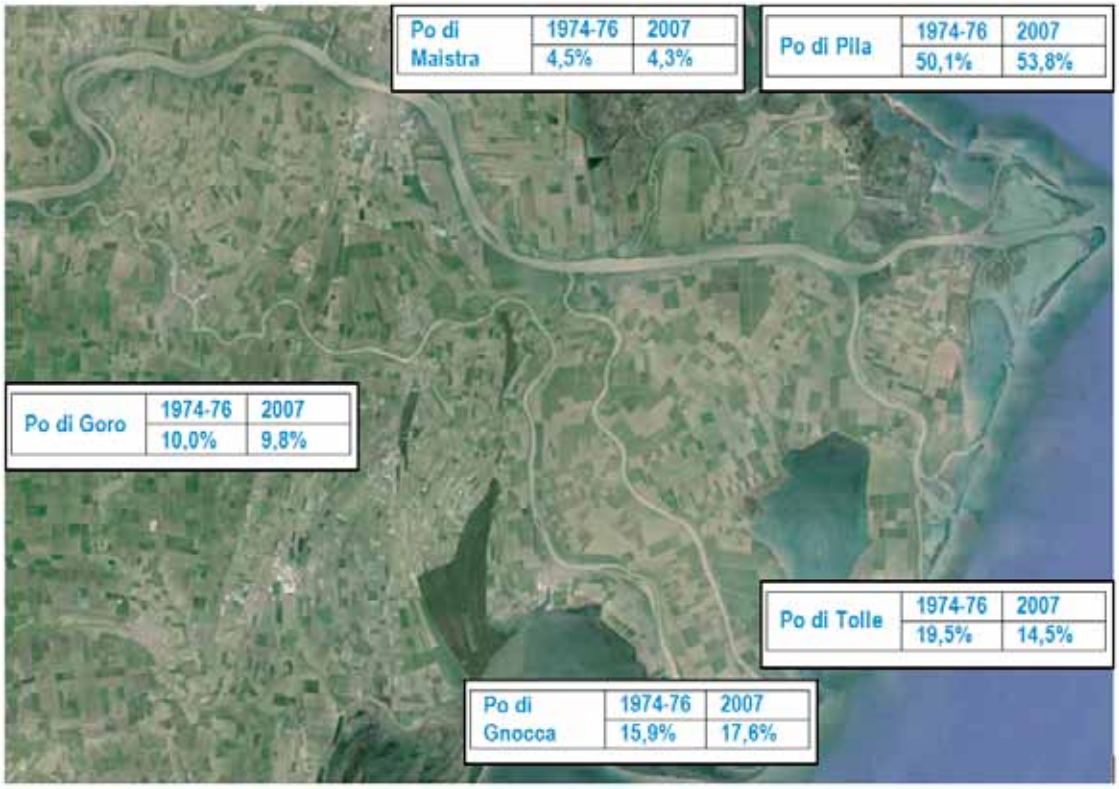


Figura 463 -Ripartizione percentuale delle portate nei rami del Delta per il triennio1974-76 e per l'anno 2007 nelle condizioni di acque medie (ARPA Emilia-Romagna)

21.2.7 Caratteristiche attuali del fenomeno di risalita del cuneo salino

L'espressione "cuneo salino" indica la risalita dell'acqua di mare sul fondo dell'alveo lungo il tratto focivo di un fiume; il fenomeno si presenta quando la velocità di deflusso scende al di sotto di un valore critico.

Nel caso del Po, le cause di carattere generale, legate all'utilizzo delle risorse idriche e a processi e combinazioni di fenomeni naturali e antropici che interessano l'intero bacino idrografico, riguardano essenzialmente:

- l'abbassamento dei terreni deltizi a causa sia della subsidenza naturale sia, soprattutto, della subsidenza di origine antropica, manifestatasi prevalentemente nel periodo compreso tra gli anni '50 e '70 del secolo scorso;
- la variazione del regime pluviometrico sul bacino, con precipitazioni intense più concentrate e precipitazioni annue in diminuzione, che determinano piene rapide e prolungati periodi di portate modeste;
- l'aumento delle derivazioni per diversi usi lungo l'asta del Po;

- le modifiche nel regime della produzione di energia idroelettrica dai bacini artificiali alpini, che spesso non coincide con l'esigenza di sostenere i periodi di magra del Po;
- il minore rilascio dai grandi laghi alpini per evitare carenze di disponibilità nei periodi siccitosi;
- l'abbassamento dell'alveo del Po per le diverse azioni antropiche che hanno influenzato in modo negativo l'equilibrio del trasporto solido;
- le opere di adeguamento delle foci del Po (es. ansa di Volta Vaccari, del Po di Pila e la nuova foce Po - Busa Storiona - Po di Tolle) che hanno migliorato il deflusso delle piene ma anche facilitato l'entrata dell'acqua di mare nelle fasi di alta marea.

Il fenomeno è quasi sempre presente, è più o meno pronunciato nei vari periodi dell'anno, e interessa, con diverse intensità, i rami del Delta; negli anni '50-'60 del secolo scorso si estendeva a non più di 2-3 km dalla foce, nel 1970-80 arrivava già a circa 10 km, negli anni recenti la sua estensione è stata rilevata a oltre 20 km dal mare.

A questo riguardo, sono molto chiari i dati sistematicamente accertati nel quinquennio 2003-2006: nel 2003 il periodo continuativo di portata inferiore a 330 m^3/s (16 giorni in luglio e 9 in agosto), fu sufficiente per mettere in crisi il sistema irriguo locale; nel 2005 il periodo critico iniziò il 15 giugno e terminò il 12 agosto con brevi interruzioni, per un totale di 35 giorni, nel 2006, già dal 9 giugno la magra di Po ha causato l'intrusione dell'acqua salata fino ad oltre 20 km dal mare per 60 giorni complessivi e la portata minima a Pontelagoscuro ha raggiunto 189 m^3/s (la minima storica precedente, aprile del 1949, è stata di 275 m^3/s).

Una portata a Pontelagoscuro variabile fra i 250 e i 330 m^3/s determina ora nell'area deltizia l'ingressione del cuneo salino fino all'incile del Po di Gnocca (20 km dal mare) e la conseguente impossibilità di irrigare i terreni in tutto il territorio di Porto Tolle e a sud di Ca' Vendramin, nell'Isola di Ariano.

Per portate ulteriormente inferiori, comprese fra i 189 e i 250 m^3/s, l'ingressione salina supera l'incile del Po di Gnocca fino a una distanza dalla foce di 25-30 km con l'impossibilità di irrigare in tutta l'Isola di Ariano fino alla SS Romea e nel territorio di Porto Viro a sud del Collettore Padano - Polesano.

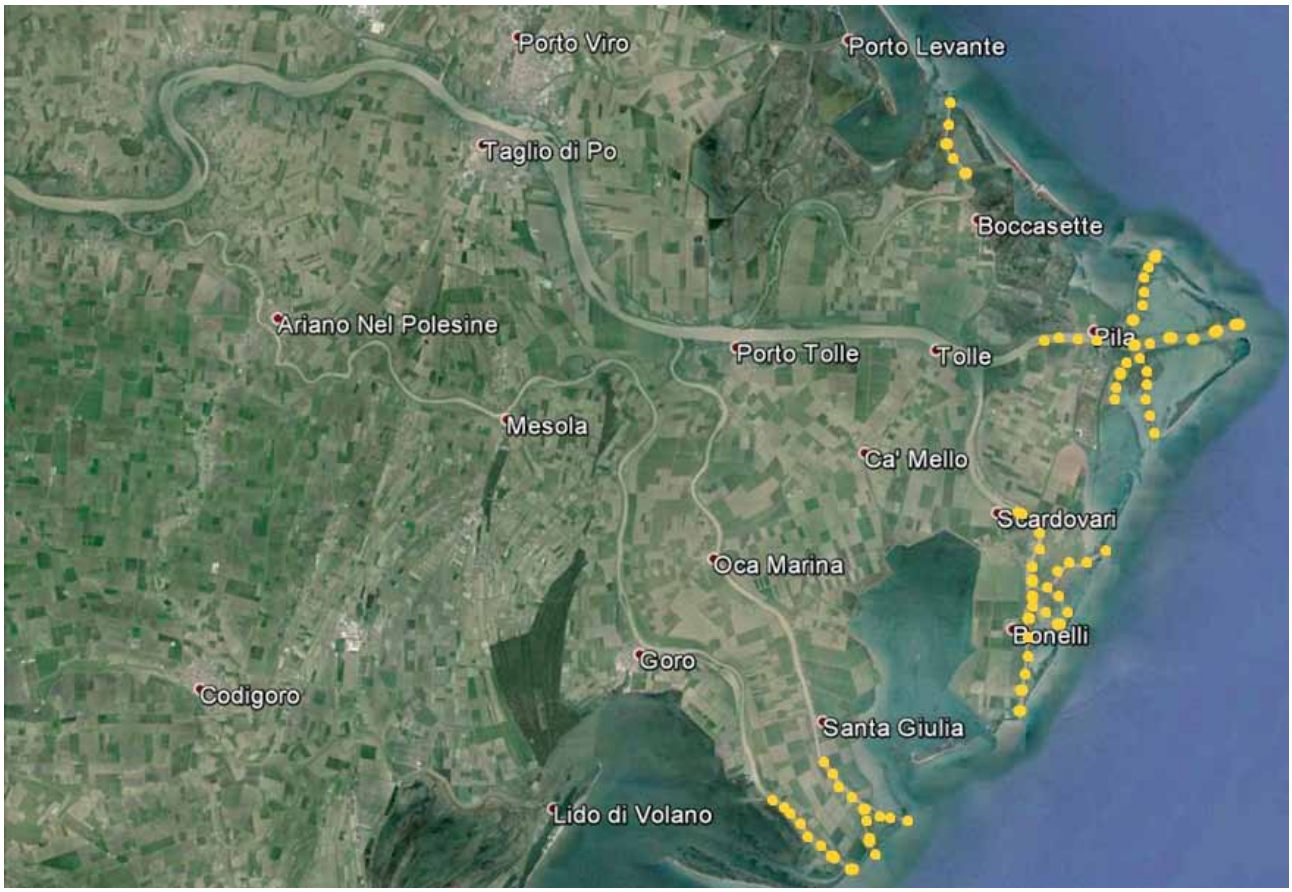


Figura 464 – Massima risalita del cuneo salino nei rami del Delta negli anni '50-'60 del secolo scorso: 2-3 km dalla foce

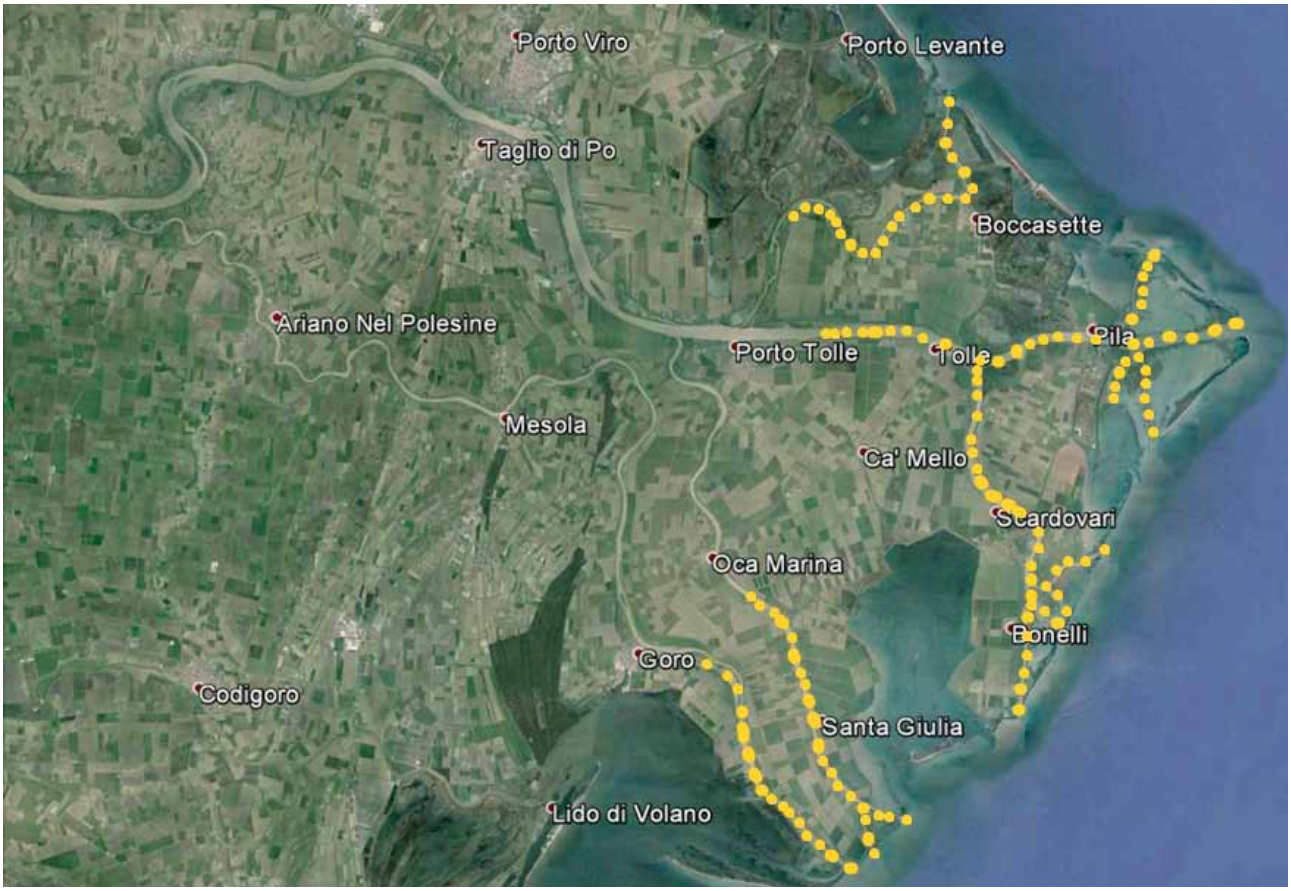


Figura 465 - Massima risalita del cuneo salino nei rami del Delta negli anni '70-'80 del secolo scorso: 10 km dalla foce

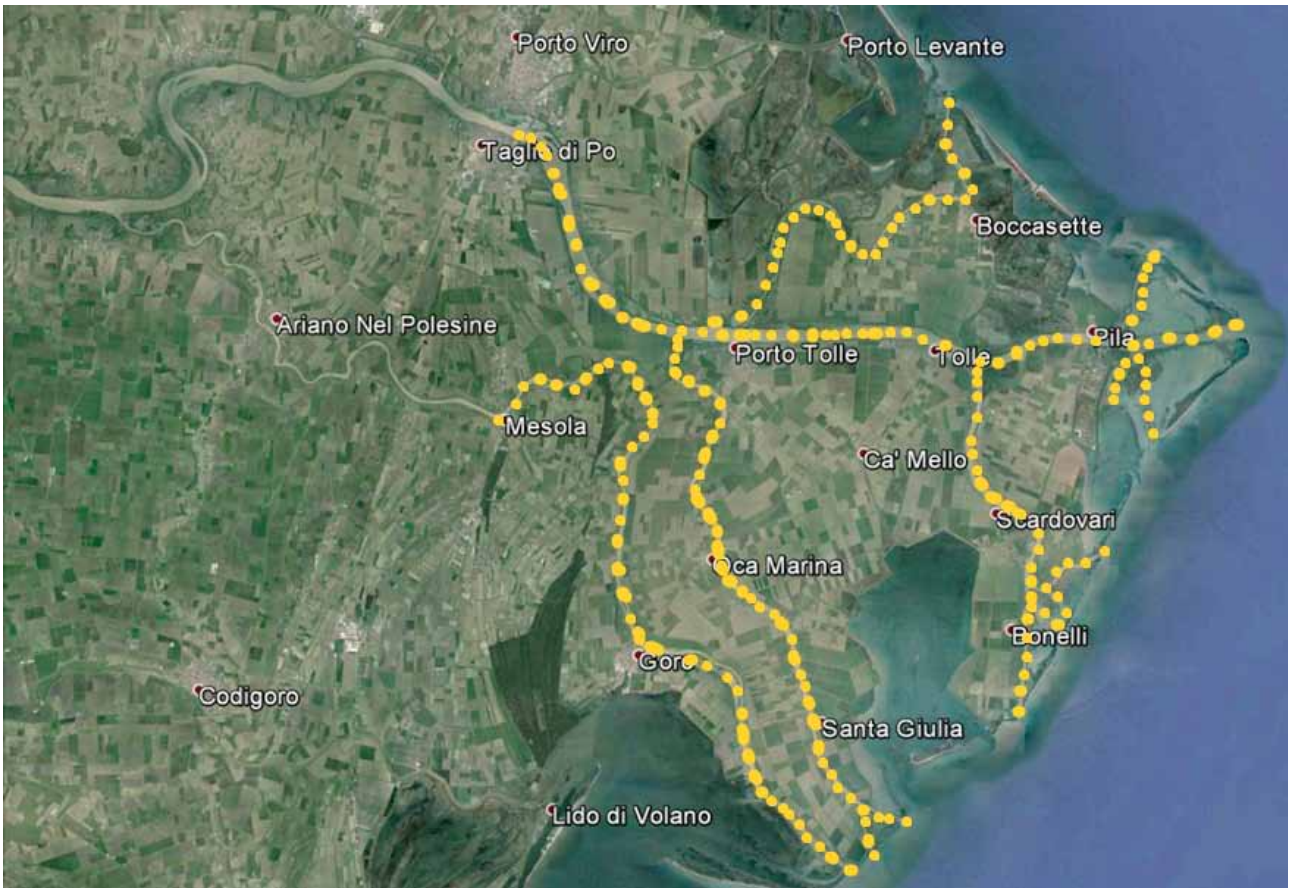


Figura 466 - Massima risalita del cuneo salino nei rami del Delta negli anni 2000: 20 km dalla foce

Gli effetti negativi del fenomeno nell'area del Delta del Po riguardano quindi in sintesi:

- la *modifica delle caratteristiche biologiche* dei tratti terminali con variazioni della catena trofica e conseguenti effetti sulla fauna ittica anche superiore sino ad interessare le attività di pesca;
- l'*interruzione delle derivazioni irrigue*, con gravi inconvenienti per l'attività agricola (quando la salinità dell'acqua derivata supera l'1,5-2,0% è dannoso irrigare: soltanto la risaia può superare di poco il 3%);
- l'*interruzione degli approvvigionamenti acquedottistici della parte più orientale del Polesine,* dove le centrali di potabilizzazione non sono in grado di desalinizzare l'acqua;
- la s*alinizzazione delle falde*; è un fenomeno in progressivo aumento e difficilmente reversibile.

Il fenomeno, che ha prodotto impatti rilevanti durante le gravi crisi idriche delle estati 2003 e 2006, è attentamente monitorato dalle ARPA regionali e dalla Provincia di Ferrara. I dati di monitoraggio disponibili e i relativi studi interpretativi saranno considerati nell'attività di analisi sotto descritta.

Di fronte a tale fenomeno per il territorio del Delta sono stati definiti i *rimedi da attuare, sia a scala di bacino idrografico* sia quella locale; i primi hanno come obiettivo di fondo di impedire, salvo casi statisticamente moto rari, che la portata di magra a Pontelagoscuro scenda al di sotto di del valore minimo compatibile con la risalita del cuneo salino. A scala di bacino idrografico del Po, le azioni riguardano:

- l'aumento dei rilasci d'acqua dagli invasi idroelettrici nei periodi di magra;
- l'aumento dei rilasci dai grandi laghi alpini nei periodi di magra;
- la riduzione dei prelievi idrici a valle dei grandi laghi e degli invasi artificiali;
- la verifica dei rilasci per mantenere nel Po il deflusso minimo vitale;
- il controllo degli attingimenti precari o non autorizzati.

I rimedi strutturali individuati a scala locale sono sostanzialmente i seguenti:

- la realizzazione di barriere antisale;
- la realizzazione di bacini di accumulo in aree golenali lungo il corso d'acqua;
- la realizzazione di bacini di accumulo in aree umide residuali in prossimità delle zone di utilizzo non destinate all'agricoltura;
- lo spostamento delle derivazioni più a monte, più al sicuro dal cuneo salino;
- l'utilizzo del Po di Goro quale vettore e bacino di acqua dolce.

Oltre agli interventi sopra ipotizzati, da realizzare nel medio termine, si possono attivare una serie di altre azioni, alcune delle quali richiedono tempi brevi, tra cui:

- la ricalibratura delle reti irrigue, per consentire l'utilizzo di maggiori portate d'acqua allo scopo di contrastare la salinizzazione della falda;
- il collegamento delle opere irrigue con la rete di bonifica, per assicurare nei momenti di emergenza una minima disponibilità di acqua dolce;
- il recupero delle acque di scarico delle idrovore, con la formazione di vasche di accumulo e il loro collegamento con la rete irrigua e promiscua (bonifica + irrigazione);
- l'utilizzo delle acque reflue, d'idonea qualità, provenienti dagli impianti di depurazione;
- il rinforzo delle difese costiere per contrastare, rallentandone il flusso, le filtrazioni da mare.

Le prime **barriere antisale**, furono realizzate sul Po di Gnocca nel Delta del Po e sul canale Taglio in comune di Caorle (VE) con finanziamenti del Ministero dell'Agricoltura, come progetti pilota per sperimentarne il funzionamento, l'efficacia e le conseguenze. Secondo le indicazioni fornite da un'apposita Commissione tecnico-scientifica e dagli organi statali e regionali competenti, sui fiumi oggetto d'intervento si doveva garantire:

- il regolare deflusso delle acque e l'equilibrio del fondo del fiume;

- la navigazione;
- il flusso migratorio delle specie ittiche;
- la totale mobilità della struttura, che avrebbe potuto occupare solo parzialmente la sezione d'alveo.

Per i motivi di cui sopra la soluzione prevede una struttura costituita da paratoie mobili modulari in modo tale da adattarsi alla configurazione morfologica dell'alveo. Ciascun modulo è formato da una parte fissa e una mobile. La struttura fissa è composta da una base (taglione) in acciaio inossidabile infisso nel fondo e ancorato a pali per evitare fenomeni di infiltrazioni d'acqua alla base. Sopra il taglione vi è una trave fissa di sostegno, sempre agganciata ai pali, dotata di una serie di alette (flaps), incernierate in favore di corrente. Attraverso tali flaps, l'incremento locale della velocità permette il passaggio di sedimenti e ne impedisce l'accumulo. La struttura mobile è incernierata a un palo e vincolata all'altro palo con due perni opportunamente dimensionati in modo tale da "sganciare" la porta a una ben determinata "spinta" sia verso monte che verso valle.

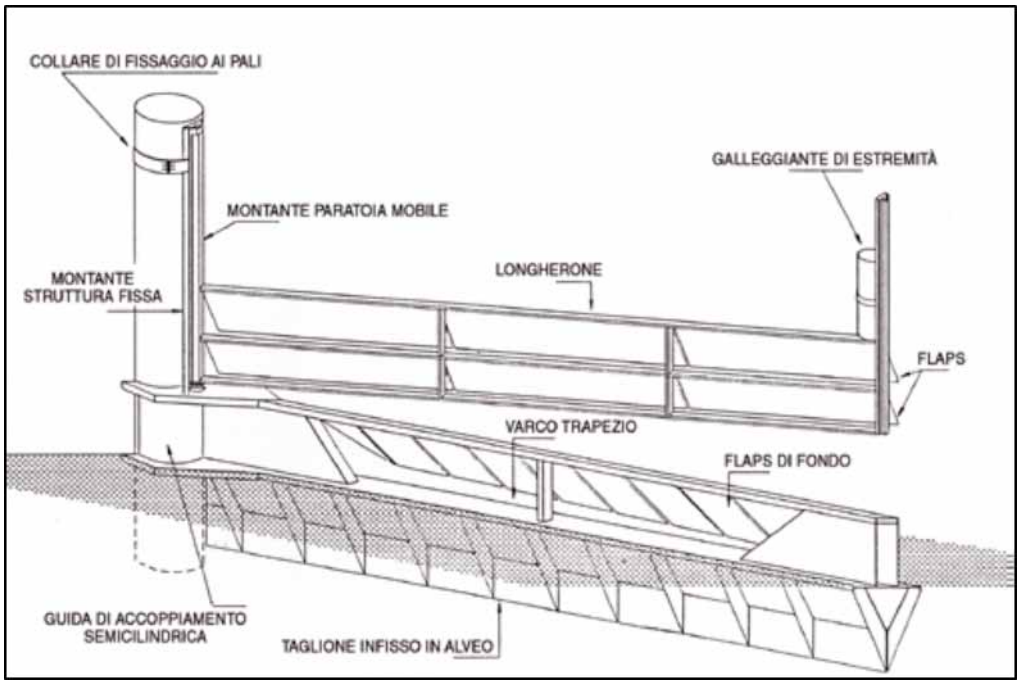


Figura 467 - Esempio di barriera antisale: disegno dei componenti di un modulo

La parte mobile è costituita da una griglia composta da una serie di travi orizzontali, a interasse di circa 85 cm, che sostengono i flaps e sono collegate tra di loro da montanti intermedi che rendono la porta sufficientemente rigida. Tutte le travi della griglia sono a profilo scatolare, realizzate con una struttura stagna, in modo da ridurre il peso apparente della porta immersa e ridurre quindi anche le sollecitazioni sulla struttura di sostegno. Per lo stesso motivo, sui montanti di estremità, sono stati previsti dei galleggianti. Sulla porta centrale è previsto un "franco" di oltre 2 m per la normale navigazione fluviale mentre sui rimanenti moduli il franco è di circa un metro. I flaps unidirezionali sono costituiti da pannelli in acciaio inossidabile, incernierati superiormente alle travi orizzontali della griglia. In tale modo viene consentito il normale deflusso dell'acqua dolce da monte verso valle mentre viene impedito il passaggio dell'acqua nella direzione opposta in quanto i flaps si chiudono man mano che il cuneo salino aumenta di spessore.

La realizzazione della barriera antisale sul Po di Gnocca iniziò nel luglio del 1985. I lavori furono completati nel 1987. La sua funzionalità fu verificata con misure in loco e con sonde fisse installate a monte ed a valle. Sulla base dell'esperienza positiva di questa struttura furono successivamente finanziati e realizzati altri due sbarramenti antisale alla foce del Po di Tolle e alla foce dell'Adige. La fase di gestione degli sbarramenti "mobili" antisale ha dimostrato che il contenimento del cuneo salino è efficace per portate fluviali anche inferiori a quelle prese a riferimento in fase di progetto (450 m^3/s a Pontelagoscuro), fino a circa a 330 m^3/s nella sezione di Pontelagoscuro.



Figura 468 - Barriera antisale sul Po della Gnocca

L'aspetto che incide in maniera negativa sulla funzionalità degli sbarramenti antisale è rappresentato dalle magre eccezionali, come quelle del 2003, 2005, 2006 e 2007, con valori di portata minima del Po al di sotto di 330 m3/s. Di fronte a tali eventi e in concomitanza di stagioni particolarmente siccitose, l'efficacia delle barriere si riduce di molto soprattutto in fase di alta marea, durante la quale l'azione di contrasto del flusso entrante dell'acqua di mare è insufficiente



Figura 469 - Barriera antisale sul Po di Tolle

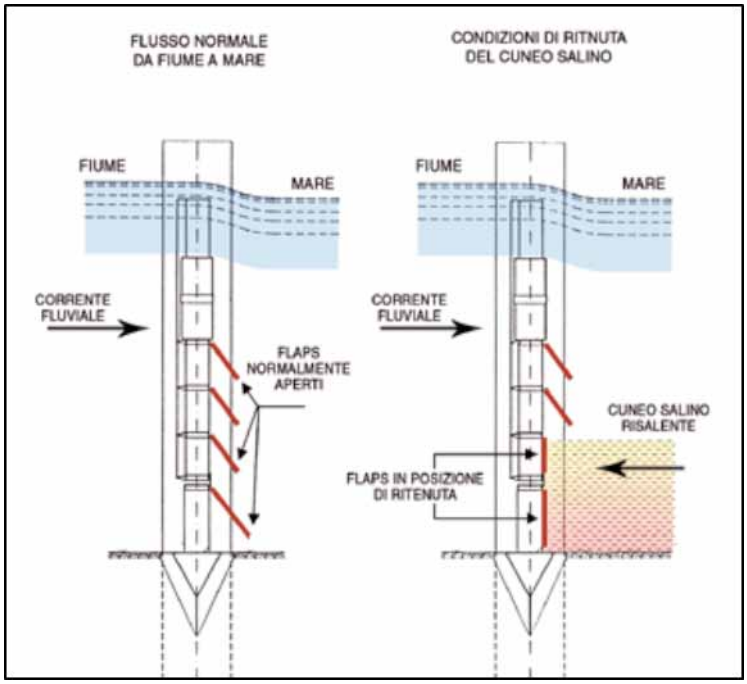


Figura 470 - Barriera antisale: schema di funzionamento

21.3 MODELLI DI SIMULAZIONE DEL FENOMENO DI RISALITA DEL CUNEO SALINO

Ai fini della valutazione degli effetti degli interventi sul fenomeno di risalita del cuneo salino si è utilizzato, come previsto nell'impostazione metodologica, il modello di simulazione a stati permanenti dell'ingressione del cuneo salino nel Delta del Po in dotazione ad ARPA Emilia-Romagna, calibrato dalla stessa nel corso di campagne di misura di salinità e di portata su tutti i rami del Delta.

La salinità è definita come la quantità di sali (espressa in grammi) disciolta in mille grammi di soluzione; la salinità di un'acqua dolce è compresa tra 0÷0,15‰, mentre un valore del 35‰ è tipico dell'acqua di mare. Valori intermedi sono caratteristici delle acque salmastre.

Un'ulteriore unità di misura in uso è rappresentata dal psu (Practical Salinity Units), corrispondente al rapporto tra la conduttività di un campione di acqua di mare e quella di una soluzione standard di KCl formata da 32,4356 grammi di sale disciolti in 1 kg di soluzione a 15 °C. I rapporti sono adimensionali e 35 psu equivalgono a 35 grammi di sale per litro di soluzione.

Normalmente, il limite di separazione tra acqua dolce e acqua salata è assunto pari ad 1 psu.

Il modello è fondato su approccio teorico per il calcolo dell'intrusione salina all'interno di estuari o di sistemi deltizi alluvionali che è completamente analitico, costituito cioè da equazioni in grado di descrivere il fenomeno sulla base di parametri quantitativi misurabili quali la geometria dei rami, la portata del corso d'acqua, le caratteristiche di marea.

La teoria (Savenije, 2005) è valida per condizioni stazionarie, cioè nei casi in cui i tempi necessari al sistema per raggiungere condizioni di equilibrio sono sufficientemente minori rispetto a quelli caratteristici della variazione delle condizioni al contorno. In termini molto sintetici, la teoria permette di esprimere la lunghezza Li dell'intrusione salina lungo un ramo del delta attraverso l'espressione:

$$L_i = a \ln\left(\frac{1}{\beta_i} + 1\right)$$

in cui la variabili a e βi sono funzioni delle variabili caratteristiche del sistema fisico in oggetto.

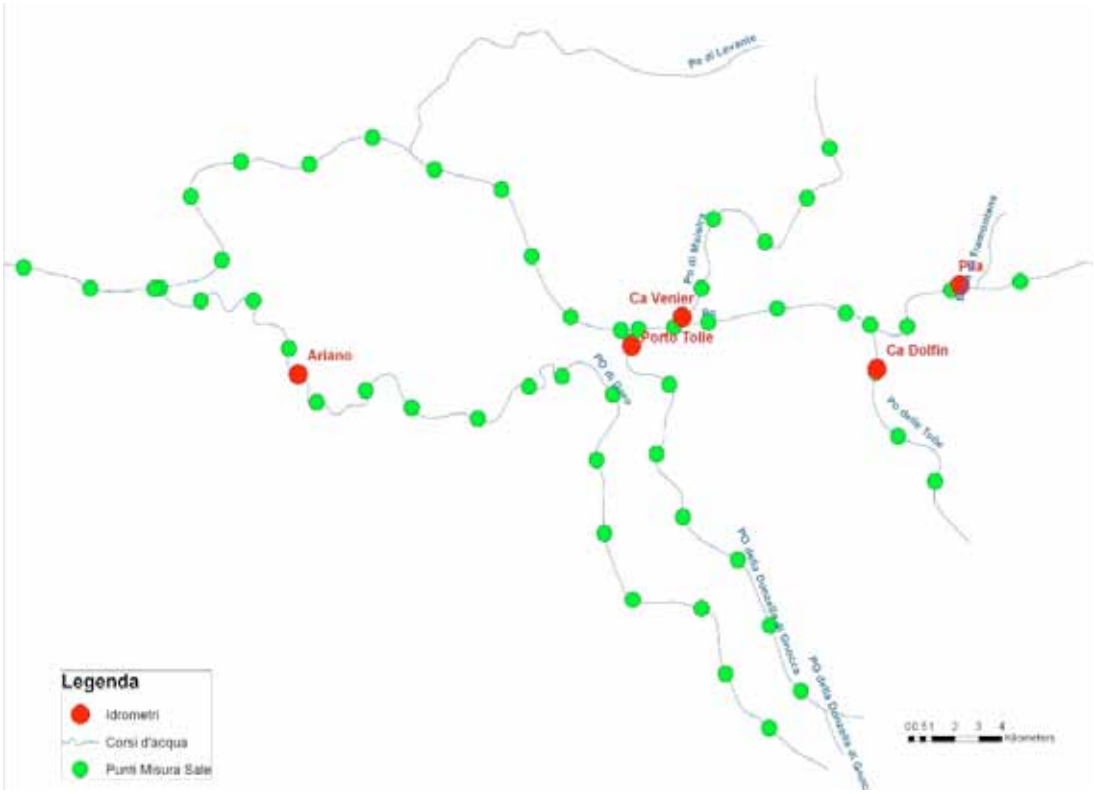
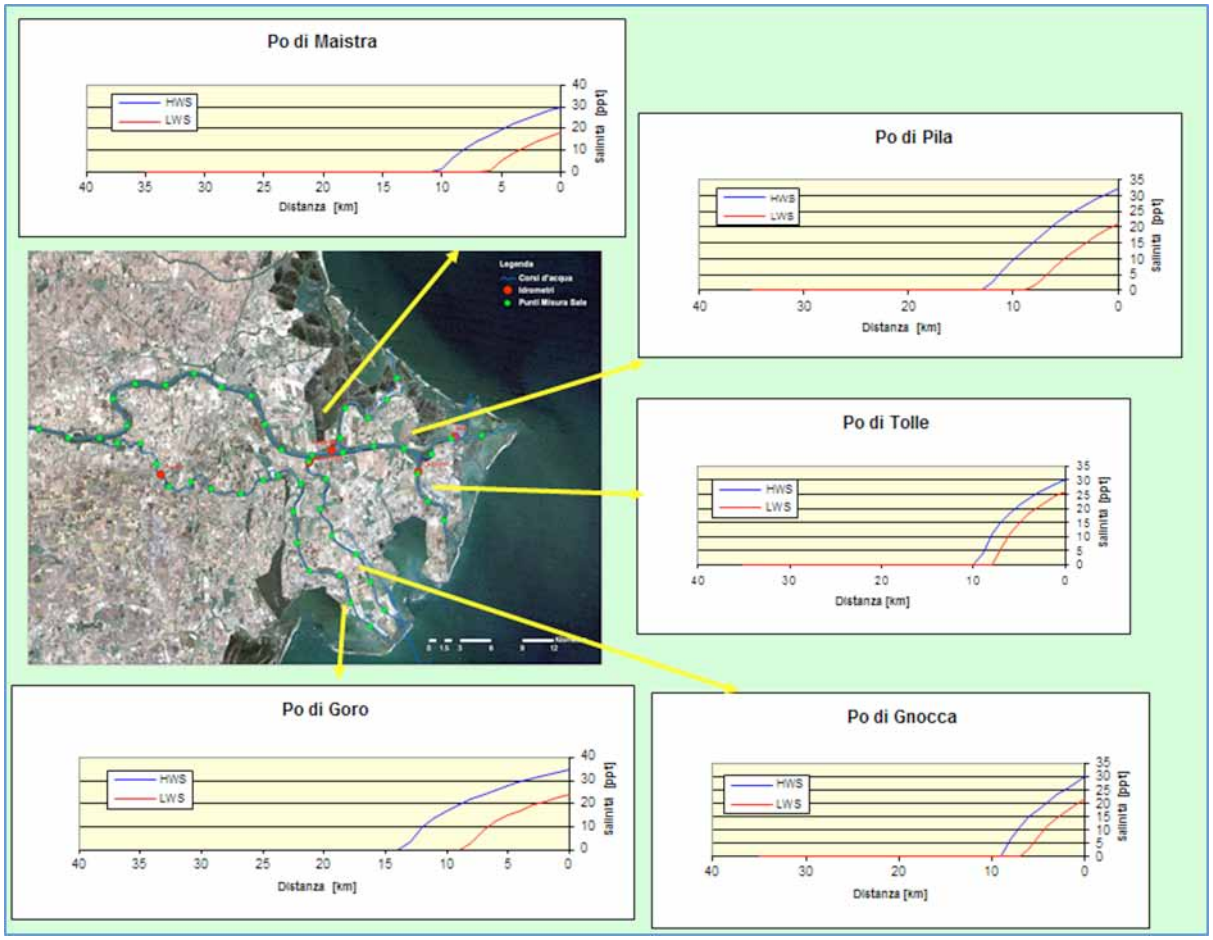


Figura 471 - ARPA Emilia-Romagna: punti di monitoraggio sui rami del Delta per la risalita del cuneo salino

L'applicazione al delta del Po ha richiesto una calibrazione del modello attraverso una serie di misure delle grandezze fisiche coinvolte, rappresentate principalmente, come si è detto, dalla geometria degli alvei, dalle portate defluenti e dalla salinità, il cui monitoraggio è stata svolto da ARPA Emilia-Romagna attraverso una serie di campagne di misura molto impegnative.

L'output del modello implementato permette di valutare per un'assegnata portata in ingresso al delta (misurata nella stazione di Pontelagoscuro) per ciascun ramo la distanza della foce (in km) della risalita del cuneo salino – rispettivamente in condizioni di alta marea (HWS) e bassa marea (LWS) – la ripartizione delle portate nei diversi rami del delta e la curva rappresentatrice dell'andamento della salinità nei diversi rami in funzione della distanza dalla foce.



Q Pontelagoscuro	500
S	0.5

	Q m³/s	HWS km	LWS km
Gnocca	84.2	8.8	6.3
Goro	47.9	13.2	8.2
Tolle	60.7	9.2	7.4
Maistra	20.3	10.1	6.1
Pila	286.9	12.6	8.4

Figura 472 - Esempio di out-put del modello di simulazione a stati permanenti dell'ingressione del cuneo salino nel delta del Po dell'ARPA Emilia-Romagna – Valori di risalita per portata in ingresso a Pontelagoscuro pari a 500 m³/s

Con l'utilizzo del modello di simulazione citato possono essere fatte valutazioni interessanti con riferimento agli scenari idrologici di magra che sono ipotizzabili in ingresso al sistema deltizio sulla base delle elaborazioni statistiche effettuate nella stazione di misura di Pontelagoscuro.

21.3.1 Portate di magra ordinaria

Se si fa riferimento alla portata di magra ordinaria attuale e alle previsioni di riduzione della stessa in relazione ai mutamenti climatici di cui si è fatto menzione in precedenza, le risposte del modello di simulazioni circa gli scenari attesi di ingressione salina sono i seguenti:

	ATTUALE			2030			2050			2100		
	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)
Gnocca	111,1	6,8	4,3	89,2	8,3	5,8	82,7	8,9	6,4	67,1	10,7	8,2
Goro	62,6	10,5	5,5	50,6	12,6	7,6	47	13,4	8,4	38,4	15,8	10,8
Tolle	81,6	7,7	5,9	64,6	8,9	7,1	59,5	9,3	7,5	47,8	10,6	8,8
Maistra	26,8	8,3	4,3	21,5	9,7	5,7	19,9	10,2	6,2	16,2	11,7	7,7
Pila	375,6	10,7	6,5	303,6	12,2	8	281,7	12,7	8,5	229,8	14,2	10,0
Totale	657,7			529,5			490,8			399,3		

Tabella 161 - Scenari di ingressione salina per portata di magra ordinaria

Poiché in questo caso si stanno considerando condizioni idrologiche non estreme, si può osservare come alle riduzioni previste delle portate corrispondano comunque aumenti significativi della massima intrusione del cuneo salino in tutti i rami.

21.3.2 Portata di minima magra

In questo caso le portate prese in considerazione sono le portate minime prevedibili con tempi di ritorno assegnati, valutate tramite l'applicazione alla serie storica della stazione di Pontelagoscuro di una legge di distribuzione statistica, come è stato illustrato in precedenza.

In questo caso gli scenari di ingressione salina che risultano dal modello sono rappresentati nel seguito.

	TEMPO DI RITORNO (anni) – SERIE 1923÷2013											
	10			20			50			100		
	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)
Gnocca	53,2	13,2	10,7	45,8	15,0	12,5	38,2	17,5	15,0	33,0	19,8	17,3
Goro	30,6	18,9	13,9	26,4	21,2	16,2	22,1	24,1	19,1	19,1	26,7	21,7
Tolle	37,5	12,2	10,4	32,1	13,3	11,5	26,6	14,6	12,8	22,9	15,8	14,0
Maistra	12,8	13,5	9,5	11,0	14,8	10,8	9,2	16,4	12,4	7,9	17,8	13,8
Pila	182,9	16,0	11,8	157,7	17,2	13,0	131,9	18,7	14,5	114,1	20,0	15,8
Totale	317			273			228			197		

	TEMPO DI RITORNO (anni) – SERIE 1990÷2013											
	10			20			50			100		
	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)	Q (m^3/s)	HWS (km)	LWS (km)
Gnocca	48,5	14,3	11,8	41,1	16,5	14,0	33,7	19,5	17,0	29,1	21,9	19,4
Goro	27,9	20,3	15,3	23,7	22,9	17,9	19,5	26,4	21,4	16,9	29,1	24,1
Tolle	34,0	12,9	11,1	28,6	14,1	12,3	23,3	15,6	13,8	20,1	16,8	15,0
Maistra	11,7	14,3	10,3	9,9	15,7	11,7	8,1	17,6	13,6	7,0	18,9	14,9
Pila	166,9	16,8	12,6	141,7	18,1	13,9	116,4	19,8	15,6	100,8	21,1	16,9
Totale	289			245			201			174		

Tabella 162 - Scenari di ingressione salina per portata di minima magra

Oltre alla serie completa disponibile, l'applicazione è stata applicata anche alla serie, di estensione molto più ridotta, relativa al periodo 1990-2013; quest'ultima ha il difetto di essere molto breve ma presenta per contro la caratteristica di contenere nell'arco degli ultimi 15 anni un numero particolarmente elevato di magre estive particolarmente gravose. In via del tutto empirica potrebbe pertanto essere considerata rappresentativa di un trend di amplificazione dei valori estremi del regime idrologico (portate massime e minime) che sembra essere uno degli effetti associabili al mutamento climatico.

I valori delle portate minime di magra che discendono dalla seconda serie risultano infatti inferiori, a parità di tempo di ritorno, a quelli della prima di quantità che vanno circa dal 9 al 12% con il crescere del tempo di ritorno stesso.

A fronte di tale differenza, la maggiore estensione verso monte della risalita del cuneo salino per le portate di magra minori, prendono a riferimento il ramo principale di Pila nella condizione HWS, è dell'ordine di grandezza del chilometro corrispondente a circa il 5%.

21.4 EFFETTI ATTESI A SEGUITO DELLA REALIZZAZIONE DELLE OPZIONI DI INTERVENTO

Nella prima parte della presente relazione vi è la descrizione delle caratteristiche principali delle opzioni di intervento che sono state sviluppate nello studio della sistemazione dell'alveo del fiume Po. Ad essa si rimanda per ogni ulteriore dettaglio utile a una migliore descrizione complessiva; nel seguito sono riportati solamente gli elementi essenziale alla valutazione degli aspetti che hanno attinenza con il fenomeno di risalita del cuneo salino.

21.4.1 Sistemazione a corrente libera

Il progetto prevede il completamento della sistemazione a corrente libera dell'alveo nel tratto tra Cremona e foce Mincio e la sistemazione del tratto a valle fino all'incile del Po di Goro con opere longitudinali e trasversali.

- **Per il primo tratto** sono previsti 17 interventi di carattere strutturale (costituiti da pennelli, difese radenti e adeguamenti di opere esistenti) in altrettanti nodi critici e 9 interventi non strutturali, che affidano il mantenimento dell'assetto dell'alveo ai periodici interventi di manutenzione. I criteri principali di tipo idraulico (diversi da quelli assunti nel progetto originale che ha dato luogo alle opere sinora realizzate) sono rappresentati:
- portata di progetto dell'alveo sistemato pari alla magra ordinaria (400 m^3/s) per l'intero tratto considerato, a cui corrisponde una durata variabile tra 353 gg/anno a Cremona e 359 gg/anno a Pontelagoscuro;
- quota di sommità delle opere in progetto pari a 1,50 m al di sopra del profilo di magra ordinaria (livello che corrisponde ad avere il limite di tracimazione per una portata di 800 m^3/s);
- assenza di un valore univoco della larghezza del canale di magra, ma ricerca di riprodurre tronco per tronco le condizioni di trasporto solido del tratto di monte.

Per il secondo tratto sono previste opere di regimazione di tipo sia longitudinale sia trasversale che intervengono su un totale di 34 curve. Le opere si rifanno alle tipologie già utilizzate negli interventi effettuati in situazioni analoghe da AIPO. La quota di sommità delle opere è impostata anche in questo caso in funzione della portata limite di tracimazione pari a 800 m^3/s. Tale conformazione garantisce la continuità delle dinamiche fluviali mantenendo i processi di trasporto solido nelle aree retrostanti con opere che sono sempre più basse delle aree golenali limitrofe.

Gli obiettivi di sistemazione dell'alveo di magra che si intende conseguire sono riassumibili nei seguenti due elementi:

- fondale minimo di 2,00 m per una durata media annua di 340 giorni/anno (obiettivo uguale a quello fissato da AIPO nel progetto a sistemazione libera del tratto di monte da Cremona a foce Mincio);
- fondale minimo di 2,80 m per una durata media annua di 300 giorni/anno.

A fronte di tale ipotesi di intervento, appare chiaro che le interazioni possibili con il fenomeno del

cuneo salino sono del tutto assenti. Elementi principali in tal senso sono rappresentati:

- dall'assenza di interventi diretti sulla geometria dell'alveo nel tratto deltizio e dunque di modifiche che vengano a influenzare uno dei parametri (tipo la sezione bagnata o la larghezza della superficie libera) da cui dipende l'idrodinamica del fenomeno;
- dal fatto che anche le opere di regimazione previste a monte sono dimensionate seguendo il criterio di non modificare in maniera apprezzabile i processi di trasporto solido che hanno sede lungo il percorso e quindi di non influire sul bilancio dello stesso a livello dei tratti a monte del sistema deltizio. Nel merito specifico del bilancio del trasporto solido, le verifiche dettagliate sono condotte nell'ambito delle attività di cui al Servizio 1.

21.4.2 Sistemazione con traverse di regolazione

Il progetto prevede la realizzazione di 5 traverse di regolazione nel tratto da Cremona all'incile del Po di Goro ubicate nei pressi di:

1. Motta Baluffi (CR) - Roccabianca (PR): progressiva km 401; livello massimo di regolazione 30,00 (m s.m.);
2. Casalmaggiore (CR) e Mezzano (PR): progressiva km 427; livello massimo di regolazione 24,20 (m s.m.);
3. Viadana (MN) e Suzzara (MN): progressiva km 461; livello massimo di regolazione 19,00 (m s.m.);
4. Serravalle Po (MN) e Pieve di Coriano (MN) - Quingentole (MN): progressiva km 503; livello massimo di regolazione 14,20 (m s.m.);
5. Occhiobello (RO) e Ferrara (FE): progressiva km 556; livello massimo di regolazione 7,50 (m s.m.);

Per tutte le traverse la portata massima di regolazione è posta pari a 1.500 m3/s.

- Ciascuna delle traverse è composta da:
- uno sbarramento mobile, o sfioratore;
- una conca di navigazione;
- un'opera specifica per il passaggio dell'ittiofauna.

Per la parte idroelettrica è stata ipotizzata la possibilità di inserire nelle paratie dell'impianto dei moduli contenenti il complesso di generazione, sollevabili in caso di portate superiori ai 1.500/2.000 m^3/s.

La sistemazione prevista consente di avere un alveo regolato in modo tale da consentire la navigabilità per tutto l'anno in qualsiasi condizioni di regime idrologico di magra. Anche in questo caso le ipotesi progettuali hanno ricercato il mantenimento sostanziale del regime idrodinamico dell'alveo attuale, non modificando il bilancio del trasporto solido lungo il tratto sistemato e regolando i profili idrici in condizioni di portate basse (inferiori a 1.500 m3/s) in modo tale da occupare solamente la porzione dell'alveo di magra attuale e da non coinvolgere i piani golenali.

Le interazioni attendibili con il fenomeno della risalita del cuneo salino anche in questo caso appaiono del tutto trascurabili per ragioni analoghe a quelle richiamate per la precedente opzione di intervento:

- assenza di interventi diretti sulla geometria dell'alveo nel tratto deltizio e dunque di modifiche che vengano a influenzare i parametri (tipo la sezione bagnata o la larghezza della superficie libera) da cui dipende l'idrodinamica del fenomeno;
- le traverse di regolazione previste sono dimensionate seguendo il criterio di non modificare in maniera apprezzabile i processi di trasporto solido che hanno sede lungo il percorso e quindi di non influire sul bilancio dello stesso a livello dei tratti a monte del sistema deltizio. Le verifiche in merito sono condotte nell'ambito del Servizio 1.

Per l'opzione di intervento in argomento, merita infine segnalare un effetto positivo sul fenomeno rappresentato dal possibile sostegno a situazioni idrologiche di magra estrema attraverso una

gestione programmata delle traverse con manovre di apertura coordinate tra monte e valle che permettono di far defluire il volume idrico immagazzinato da ciascuna di esse.

Nel dettaglio idraulico il tema è trattato nel precedente capitolo 5 attraverso la simulazione idraulica dell'effetto che sarebbe stato possibile ottenere nel caso del periodo di magra estrema dell'estate 2003.

Il volume regolato complessivamente dalle 5 traverse è pari a circa 240 milioni di m^3 (valori attorno ai 40 milioni per le prime tre traverse partendo da monte e di circa 60 milioni per le ultime due). Va tenuto presente che tali volumi rappresentano il surplus rispetto a quello che costituisce la condizione di invaso dell'alveo necessaria per il deflusso della portata presente; quindi si tratta di volume idrico complessivamente mobilitabile per il sostegno a valle della portata magra.

Nel caso dell'evento del 2003, in cui si è avuto un periodo continuativo di 25 giorni con portate inferiori 330 m^3/s (con portata media su tale periodo pari a circa 300 m3/s), l'ottimizzazione della gestione del rilascio dei volumi idrici invasati a monte delle 5 traverse ha permesso di ottenere per lo stesso periodo una portata continua defluente pari a 450 m3/s. Ciò ha permesso di dimostrare come la gestione dei volumi idrici disponibili nel corso dei periodi di crisi idrica costituisca un elemento di significativa importanza nel quadro della gestione della risorsa in funzione delle diversi livelli di domanda e di priorità.

21.5 INTERVENTI DI CONTROLLO E MITIGAZIONE DEL FENOMENO

Le analisi condotte hanno permesso di constatare che le opzioni di intervento relative alla sistemazione dell'alveo del Po non hanno influenza apprezzabile sul fenomeno della risalita del cuneo salino nel delta in quanto le opere di sistemazione previste a monte non inducono modifiche sulle caratteristiche morfologiche e idrauliche dei diversi rami dalle quali dipende l'idrodinamica del fenomeno.

Per contro si è avuto modo di constatare la rapida evoluzione in senso negativo che si è manifestata negli ultimi decenni, imputabile a cause prevalentemente riconducibili alla elevata pressione antropica sulla risorsa idrica dell'asta e, più in generale sul bacino idrografico. Evoluzione che comporta effetti di rilevanti su vaste aree deltizie in cui entrano in sofferenza i sistemi di approvvigionamento potabile e irrigui.

In questo quadro le linee di intervento non possono che essere molto generali e complesse, tali da dover investire in misura consistente le modalità di gestione della risorsa idrica alla scala dell'intero bacino idrografico. In questa sede ci si limita a evidenziare, alla scala più locale dell'asta del Po su cui insistono le opere di sistemazione studiate, i principali interventi di cui è necessaria la realizzazione, strettamente correlati al progetto di sistemazione dell'asta fluviale a monte del delta, di carattere sia non strutturale che strutturale possono essere elencati come segue:

- gestione complessiva del sistema idrico – asta del fiume Po e Delta – in capo a un unico soggetto gestore, di carattere pubblico, che operi secondo un programma di gestione multi-obiettivo della risorsa (idrica e ambientale delle aree rivierasche) in coerenza e in attuazione dei contenuti degli strumenti di pianificazione vigenti, approvati secondo le direttive di settore dell'UE (Direttiva Acque 2000/60 e Direttiva Alluvioni 2007/601);
- gestione delle situazioni di magra sulla base delle risorse idriche dell'intero bacino idrografico (invasi artificiali, grandi laghi alpini, concessioni di derivazione) secondo finalità di minimizzazione dei danni economici a livello collettivo;
- definizione, con specifico riferimento al fenomeno del cuneo salino, di un valore del deflusso minimo vitale del corso d'acqua su ordini di grandezza di 450-500 m3/s, tali da consentire nelle condizioni idrologiche ordinarie di contenere sensibilmente la risalita a monte;
- implementazione e gestione unitaria di un sistema di monitoraggio dedicato per le finalità di conduzione del sistema idrico nel suo complesso (monitoraggio idrologico, trasporto solido, qualità dell'acqua, modificazioni morfologiche);

realizzazione di una barriera antisale nel tratto terminale del Po di Pila, in corrispondenza approssimativamente dell'abitato di Pila.

22 ANALISI SULLA QUALITÀ DELLE ACQUE E ALTRI PARAMETRI DELLA DIRETTIVA 2000/60 2007/60 SU TUTTO IL TRATTO. MONITORAGGIO E ANALISI PARAMETRI DI QUALITÀ DELL'ACQUA. INFLUENZA DELLE PROPOSTE PROGETTUALI DI SISTEMAZIONE DEL PO SULLA QUALITÀ DELLE ACQUE

Le indagini e analisi eseguite sono state finalizzate a verificare, per entrambe le soluzioni in progetto, i potenziali impatti delle opere sul sistema fluviale, in relazione allo stato ambientale attuale e agli obiettivi del Piano di Gestione del Distretto idrografico del fiume Po e in generale della normativa vigente.

Gli interventi di sistemazione del fiume Po proposti (corrente libera, regimazione) non sono tali da incidere direttamente sulla qualità delle acque del fiume; tuttavia le modificazioni indotte ai parametri idraulici nei tratti di interesse, prevalentemente per quanto riguarda la soluzione di regimazione, possono indurre effetti indiretti sia sulle componenti fisico-chimiche che su quelle biologiche.

In particolare, la presenza di altezze d'acqua significativamente maggiori delle attuali (e conseguente riduzione delle velocità della corrente) potrebbe potenzialmente determinare i seguenti effetti principali sulla qualità delle acque:

- un aumento dei fenomeni di deposizione di nutrienti e altri contaminanti, che andrebbero conseguentemente ad accumularsi nei sedimenti, con concentrazioni superiori alle attuali;
- I fenomeni di sedimentazione della matrice solida e del detrito organico potrebbero risultare anch'essi incrementati, modificando le condizioni del substrato di fondo e potenzialmente generando modificazioni morfologiche che potrebbero condurre a una diversa disponibilità di habitat;
- le condizioni idrodinamiche di progetto potrebbero provocare, in particolare nei periodi di maggiore criticità quali quelli estivi, fenomeni simili a quelli riscontrabili in ambienti lacustri, con riduzione del grado di ossigenazione delle acque, possibile tendenza allo sviluppo di stati di eutrofia e potenziale avvio di reazioni anossiche a livello dello strato di fondo, in grado di provocare o incrementare il rilascio di sostanze inquinanti dai sedimenti alla colonna d'acqua;
- la variazione dei parametri idraulico-strutturali (in primis velocità e altezze d'acqua) potrebbe modificare la tipologia/distribuzione di habitat fluviali, con effetti sui livelli trofici superiori (favorendo le specie ittiche che gradiscono le acque lente e limitando le specie maggiormente reofile) e macrobentonici (per modificazione dei substrati di fondo, effetto che può incidere anche sui pesci che non gradiscono substrati limosi per la deposizione delle uova).

L'analisi di questi fenomeni è di particolare complessità perché richiede la rappresentazione di un sistema ecologico regolato da mutue interazioni tra numerosi parametri (oltre a quelli idrodinamici – livelli, portate, velocità – anche le forzanti idrologiche, quali temperatura di aria e acqua, vento, radiazione solare, umidità, ecc., e i caratteri chimico fisici, con presenza o meno di inquinanti/nutrienti) che incidono sul ciclo di vita dei livelli trofici inferiori (vegetazione bentica e algale, produttori e consumatori primari) e superiori (macrobenthos, ittiofauna, avifauna).

Questi stessi organismi incidono sul ciclo del fosforo e dell'azoto, determinando l'equilibrio del bilancio dei nutrienti o il progressivo decadimento della qualità verso condizioni limite di eutrofizzazione. L´eutrofizzazione, meglio descritta nel seguito, è un processo degenerativo delle acque indotto da eccessivi apporti di nutrienti, ovvero sostanze a effetto fertilizzante. L'accumulo di elementi come l'azoto e il fosforo causa la proliferazione di alghe microscopiche che, a loro volta, non essendo smaltite dai consumatori primari, determinano una maggiore attività batterica di decomposizione;

aumenta così il consumo globale di ossigeno, e la riduzione di quest'ultimo può giungere a provocare la morte dei pesci.

Per una corretta analisi degli effetti che le "sollecitazioni" indotte dalle opere in progetto (variazione dei parametri idraulico-strutturali, cioè aree bagnate, altezze d'acqua, velocità) possono provocare sulle componenti di qualità chimico-fisica e biologico-ecologica è quindi necessario raggiungere un livello di dettaglio, ricorrendo anche a strumenti modellistici avanzati, assai maggiore di quello che caratterizza una progettazione a livello preliminare.

Per poter comprendere adeguatamente il funzionamento atteso del sistema e nel contempo riuscire ad estendere l'analisi sull'intero tratto di studio del fiume Po (da Isola Serafini all'incile del Po di Goro) si è proceduto quindi secondo la seguente impostazione metodologica:

- caratterizzazione dell'assetto ecologico attuale, con analisi del quadro conoscitivo pregresso e esecuzione di nuove e specifiche attività di indagine in sito;
- allestimento di un modello numerico idrodinamico-ecologico di elevato dettaglio su un sito pilota, rappresentativo dei potenziali effetti indotti dalla realizzazione di un sostegno della tipologia prevista per la soluzione di regimazione;
- analisi dei risultati ottenuti e individuazione degli indicatori che possano esprimere la presenza e entità dei possibili impatti;
- analisi parametrica a scala dell'intero tratto di studio in funzione di questi indicatori, estrapolando le informazioni ottenute dall'analisi di dettaglio sul sito pilota;
- definizione di un indice di impatto per tratti omogenei, rappresentativo della maggiore o minore incidenza delle opere in progetto sulla qualità delle acque.

22.1 CARATTERIZZAZIONE DELLO STATO ECOLOGICO ATTUALE DEL TRATTO IN ESAME

22.1.1 Impostazione metodologica

Per la caratterizzazione dell'attuale stato qualitativo delle acque si è proceduto innanzitutto con l'esame delle informazioni di sintesi fornite dal Piano di Gestione del distretto idrografico del fiume Po (PdG), dai Piani di Tutela delle Acque (PTA) regionali e da altra documentazione ufficiale pubblicata.

Una sintesi delle più aggiornate classificazioni "ufficiali" di qualità ambientale dei tratti è fornita nel recente aggiornamento al 2015 del Piano di gestione del Po (PdG Po-2015), adottato con deliberazione n. 7/2015 dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del fiume Po in data 17 dicembre 2015. Nel capitolo 2.7 si fornisce un sunto degli elementi di maggiore interesse per il tratto di studio.

Con l'obiettivo di definire i valori "di partenza" dei più rilevanti parametri macrodescrittori del livello di qualità ambientale si è quindi proceduto a un affinamento dell'analisi con la raccolta e la valutazione dei dati analitici disponibili relativi alle attività di monitoraggio istituzionale condotte dalle Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA), finalizzate alla classificazione dei corpi idrici significativi e alla base delle risultanze del PdG Po 2015.

Successivamente sono state effettuate delle nuove indagini in sito, per caratterizzare nei tratti specifici oggetto di intervento gli aspetti qualitativi di acque e sedimenti con riferimento ai parametri di maggiore interesse per le finalità dello studio, così da disporre di dati effettivamente rappresentativi dello stato attuale e delle condizioni locali dei siti in esame.

Nei capitoli che seguono si riporta una sintesi ragionata dei dati disponibili e dei risultati delle nuove indagini effettuate, fornendo una caratterizzazione complessiva dello stato ecologico attuale.

22.1.2 Analisi del quadro conoscitivo disponibile pregresso

Nella Tabella 163 si propone una sintesi per tratti di corso d'acqua dei livelli qualitativi indicati nel PdG Po 2015, presentati più estesamente (per unità territoriali) nel capitolo 2.7, al quale si rimanda per i dettagli, i riferimenti normativi e le definizioni dei diversi elementi.

I giudizi esposti in merito alla classificazione di qualità si basano su dati rilevati dalle ARPA nel triennio 2010-2012, relativamente a tutte le componenti indagate (stato ecologico espresso da indicatori fisico-chimici e biologici – prevalentemente il macrobenthos – e stato chimico relativo alla presenza di sostanze inquinanti specifiche).

REGIONE	LOCALITÀ	TRATTO	STATO ECOLOGICO	STATO CHIMICO
Lombardia	Cremona	Dalla confluenza con l'Adda a quella con il Taro	SUFFICIENTE	BUONO
Emilia Romagna	1000300 - Ragazzola - Roccabianca	Da confine regionale a confluenza Taro	SUFFICIENTE	BUONO
	1000500 - Loc. Boretto	Da confluenza Taro a confluenza Oglio	SUFFICIENTE	NON BUONO
Lombardia	Viadana		SUFFICIENTE	BUONO
	Borgoforte	Da Oglio a Mincio	SUFFICIENTE	BUONO
	Sermide	Da Mincio al confine regionale	SUFFICIENTE	BUONO
Emilia Romagna	1000600 -Stellata - Bondeno	Da confluenza Mincio all'incile del Po di Goro	SCARSO	BUONO
	10000700 - Po - Pontelagoscuro		SCARSO	BUONO
	1000900- Serravalle - Berra		SCARSO	BUONO
Veneto	stazione 193 (Po a Castelmassa) e stazione 229 (Po a Villanova Marchesana)	Da confluenza con il f. Mincio all'incile del Po di Goro	SCARSO	BUONO

Tabella 163 - Indicatori di qualità ambientale per le stazioni di monitoraggio sul fiume Po

In termini sintetici, con riferimento al monitoraggio del triennio 2010–2012, lo stato ecologico del Po risulta sufficiente da Cremona a Boretto e scarso nel tratto successivo, con fattore limitante costituito dai macroinvertebrati, a cui si aggiunge l'indice LIMeco nel primo tratto.

Lo stato chimico risulta in generale buono, con l'unica eccezione della stazione di Boretto (stato chimico "non buono" con elemento critico i difenileteri bromati).

La condizione limitante sopra richiamata riferita al comparto biologico, associata al giudizio "scadente" che caratterizza lo stato morfologico sull'intero tratto, pone le problematiche di struttura e funzionalità degli habitat fluviali come elemento focale condizionante le azioni per la riqualificazione ambientale dell'asta, mirate al raggiungimento degli obiettivi di qualità pianificati dal Piano di Gestione del Distretto Idrografico al 2021. Ne consegue che anche gli interventi in progetto devono essere compatibili con tale pianificazione ed eventualmente contribuire al miglioramento di alcuni dei fattori critici influenti sullo stato qualitativo, senza effetti controproducenti su altri comparti dell'ambiente fluviale.

Gli obiettivi ecologico e chimico stabiliti dal PdG Po 2015 sono indicati in maggior dettaglio nel capitolo 2.7, dal quale si riporta la Figura 473 relativa allo stato ecologico. Per quest'ultimo, la classificazione "buono" è prevista per il 2021 nel tratto da confluenza Oglio a confluenza Mincio, mentre per il 2027 nei rimanenti tratti. Per l'obiettivo chimico la classificazione "buono" è prevista per il 2021 per il tratto da confluenza Mincio a incile Po di Goro, mentre resta fissato al 2015 (obiettivo già raggiunto) nei rimanenti tratti.



Figura 473 - Obiettivo ecologico previsto nel PdG Po 2015

Per le finalità del presente studio risultano di maggiore interesse gli elementi legati allo stato ecologico, in quanto verosimilmente l'effetto delle opere in progetto sulla presenza o meno nelle acque degli inquinanti specifici che definiscono lo stato chimico è trascurabile.

In particolare è stata approfondita l'analisi sui parametri chimico-fisici macrodescrittori della qualità ambientale, scorporando questo elemento di qualità delle acque vera e propria dagli indicatori di tipo biologico basati sulla caratterizzazione delle biocenosi.

I dati analitici di monitoraggio sono risultati disponibili presso le sezioni sul fiume Po di Tabella 164.

REGIONE	LOCALITÀ	TRATTO ASSOCIATO
Lombardia	Cremona	Da confluenza Adda a confluenza Taro
Emilia Romagna	1000300 - Ragazzola - Roccabianca	Da confine regionale a confluenza Taro
	1000500 - Loc. Boretto	Da confluenza Taro a confluenza Oglio
Lombardia	Viadana	
	Borgoforte	Da Oglio a Mincio
	Sermide	Dal fiume Mincio al confine regionale
Emilia Romagna	1000600 -Stellata - Bondeno	Da confluenza Mincio a incile del Po di Goro
	10000700 - Po - Pontelagoscuro	
	1000900- Serravalle - Berra	
Veneto	stazione 193 (Po a Castelmassa) e stazione 229 (Po a Villanova Marchesana)	Da confluenza Mincio a incile del Po di Goro

Tabella 164 - Anagrafica stazioni di monitoraggio sul fiume Po

In Figura 477 (capitolo 8.1.6) si propone una sintesi dell'evoluzione temporale recente del livello di qualità fisico-chimica delle acque espresso dall'indice LIMeco (previsto dal vigente D. Lgs. 152/06 così come definito nel D.M. 260/2010 e s.m.i.), che considera come parametri macrodescrittori della qualità ambientale l'ossigeno disciolto e la concentrazione di nutrienti (composti del fosforo e dell'azoto).

I dati rappresentati sono riferibili alla media dell'ultimo triennio completo di monitoraggio (2010-2012, linea sottile nel grafico), ai valori relativi all'anno più recente di disponibilità di dati (2013, linea spessa di sfondo alla precedente) e ai risultati dei nuovi campionamenti eseguiti dallo scrivente RTI per il presente studio (2015, in due campagne, come descritto nel seguito).

Rispetto al livello qualitativo complessivo espresso dallo stato ecologico, i parametri di qualità chimico-fisica delle acque presentano valori migliori di una classe, con generale trend temporale positivo nel periodo più recente (valutato su indici differenti in funzione del periodo considerato: LIM

definito dall'abrogato D. Lgs. 152/99, che considerava anche parametri quali il carico batterico, il COD, il BOD, e LIMeco definito nel D. Lgs.152/06). In Figura 474 si riportano a titolo di esempio le serie temporali calcolate a partire dai dati ARPA per alcune stazioni di misura: Cremona, Boretto/Viadana, Borgoforte.

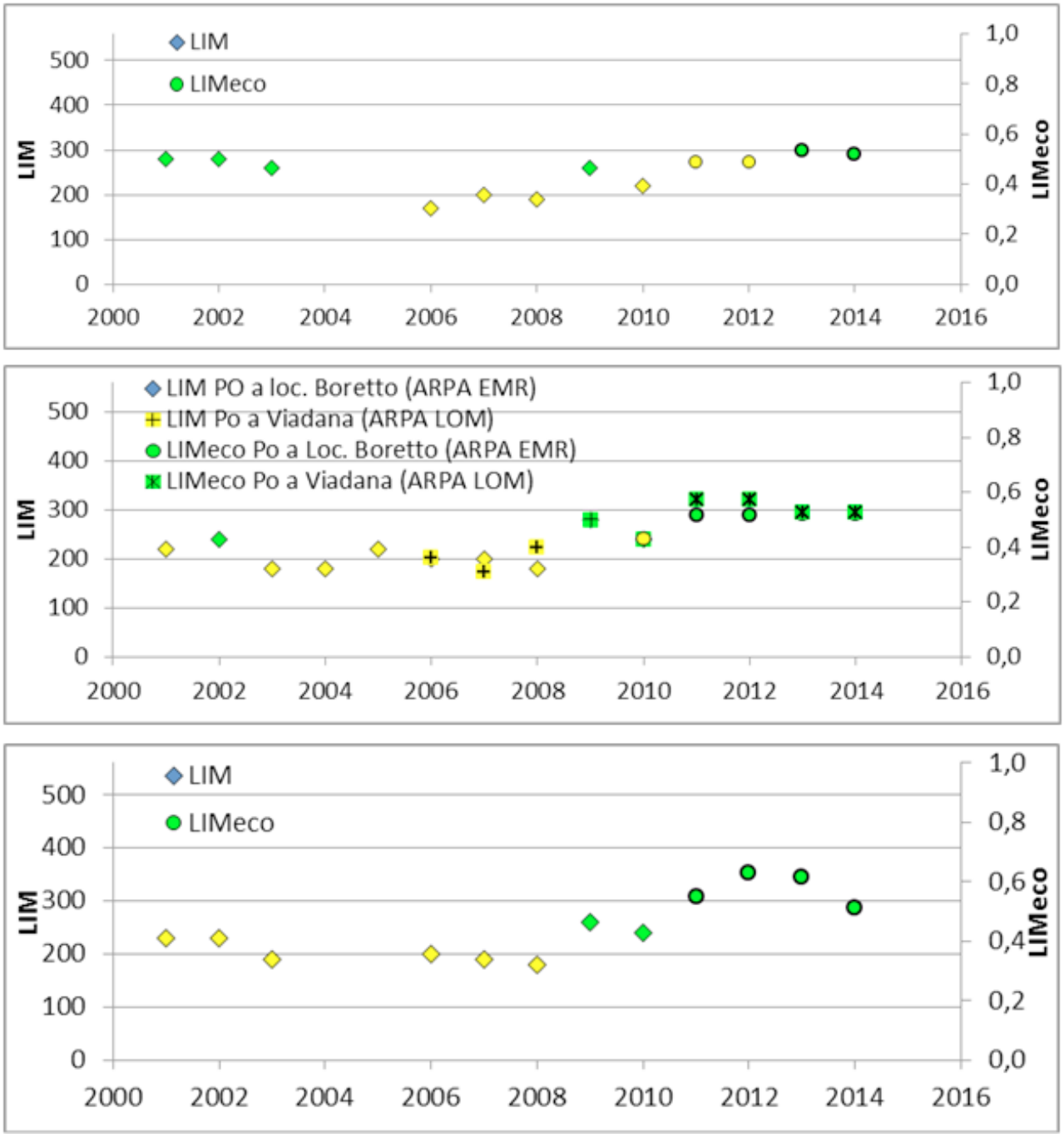


Figura 474 - Andamento temporale delle classi di qualità delle acque. Dall'alto, stazioni di Cremona, Boretto/ Viadana, Borgoforte.

Per questo aspetto il fattore di criticità per il raggiungimento degli obiettivi ambientali, o comunque limitante il livello qualitativo, è costituito dai nutrienti, con concentrazioni di fosforo e nitrati in particolare nel tratto terminale dell'asta ancora decisamente superiori (mediamente del 30-50%) al limite di stato buono dell'indice LIMeco.

22.1.3 Aggiornamento del quadro di riferimento mediante attività di rilievo in sito

Per disporre di ulteriori dati di caratterizzazione effettivamente riferibili allo stato attuale dei siti, sono state condotte dal RTI due campagne di indagine (marzo e agosto 2015) che hanno riguardato i seguenti elementi:

- misure di portata;
- caratterizzazione chimico-fisica delle acque superficiali su colonna d'acqua;
- caratterizzazione granulometrica dei sedimenti;
- caratterizzazione chimica dei sedimenti.

I siti di campionamento sono riportati in Tabella 165 e individuati su foto aerea in Figura 475. Essi sono stati individuati nei tratti in cui si prevede l'inserimento delle traverse nella soluzione di regimazione. In prossimità di confluenza Oglio è stato indagato il sito in cui le opere erano previste in sede di studio di fattibilità; lo sbarramento è stato poi ubicato più a monte nell'ambito dell'iter di ottimizzazione progettuale.Tale sito è stato individuato come sito pilota per il presente studio (anche in considerazione di un obiettivo ecologico "buono" anticipato nel PdG Po 2015 rispetto agli altri tratti), oggetto di indagini più approfondite e di analisi con modello numerico.

Le indagini sono state anche condotte a monte del tratto di indagine, nell'invaso prodotto dalla traversa di Isola Serafini che può costituire una sorta di "modello" in scala reale delle condizioni attese di progetto per questa soluzione.

Il numero dei campionamenti e delle indagini eseguite sono stati calibrati in funzione delle caratteristiche dei tratti, con maggiore dettaglio nell'area del sito pilota.

CODICE SITO	UBICAZIONE
IS1; IS2	A monte di Isola Serafini
1_1; 1_2	In corrispondenza di Roccabianca (PR)
2_1; 2_2	In corrispondenza di Viadana (MN)
3_1; 3_2; 3_3; 3_4; 3_5	A monte di Borgoforte (MN)
4_1; 4_2; 4_3	A monte di Sustinente (MN)
5_1; 5_2	A monte di Stienta (RO)

Tabella 165 - Siti di campionamento.

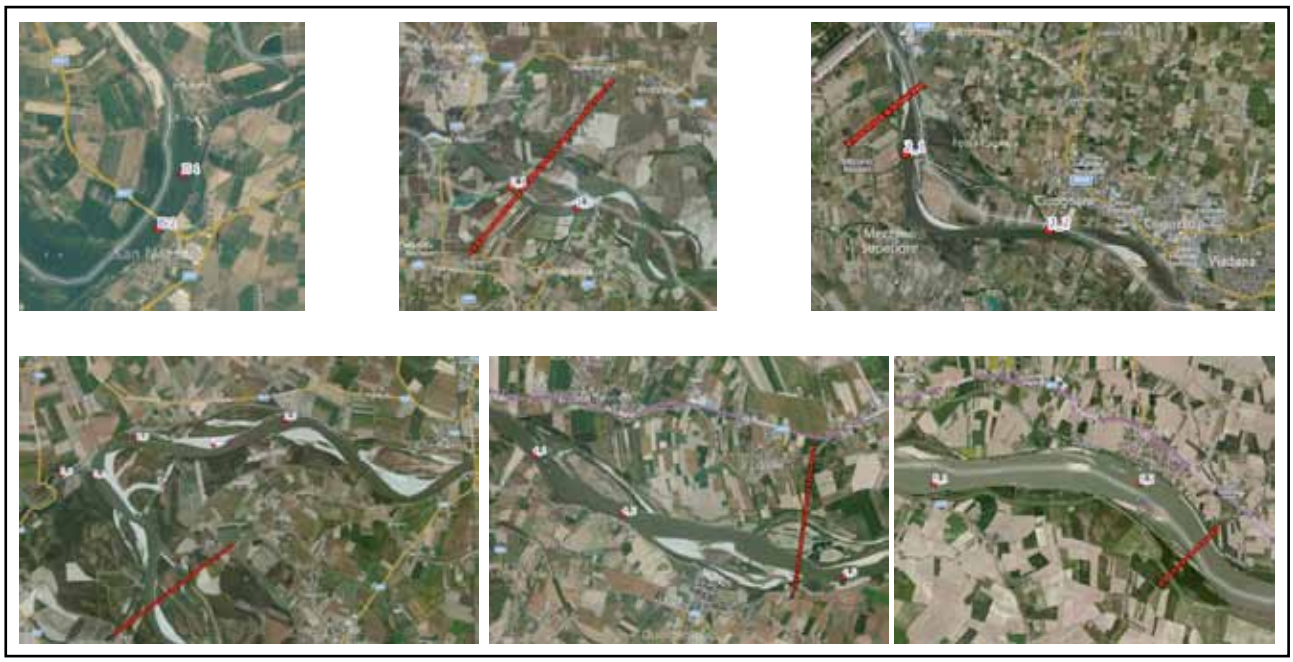


Figura 475 - Individuazione su foto aerea dei punti di campionamento RTI (la linea rossa individua la posizione originaria delle traverse in progetto, prevista nello studio di fattibilità)

Le misure di portata sono state eseguite tramite un profilatore acustico doppler (ADCP), montato su natante, in congruenza con la norma ISO/TS 24154-2005. Le misure sono state effettuate operando da imbarcazione motorizzata condotta da personale AIPO, con la finalità di caratterizzare la condizione idrologica di riferimento per la campagna e (particolarmente nel sito pilota, dove è stato eseguito un maggior numero di transetti) di indagare la distribuzione nella sezione dei vettori velocità, per considerazioni idromorfologiche e per supportare la calibrazione del modello.

I campioni di sedimento sono stati prelevati mediante utilizzo di una benna di tipo Van Veen manovrata da imbarcazione. Tale strumento è specificamente dimensionato per il campionamento di sedimenti fini (sabbie e limi), in quanto la penetrazione nei depositi di MSF avviene per il solo peso della benna stessa.

I campioni sono stati sottoposti ad analisi granulometrica di laboratorio mediante setacciatura per via secca, utilizzando i setacci standard della serie ASTM. Essi sono inoltre stati sottoposti ad analisi di caratterizzazione chimica, relativamente sia al materiale solido tal quale che all'acqua interstiziale.

In particolare, per quanto riguarda la frazione solida, si è ricercata la presenza dei principali metalli pesanti e dei composti idrocarburici pesanti. In merito alle acque interstiziali è stato eseguito su alcuni campioni un test di cessione ai sensi del D.M. 27/09/2010, oltre che un test di tossicità acuta con Daphnia Magna. Sono state inoltre condotte analisi relative agli altri inquinanti specifici indicati nella tabella 1 dell'allegato 5 al titolo V, parte IV del D.Lgs.152/06 (quali IPA, PCB, BTEX).

Relativamente alla caratterizzazione delle acque si è proceduto alla valutazione dei principali parametri macrodescrittori di qualità ambientale (ai sensi del D.Lgs.152/06 e s.m.i., con particolare riferimento al D.M. 260/2010) su colonne d'acqua a diversa profondità. Oltre alla determinazione dei parametri misurabili direttamente in sito, sono stati prelevati a diverse profondità anche campioni per l'analisi chimica in laboratorio.

I dati di misura sono stati confrontati con le soglie di concentrazione definite per la valutazione dell'indice LIMeco (Livello di Inquinamento dai Macrodescrittori per lo stato ecologico), nell'ambito del D. Lgs. 152/06 (rif. allegato 1 alla parte III, come aggiornato dal D.M. 08/09/2010, n.260), e dell'analogo indice LIM definito dall'abrogato D. Lgs. 152/99, per valutare la congruenza dei valori rilevati rispetto agli obiettivi di qualità per i corpi idrici superficiali.

22.1.4 Campagna marzo 2015: sintesi dei risultati

I risultati delle analisi condotte nel mese di marzo, dettagliati in allegato, hanno evidenziato come tutti i tratti di fiume Po oggetto di indagine presentino caratteristiche chimico-fisiche e qualitative del tutto confrontabili tra loro.

Relativamente alle misure di portata eseguite (Tabella 166), riferite a 2 giorni consecutivi in condizioni idrologiche stabili, si osserva un graduale incremento procedendo verso valle, in relazione ai contributi dei bacini afferenti. Essendo il mese di marzo, l'incidenza dei prelievi a uso irriguo non è tale da invertire il trend naturale.

MISURE DI PORTATA	CAMPAGNA DI INDAGINI MARZO 2015
SEZIONE	Q [m3/s]
Roccabianca	1252
Viadana	1339
Borgoforte	1537
Sustinente	1689
Stienta	1759

Tabella 166 - Sintesi delle misure di portata eseguite nei giorni 03/03/2015 e 04/03/2015.



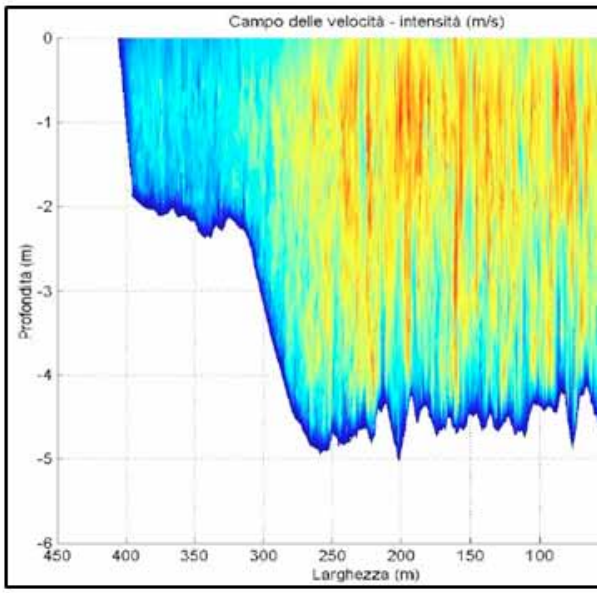


Figura 476 - Esecuzione di misura di portata e esempio di restituzione di un transetto con distribuzione dell'intensità dei vettori velocità.

In Tabella 167 è riportata una sintesi dei parametri granulometrici determinati per i campioni prelevati: tutte le sezioni sono caratterizzate dalla presenza di materiale sabbioso. Alcune presentano percentuali di ghiaia, ma sempre inferiori al 5%. Si osserva, come atteso, una tendenza alla riduzione dei diametri caratteristici man mano che si procede verso valle.

GRANULOMETRIE							
Punto campionamento	D90	D60	D50	D10	Cu (D60/ D10)	Cc D302/ (D10*D60)	Classificazione (AGI)
IS 1	0,845	0,397	0,335	0,171	2,324	0,845	Sabbia
1_1	0,796	0,339	0,338	0,174	2,287	0,847	Sabbia
2_1	0,766	0,395	0,335	0,175	2,261	0,849	Sabbia
3_1	0,457	0,314	0,278	0,168	1,867	0,883	Sabbia
3_2	0,646	0,347	0,301	0,169	2,052	0,866	Sabbia
3_4	0,468	0,319	0,281	0,168	1,893	0,880	Sabbia
4_1	0,499	0,333	0,291	0,169	1,967	0,873	Sabbia
4_3	0,572	0,340	0,296	0,170	2,005	0,870	Sabbia
5_1	0,454	0,312	0,276	0,168	1,863	0,883	Sabbia

Tabella 167 - Sintesi delle analisi granulometriche.

Le analisi sul sedimento tal quale effettuate sui campioni prelevati hanno evidenziato in tutti i tratti l'assenza delle sostanze inquinanti ricercate (metalli pesanti, idrocarburi) per concentrazioni superiori a quelle di soglia indicate dalla normativa e la compatibilità del sedimento con i limiti previsti dal D.M. 161/2012 (relativo alle modalità di gestione delle terre e rocce da scavo) e dal D.Lgs.152/06.

Analoghi risultati sono stati ottenuti per i test di cessione eseguiti in corrispondenza del sito pilota, con concentrazioni dei parametri indagati nell'eluato sempre inferiori ai limiti di legge (rif. D.M. 27/09/2010). Anche il test effettuato con Daphnia Magna non ha evidenziato condizioni di tossicità nei sedimenti.

Per quanto concerne la qualità delle acque, si riassumono in Tabella 168 i risultati relativi a temperatura, conducibilità elettrica, pH ed ossigeno disciolto rilevati nella zona superficiale della corrente in tutti i punti di campionamento; in Tabella 169. Si osserva come le variazioni dei parametri tra i vari siti siano modeste. L'unica eccezione riguarda il punto 3_2, che presenta una maggiore conducibilità elettrica; il punto è ubicato sul fiume Oglio alla confluenza, le cui acque possono avere caratteristiche differenti da quelle del fiume Po.

PARAMETRO	U. M.	CAMPIONI SU COLONNA SUPERFICIALE IN ALVEO															
		IS 1	IS 2	1_1	1_2	2_1	2_2	3_1	3_2	3_3	3_4	3_5	4_1	4_2	4_3	5_1	5_2
Temperatura	°C	8,9	8,9	9,1	9,1	9,3	9,3	10,0	10,5	9,9	9,8	9,8	9,3	9,3	9,3	9,6	9,9
Cond. elettrica a 25 °C	µS/cm	436	435	444	444	450	447	442	569	479	458	466	470	497	485	494	498
pH	—	8,02	8,07	8,03	8,04	7,98	8,07	8,16	8,05	8,12	8,22	8,11	8,05	8,05	8,05	8,04	8,08
Ossigeno disciolto	mg/l	10,95	10,97	10,70	11,20	10,51	10,60	11,17	10,61	10,90	11,11	11,5	11,14	11,6	11,15	11,15	11,22
Ossigeno disciolto	% sat.	95,7	95,1	93,7	96,1	93,1	93,1	97,5	94,4	96,4	96,8	96,7	95,5	96,5	96,4	97,4	98,3

Tabella 168 - Elementi macrodescrittori della qualità delle acque ricavati per i vari siti nella zona superficiale.

PARAMETRO	U. M.	CAMPIONI SU COLONNA SUPERFICIALE IN ALVEO															
		IS 1	IS 2	1_1	1_2	2_1	2_2	3_1	3_2	3_3	3_4	3_5	4_1	4_2	4_3	5_1	5_2
Temperatura	°C	9,2	9,1	9,2	9,1	9,6	9,6	9,8	10,4	9,9	9,70	9,8	9,6	9,6	9,3	9,8	9,9
Cond. elettrica a 25 °C	µS/cm	438	441	443	451	451	449	445	563	480	451	466	470	497	505	499	498
pH	—	8,18	8,09	8,10	8,07	8,12	8,12	8,17	8,12	8,16	8,23	8,07	8,06	8,06	8,11	8,13	8,12
Ossigeno disciolto	mg/l	10,90	10,96	10,90	10,97	10,84	10,75	11,3	10,8	11,20	11,15	11,15	11,15	11,25	11,21	11,20	11,50
Ossigeno disciolto	% sat.	95,5	95,4	94,1	94,8	94,2	93,7	97,6	95,8	98,4	98,5	98,5	97,3	98,2	97,1	99,4	99,7

Tabella 169 - Elementi macrodescrittori della qualità delle acque ricavati per i vari siti nella zona profonda

Sulla base dei risultati delle analisi di laboratorio e dei parametri rilevati in sito sono stati valutati gli indici LIM (in riferimento all'abrogato D.Lgs. 152/99) e LIMeco (cfr. D. Lgs. 152/06) per ottenere indicazioni in merito alla qualità delle acque nelle varie sezioni. Una sintesi dei risultati ottenuti è riportata in Tabella 170.

	CAMPIONI SU COLONNA IN ALVEO																	
	IS 1		1_1		2_1		3_3			3_4		4_1		4_3		5_1		
INDICATORE	S	P	S	P	S	P	S	I	P	S	P	S	P	S	P	S	P	
LIMeco	0,813	0,688	0,688	0,469	0,500	0,688	0,469	0,531	0,531	0,531	0,438	0,656	0,656	0,656	0,656	0,531	0,656	
media	0,750		0,578		0,594		0,510			0,438		0,656		0,656		0,594		
LIM	460	400	460	400	380	420	270	290	320	270	340	360	320	340	360	300	340	
media	430		430		400		295			305		340		350		320		

Tabella 170 - Indici LIM e LIMeco per i diversi punti di campionamento.

Si osserva come lo stato di qualità chimico-fisico del tratto di fiume Po indagato sia generalmente classificabile come "buono", ad eccezione della sezione IS 1 ("ottimo") e 3_4 ("sufficiente").

22.1.5 Campagna agosto 2015: sintesi dei risultati

Anche nella campagna condotta nel mese di agosto i tratti oggetto di indagine presentano caratteristiche chimico-fisiche e qualitative del tutto confrontabili tra loro.

Relativamente alle misure di portata eseguite (Tabella 171), riferite a 3 giorni consecutivi in condizioni idrologiche stabili, si osserva una ridotta variabilità dei deflussi procedendo verso valle, con oscillazioni e un trend generale in decremento spostandosi verso valle, in quanto i prelievi in atto risultano superiori agli apporti naturali.

MISURE DI PORTATA	CAMPAGNA DI INDAGINI AGOSTO 2015
SEZIONE	Q [m3/s]
Rocca Bianca	495,4
Viadana	486,9
Borgoforte	436,8
Sustinente	542,7
Stienta	436,0

Tabella 171 - Sintesi delle misure di portata eseguite nei giorni 04/08/2015÷06/08/2015

Le analisi granulometriche svolte su campioni prelevati nel solo sito pilota hanno confermato quanto già osservato nella prima campagna, ovvero la presenza di sedimenti sabbiosi. La fase di morbida intercorsa tra le due campagne non ha quindi modificato tale aspetto.

Anche le nuove analisi di laboratorio sul tal quale e sulle acque interstiziali confermano i risultati della prima campagna, con assenza di valori anomali e concentrazioni degli inquinanti indagati inferiori alle soglie di legge.

Per quanto concerne la qualità delle acque, si riportano in Tabella 172 e Tabella 173 i risultati relativi a temperatura, conducibilità elettrica, pH ed ossigeno disciolto rilevati nelle zone superficiale e profonda della corrente in tutti i punti di campionamento. Si osserva come le variazioni dei parametri siano modeste. Il punto 3_2 sul fiume Oglio conferma condizioni di conducibilità elettrica delle acque differenti da quelle del fiume Po. La colonna campionata presso il sito della prima traversa in progetto (1_1, Roccabianca) mostra la presenza di una minore concentrazione di ossigeno disciolto.

PARAMETRO	U. M.	CAMPIONI SU COLONNA SUPERFICIALE IN ALVEO						
		1_1	2_1	3_1	3_2	3_6	4_3	5_1
Temperatura	°C	23,6	24,8	25,5	27,8	25,4	26,1	26,7
Cond. elettrica a 25 °C	µS/cm	449	451	454	547	452	463	458
pH	—	8,33	7,70	7,80	8,06	7,80	7,92	7,83
Ossigeno disciolto	mg/l	7,64	9,03	10,07	9,74	9,14	9,82	8,09
Ossigeno disciolto	% sat.	89,3	108,4	117,8	123,3	110,7	120,6	98,4

Tabella 172 - Elementi macrodescrittori della qualità delle acque ricavati per i vari siti nella zona superficiale

PARAMETRO	U. M.	CAMPIONI SU COLONNA SUPERFICIALE IN ALVEO					
		1_1	2_1	3_1	3_6	4_3	5_1
Temperatura	°C	23,8	25,8	25,8	26,6	26,8	27,0
Cond. elettrica a 25 °C	µS/cm	449	453	472	461	465	468
pH	—	8,39	7,90	9,05	7,93	8,03	7,99
Ossigeno disciolto	mg/l	6,60	7,41	8,03	7,84	7,87	6,50
Ossigeno disciolto	% sat.	77,3	89,7	98,8	93,6	97,2	80,6

Tabella 173 - Elementi macrodescrittori della qualità delle acque ricavati per i vari siti nella zona profonda.

Sulla base dei risultati delle analisi di laboratorio e dei parametri rilevati in sito sono stati valutati gli indici LIM (in riferimento all'abrogato D.Lgs. 152/99) e LIMeco (cfr. D.Lgs. 152/06) per ottenere indicazioni in merito alla qualità delle acque nelle varie sezioni. Una sintesi dei risultati ottenuti è riportata in Tabella 174.

	CAMPIONI SU COLONNA IN ALVEO							
	1_1	2_1	3_1	3_2	3_6		4_3	5_1
INDICATORE	S	S	S	S	S	P	S	S
LIMeco	0,469	0,594	0,563	0,344	0,563	0,688	0,406	0,594
media	-	-	-	-	0,625		-	-
420	360	420	440	300	420	460	340	400
media	-	-	-	-	440		-	-

Tabella 174 - Indici LIM e LIMeco per i diversi punti di campionamento.

Si osserva come lo stato di qualità del tratto di fiume Po indagato sia generalmente classificabile come "buono", ad eccezione delle sezioni 1_1 e 4_3 ("sufficiente"). Il punto sul fiume Oglio (3_2) è classificabile come "sufficiente".

22.1.6 Sintesi dello stato ecologico attuale

Si evidenzia innanzitutto come l'effettivo giudizio di qualità fornito dagli indici considerati (LIM e LIMeco) sia a rigore da valutarsi sulla media di 4 campagne annue; le indicazioni riportate nel presente capitolo e in quelli precedenti si basano invece su un numero limitato di rilevamenti e hanno la finalità di associare i valori misurati a uno stato ambientale di riferimento.

Facendo riferimento all'indice LIM, tutti i punti campionati sono classificabili in classe II-Buono, per entrambe le campagne e come "media annua" (riferita a sole 2 campagne primaverile ed estiva).

Relativamente invece all'indice LIMeco, quasi tutti i punti campionati sono classificabili come "Buono" sia nella campagna primaverile che in quella estiva, ma si rilevano maggiori variazioni.

Gli scadimenti riscontrati nella campagna di agosto in alcune sezioni (1_1, 4_3) testimoniano una situazione più gravosa dal punto di vista della qualità ecologica nel periodo estivo (per verosimile maggiore presenza di nutrienti derivanti dalle pratiche irrigue, minore portata, maggiori temperature).

Nel complesso comunque, facendo riferimento ai valori medi dell'indice LIMeco nelle due campagne di misura, si otterrebbe una classificazione di livello "Buono" per tutti i punti campionati, a eccezione del sito IS1 classificato come "Elevato".

In Figura 477 si propone una sintesi dell'evoluzione temporale recente del livello di qualità fisico-chimica delle acque espresso dall'indice LIMeco (previsto dal vigente D.Lgs.152/06 così come definito nel D.M. 260/2010 e s.m.i.), che come già descritto considera come parametri macrodescrittori della qualità ambientale l'ossigeno disciolto e la concentrazione di nutrienti (composti del fosforo e dell'azoto).

I dati rappresentati sono riferibili alla media dell'ultimo triennio completo di monitoraggio (2010-2012, linea sottile nel grafico), ai valori relativi all'anno più recente di disponibilità di dati (2013, linea spessa di sfondo alla precedente) e ai risultati dei nuovi campionamenti eseguiti dallo scrivente RTI per il presente studio (descritti nei capitoli precedenti).

Relativamente a questo parametro si evidenzia un rilevante trend positivo riscontrabile nel periodo più recente: dai dati disponibili dei campionamenti ARPA 2013 (successivi a quelli utilizzati per la classificazione presentata nel PdG Po 2015) lo stato di qualità del tratto di monte, fino a confluenza Mincio, risulta migliorato allo stato "buono", mentre il tratto a valle è ancora classificato "sufficiente" (da classificazione ARPA Veneto, che risulta la peggiore; ARPA Lombardia classifica invece come "buono" la stazione di Sermide e il tratto di corpo idrico corrispondente). I campionamenti effettuati nel 2015 dal RTI evidenziano invece in tutte le stazioni indagate (fino a Stienta/Pontelagoscuro) un livello qualitativo "buono".

Tale trend appare riferibile al positivo effetto di una graduale messa in atto delle azioni di gestione/controllo degli apporti di nutrienti nei bacini contribuenti, in relazione a quanto definito nel Piano di Gestione e nei PTA.

Il progetto in esame dovrà quindi essere tale da non mutare questa tendenza.

Relativamente ai sedimenti, tutto il tratto indagato è risultato caratterizzato da materiale francamente sabbioso e piuttosto omogeneo, anche lungo l'asta fluviale, pur con diametro caratteristico decrescente da monte verso valle (d50 variabile da circa 0,4 a circa 0,3 mm).

Le analisi chimiche hanno indagato la presenza dei metalli pesanti e degli idrocarburi pesanti (C>12). Non sono state evidenziate criticità particolari e tutti i parametri hanno mostrato concentrazioni nettamente inferiori alle concentrazioni di soglia di contaminazione (CSC) per il suolo e sottosuolo in funzione della specifica destinazione d'uso dei terreni (con riferimento alla possibilità di reimpiego del materiale per utilizzo in siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale -tipo A- o ad uso commerciale ed industriale - tipo B). Tali CSC sono definite dall'allegato 5 alla parte IV, titolo 5 del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i. (tabella 1) e sono poi state riprese dal D.M. 161/2012 (relativo alle modalità di gestione delle terre e rocce da scavo).

L'assenza di particolari criticità, attesa anche in relazione alla sostanziale assenza di frazioni limose che possano potenzialmente trattenere maggiormente eventuali inquinanti, è risultata anche dall'esecuzione di test di cessione ai sensi del DM 27/09/2010: le concentrazioni di inquinanti nelle acque interstiziali risultano inferiori ai limiti di soglia, risultato indicativo di una limitata possibilità di trasferimento di eventuali inquinanti dal sedimento alle acque nelle condizioni attuali.

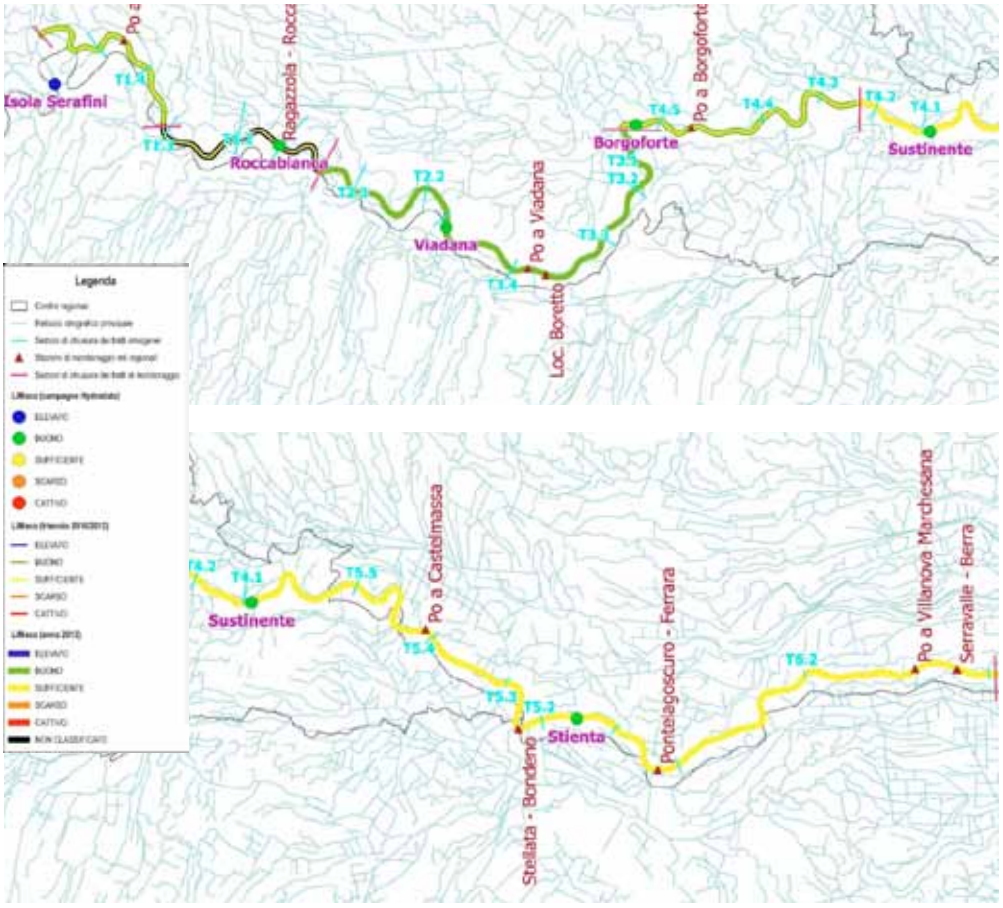


Figura 477 - Sintesi dell'evoluzione del livello di qualità ambientale espresso dall'indice LIMeco

I test eseguiti con Daphnia Magna hanno mostrato assenza di ecotossicità.

22.2 ANALISI MODELLISTICA DELLA POTENZIALE EVOLUZIONE DELLO STATO ECOLOGICO SU SITO PILOTA

22.2.1 Impostazione metodologica

Come già descritto, per un'adeguata comprensione delle dinamiche idroecologiche che condizionano la qualità ambientale del tratto fluviale indagato, in relazione agli effetti producibili dalle opere in progetto, è necessario fare ricorso a un'analisi di elevato dettaglio basata su strumenti modellistici avanzati.

Questa analisi è stata condotta su un sito pilota, con la finalità di poter poi estrapolare parametricamente i risultati per descrivere gli effetti attesi sull'intero tratto sotteso. La condizione di analisi è quella relativa alla soluzione progettuale di regimazione, l'unica che per le considerazioni già esposte in precedenza ha la potenzialità di incidere significativamente sugli aspetti in esame, in quanto comporta una rilevante modifica dell'idrodinamica fluviale (in termini di variazione di livelli, velocità, aree bagnate rispetto allo stato attuale).

Come sito rappresentativo è stato scelto il tratto di Borgoforte, in corrispondenza della confluenza dell'Oglio. A valle di quest'ultima era originariamente stata prevista l'ubicazione della terza traversa di regimazione, in posizione arretrata a monte rispetto a quella proposta nello Studio di Fattibilità.

L'ottimizzazione progettuale ha poi portato a spostare ulteriormente a monte l'ubicazione del manufatto per risolvere una serie di criticità locali correlate con l'innalzamento dei livelli, per cui nella configurazione finale di progetto l'opera è posizionata a monte di confluenza Oglio. I risultati del modello fanno quindi riferimento a una condizione leggermente diversa da quella effettivamente prevista nel progetto al termine dalle diverse verifiche di compatibilità, ma che è comunque rappresentativa degli effetti che gli interventi possono provocare sul tratto di alveo, in quanto le caratteristiche idrauliche e morfologiche sono del tutto analoghe.

Il sito scelto mantiene la propria rappresentatività in termini di condizioni medie di un tratto di possibile intervento (peraltro in un tratto individuato dal PdG Po 2015 con un obiettivo ecologico a più breve termine rispetto agli altri, quindi più significativo in termini di controllo degli effetti attesi dalle opere previste), e i risultati ottenuti possono efficacemente essere esportati sull'intero tratto fluviale interessato dal progetto nel suo complesso.

L'analisi dei fenomeni in oggetto, come già esposto, è di particolare complessità perché richiede la rappresentazione di un sistema ecologico regolato da mutue interazioni tra numerosi parametri (oltre a quelli idrodinamici – livelli, portate, velocità – anche le forzanti idrologiche, quali temperatura di aria e acqua, vento, radiazione solare, umidità, ecc., e i caratteri chimico fisici, con presenza o meno di inquinanti/nutrienti) che incidono sul ciclo di vita dei livelli trofici inferiori (vegetazione bentica e algale, produttori e consumatori primari) e superiori (macrobenthos, ittiofauna, avifauna).

Per una corretta analisi degli effetti che le "sollecitazioni" indotte dalle opere in progetto (variazione dei parametri idraulico-strutturali, cioè aree bagnate, altezze d'acqua, velocità) possono provocare sulle componenti di qualità chimico-fisica e biologico-ecologica si è proceduto quindi con l'allestimento di un modello numerico idrodinamico-ecologico di elevato dettaglio sul sito pilota, rappresentativo dei potenziali effetti indotti dalla realizzazione di un sostegno della tipologia prevista per la soluzione di regimazione.

In particolare, la distribuzione spazio-temporale di diverse variabili di stato "qualitative", comunemente correlate all'analisi della qualità ambientale e dell'evoluzione dei fenomeni di eutrofizzazione dei corpi idrici, è stata simulata attraverso l'utilizzo del modello Ecolab di DHI, che si configura come un modulo integrativo al modello idrodinamico tridimensionale basato sul codice MIKE 3 FM di DHI.

Il modello è stato allestito sulla base delle informazioni topografiche più aggiornate disponibili ed è stato calibrato dal punto di vista idrodinamico grazie ai dati raccolti in sito nell'ambito delle specifiche campagne di indagine (riferimento particolare ai transetti di misura della distribuzione di velocità).

Per evidenziare maggiormente i potenziali effetti eventualmente producibili dalle opere in esame si è scelto di effettuare le simulazioni con riferimento a un periodo di elevata criticità, ovvero i mesi estivi del 2003, contraddistinti da una fase di magra particolarmente pronunciata. Per tale periodo sono

state recuperate o ricostruite le serie storiche dei parametri di input richiesti dal modello, in termini di forzanti idrologiche e sostanze presenti nelle acque.

I risultati sono stati analizzati in termini di evoluzione temporale dei vari parametri su più punti rappresentativi delle diverse aree del modello e come distribuzione spaziale degli stessi negli istanti più significativi.

Per maggiori dettagli si rimanda all'elaborato specifico in allegato; nel seguito si fornisce una sintesi dei principali elementi di interesse.

A fronte dell'elevato numero di componenti in gioco e della complessità delle correnti presenti, per l'analisi è stato necessario affrontare lo studio utilizzando un modello numerico tridimensionale, in grado di simulare i flussi di corrente e l'andamento della temperatura, in funzione degli apporti da monte (fiumi Po e Oglio) e degli scambi di calore con l'atmosfera.

Lo studio è stato condotto utilizzando il modulo HD (hydrodynamics) del codice di calcolo **MIKE 3 HD FM** del DHI.

Esso risolve le equazioni di continuità, quantità di moto, temperatura e densità (in un caso più generale anche salinità); la discretizzazione spaziale delle equazioni è realizzata attraverso un metodo di soluzioni ai volumi finiti. Il dominio di calcolo nel piano orizzontale è discretizzato attraverso una suddivisione del continuo secondo una griglia non strutturata (elementi triangolari a risoluzione variabile nel dominio, che permettono di descrivere in maggiore dettaglio le aree più significative, quali quelle prossime allo sbarramento), mentre nel piano verticale il modello utilizza l'approccio di discretizzazione della colonna d'acqua secondo i cosiddetti layers sigma (layers di spessore variabile in funzione della profondità locale).

Il dominio di calcolo del modello nella configurazione di stato attuale comprende un tratto di Po di lunghezza pari a circa 7,2 km e la confluenza del fiume Oglio in sinistra orografica. Il collegamento del corpo idrico considerato con il sistema "esterno" (immissioni di portata da monte, condizioni di livello di valle, atmosfera) viene gestito attraverso l'introduzione di opportune forzanti locali, quali vento e scambio di calore, e condizioni al contorno (flussi e livelli), questi ultimi ricavati dal modello idrodinamico monodimensionale del fiume Po basato sul codice di calcolo MIKE 11 HD, il cui allestimento è descritto nel capitolo 5.

Notevole importanza riveste la scelta della risoluzione spaziale da adottare per la definizione della vera e propria batimetria di calcolo (mesh), sia in planimetria, sia lungo la colonna d'acqua. Una risoluzione orizzontale media per i triangoli costituenti la mesh di calcolo compresa tra 20 e 50 m circa (lunghezza media dei lati dei triangoli) permette nel caso di studio specifico una simulazione sufficientemente accurata della circolazione idrodinamica in termini di livelli e correnti, nonché della distribuzione delle principali grandezze di interesse per lo studio (temperatura e, in seguito, variabili di interesse per l'analisi della qualità delle acque), e allo stesso tempo, in virtù dell'ottimizzazione dei tempi di calcolo, permette di poter effettuare simulazioni di eventi della durata di diversi mesi su più scenari.

Data la ridotta profondità del corpo idrico analizzato, in particolar modo nello scenario attuale, generalmente inferiore ai 10 m, si è ritenuto opportuno discretizzare la colonna d'acqua in un numero limitato di livelli di calcolo (layers). I 4 layers adottati permettono di differenziare le caratteristiche idrodinamiche e di qualità delle acque più tipiche della superficie da quelle specifiche del fondo. Essi presentano uno spessore variabile in funzione della profondità locale (sigma layers).

In totale la mesh relativa allo scenario attuale è costituita da 4.646 nodi e 8.783 elementi triangolari per ognuno dei 4 strati verticali impiegati. Per la mesh relativa alla configurazione di progetto (estesa solo a monte della traversa) il numero di nodi ed elementi si riducono rispettivamente a 3.297 e 6.225 (cfr Figura 478).

Il modello idrodinamico (configurazione di stato attuale) è stato tarato sulla base dei dati misurati in sito nel corso della campagna di marzo 2015, per garantire la robustezza dei risultati ottenuti; in particolare si è fatto riferimento alle misure di portata e velocità eseguite su transetti mediante profilatore acustico Doppler (ADCP) manovrato da imbarcazione.

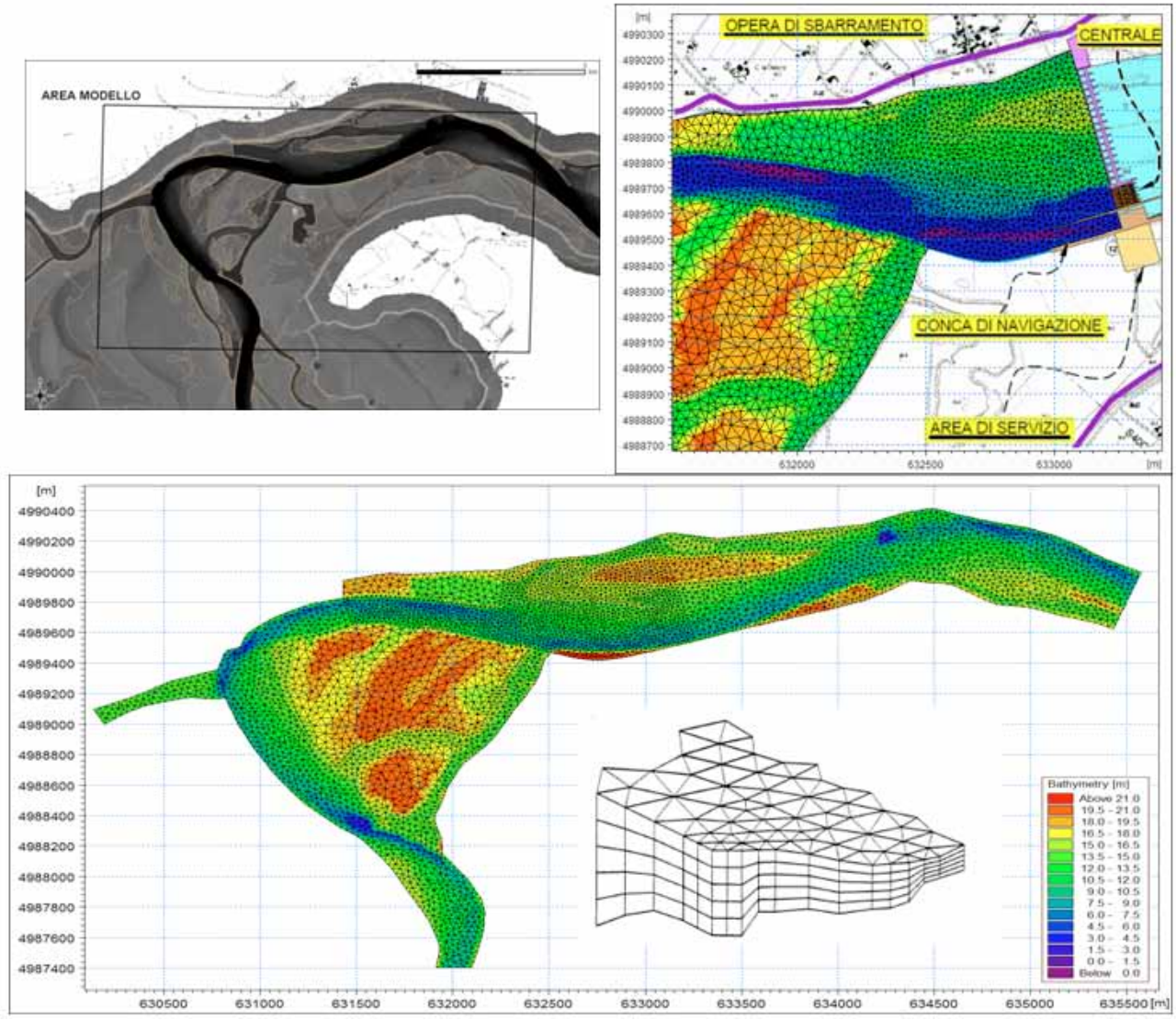


Figura 478 - Batimetria del modello allestito nella configurazione attuale e di progetto; base DEM di partenza e esemplificazione dello schema di calcolo tridimensionale

Le attività di taratura hanno riguardato in particolare il parametro di scabrezza del fondo. La simulazione di taratura che ha fornito i risultati maggiormente confrontabili con i riscontri sperimentali (modalità generali di flusso, tiranti e soprattutto velocità) è stata quella condotta con un valore uniforme di scabrezza equivalente pari a 0,01 m, condizione che pertanto è stata successivamente adottata per tutte le simulazioni eseguite, sia per lo scenario attuale che per quello di progetto.

Il modello tarato, introducendo in input le forzanti atmosferiche (vento, temperatura dell'aria, umidità, nuvolosità, precipitazioni-evaporazione) è in grado di restituire l'andamento dei livelli e delle circolazioni di corrente nel tratto indagato alle diverse profondità di interesse, ma anche di simulare gli scambi di calore con l'atmosfera, riproducendo pertanto i fenomeni di evaporazione e di variazione della temperatura dell'acqua. Considerando anche l'input di precipitazione locale, il modello è inoltre in grado di ricostruire l'andamento della salinità e eventuali variazioni di densità.

Il modello descritto è stato utilizzato per simulare (nelle configurazioni di stato attuale e di progetto-regimazione) un periodo di riferimento che risultasse di particolare criticità dal punto di vista delle sollecitazioni "ambientali" sul corpo idrico, in modo da poter indagare l'effetto eventualmente prodotto dalle opere in progetto con riferimento a condizioni cautelative.

In particolare si è fatto riferimento al periodo maggio-settembre 2003, caratterizzato da una delle magre estive più gravose registrate, con elevate temperature e l'instaurarsi di condizioni limite per la funzionalità fluviale. Per il tratto di interesse sono state recuperate le serie storiche di portata defluente

(dalla stazione idrometrica di Borgoforte, Figura 479) e ricostruiti gli andamenti delle forzanti di interesse in funzione dei dati disponibili sulle stazioni più prossime al sito (direzione e intensità del vento, precipitazione-evaporazione, temperatura dell'aria, temperatura dell'acqua, umidità relativa, radiazione solare, nuvolosità; cfr. relazione tecnica in allegato per maggiori dettagli).

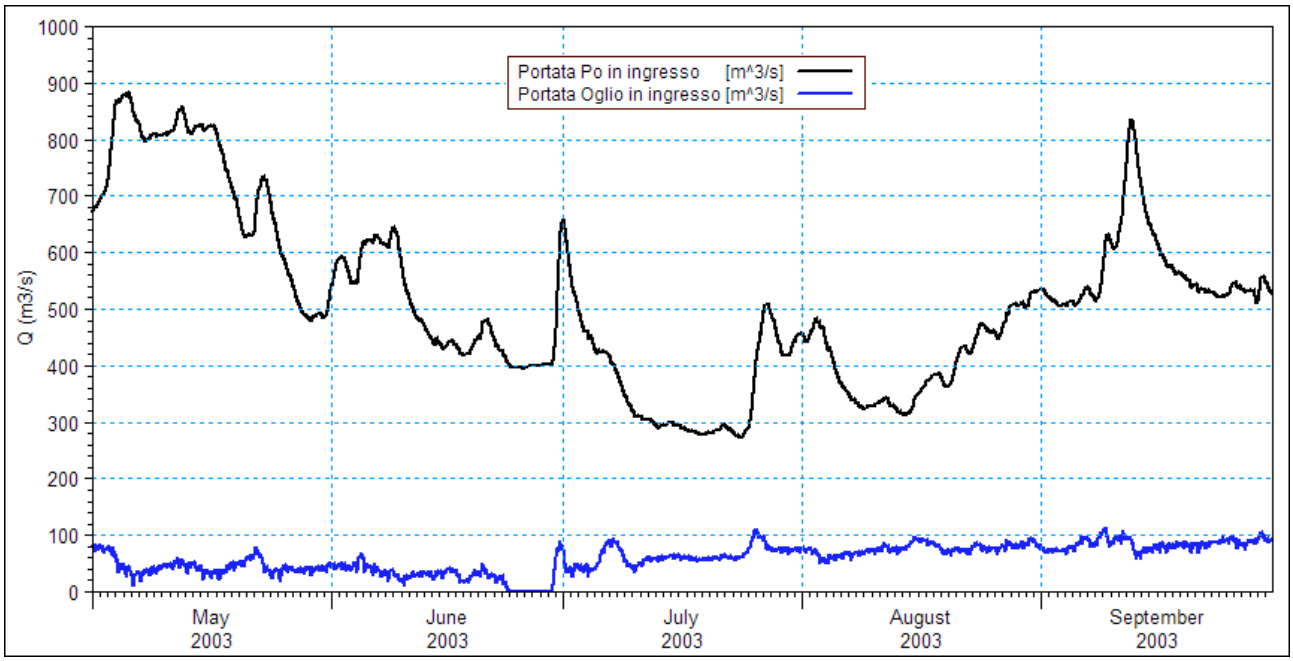


Figura 479 - Andamento delle portate del Po e dell'Oglio nel periodo di riferimento per la simulazione

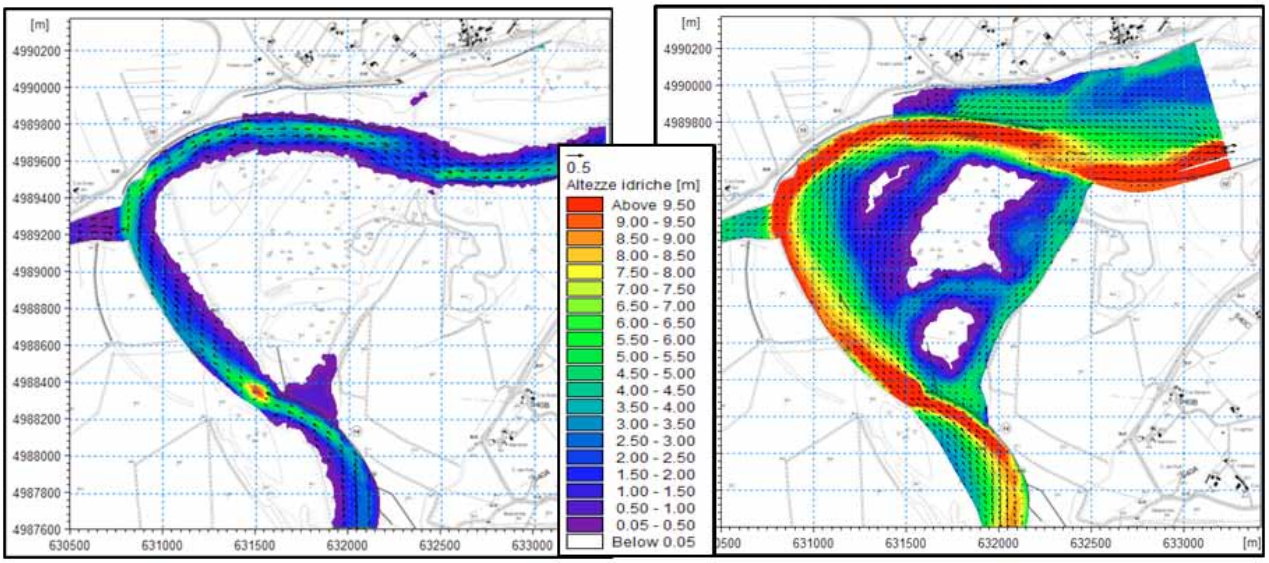


Figura 480 - Esempio di risultato del modello idrodinamico tridimensionale: distribuzioni di livelli e velocità superficiali nella condizione di stato attuale (sx) e progetto (dx)

22.2.2 Allestimento del modello ecologico

Al modello idrodinamico è stato accoppiato un modello numerico ecologico, anch'esso con schema tridimensionale, in grado di descrivere i processi fisici, chimici e biologici che avvengono nelle acque, tra i quali il ciclo dei nutrienti, la crescita di zooplancton e fitoplancton, la crescita algale ed il bilancio dell'ossigeno disponibile.

Per questa finalità è stato utilizzato il codice di calcolo **ECOLAB** di DHI, dotato di specifici templates predefiniti che sono stati accoppiati con il modulo di advezione-dispersione incluso nel modello idrodinamico MIKE 3 HD FM, attraverso il quale sono simulati i processi di trasporto fisico all'interno del dominio di calcolo. I due modelli sono totalmente integrati, con scambio di dati e aggiornamento

dei parametri ad ogni step di integrazione. I dati di input sono stati ricavati dalla bibliografia tecnica e dai risultati di dettaglio disponibili dei campionamenti ARPA.

In particolare sono stati utilizzati i moduli WQ, qualità dell'acqua, ed EU, eutrofizzazione, specificamente sviluppati per simulare i complessi fenomeni di tipo fisico, chimico e biologico alla base del ciclo dei nutrienti, dei processi di eutrofizzazione e del possibile instaurarsi di condizioni di anossia.

Il fenomeno dell'eutrofizzazione, possibile effetto limite delle modificazioni idrodinamiche indotte dai sostegni in progetto, è correlato con un anomalo sviluppo della vegetazione e del fitoplancton, dovuto ad **eccessivi apporti** di nutrienti. Il loro aumento numerico presso la superficie dello specchio d'acqua comporta una limitazione degli scambi gassosi (e quindi anche del passaggio in soluzione dell'ossigeno atmosferico nell'acqua) e dell'ingresso della luce solare (fonte di energia e motore della fotosintesi). Inoltre, quando le alghe muoiono vi è una conseguente forte diminuzione di ossigeno a causa della loro decomposizione, e i processi di putrefazione e fermentazione associati liberano quantità elevate di ammoniaca, metano e acido solfidrico, rendendo l'ambiente inospitale anche per altre forme di vita bentoniche (pesci di fondo, molluschi, crostacei, ecc.), con ricadute anche sui livelli superiori della catena alimentare.

Il template specifico prevede la risoluzione di un sistema di 12 equazioni differenziali che descrivono altrettante variabili di stato "standard". Le prime 11 descrivono grandezze rappresentative di quanto accade nella colonna d'acqua e sono denominate "variabili di stato advettive" (pertanto trattate sia nel modulo Ecolab sia nel modulo di advezione-dispersione AD).

La variabile di stato aggiuntiva appartiene invece alla descrizione del fondale e corrisponde alla vegetazione bentonica. Tale vegetazione non è soggetta né al trasporto in funzione del movimento dell'acqua né a fenomeni di dispersione. La Tabella 175 illustra l'elenco delle 12 variabili di stato considerate nel modello Ecolab e le rispettive unità di misura.

I processi relativi a carbonio, azoto e fosforo inclusi nel template di eutrofizzazione sono illustrati in Figura 481. La complessità delle schematizzazioni adottate è evidenziata anche dal fatto che in aggiunta alle 12 variabili di stato elencate in Tabella 175, il template prescelto prevede l'utilizzo di 35 variabili ausiliarie, 71 costanti, 61 processi, 6 forzanti esterne e 6 variabili derivate.

I processi che descrivono la variazione delle componenti considerate nel tempo e nello spazio sono naturalmente dipendenti anche da fattori esterni quali ad esempio la temperatura, la luce e la salinità (non nello specifico caso in esame). La salinità (pari a zero nel presente studio) e la temperatura sono ricavate in continuo dal modello Ecolab attraverso l'accoppiamento con il modello idrodinamico MIKE 3 HD FM descritto in precedenza.

Per maggiori dettagli in merito al template di Ecolab utilizzato nel presente studio si rimanda allo specifico documento tecnico allegato.

VARIABILE DI STATO	UNITÀ DI MISURA
Fitoplancton-Carbonio (PC)	[mgC/l]
Fitoplancton-Azoto (PN)	[mgN/l]
Fitoplancton-Fosforo (PP)	[mgP/l]
Clorofilla-a (CH)	[mg/l]
Zooplancton-Carbonio (ZC)	[mgC/l]
Detrito organogeno-Carbonio (DC)	[mgC/l]
Detrito organogeno-Azoto (DN)	[mgN/l]
Detrito organogeno-Fosforo (DP)	[mgP/l]
Azoto Inorganico (IN)	[mgN/l]
Fosforo Inorganico (IP)	[mgP/l]
Ossigeno disciolto (DO)	[mg/l]
Vegetazione bentica (BC)	[gC/m2]

Tabella 175 - Elenco delle variabili di stato considerate nel modello e indicazione delle unità di misura.

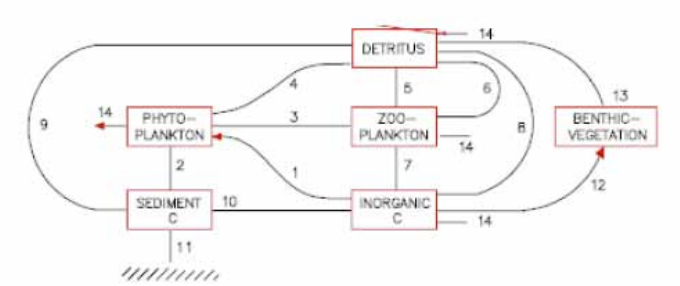


Figura 481 - Illustrazione schematica dei processi considerati nel template Ecolab utilizzato.

I risultati del modello descrivono le concentrazioni di fitoplancton, clorofilla a, zooplancton, detrito organogeno, nutrienti organici ed inorganici, ossigeno disciolto e biomassa di vegetazione bentica. A queste si aggiungono una serie di variabili derivate, quali ad esempio la produttività di fitoplancton e la domanda di ossigeno dei sedimenti.

Le condizioni al contorno e iniziali delle variabili simulate sono state definite in funzione dei valori misurati nel corso dei campionamenti dell'ARPA alla sezione di Borgoforte per il 2003 (in particolare si è fatto riferimento ai parametri fosforo totale, azoto inorganico, fosforo inorganico e ossigeno disciolto), o ricostruite in funzione dei dati disponibili (anche desunti dai campionamenti eseguiti dal RTI) e mediante applicazione di relazioni di correlazione empiriche.

Una vera e propria calibrazione del modello ecologico non è stata possibile per la mancata disponibilità di misure di tutte le variabili ecologiche in esame nell'ambito del sito considerato e nell'intervallo temporale simulato. Il modello è però di tipo deterministico, fisicamente basato e pertanto l'assegnazione di condizioni al contorno e di parametri di calcolo realistici conferisce ai risultati un grado di affidabilità già sufficientemente elevato per le finalità del presente studio, in cui l'interesse riguarda non tanto i risultati in termini assoluti, che potrebbero appunto essere affetti da un certo grado di errore per l'assenza di una specifica taratura del modello, ma piuttosto in termini relativi, come confronto tra scenario attuale e scenario di progetto. In tal modo gli effetti di eventuali errori tendono a compensarsi e auto-elidersi; le conclusioni dell'analisi in termini di deviazione da uno stato "naturale" di riferimento possono inoltre essere estrapolate in termini parametrici per caratterizzare l'intero tratto in progetto.

22.2.3 Sintesi dei risultati

I risultati del modello hanno permesso di analizzare l'evoluzione temporale di tutti i parametri idrodinamici ed ecologici di interesse, calcolati per ciascuna cella e per ciascuna profondità. Per una rappresentazione di sintesi sono state prodotte delle mappe di distribuzione spaziale dei diversi parametri, su due strati di riferimento (superficiale e profondo) e dei diagrammi temporali di serie riferite ad alcuni punti rappresentativi, ubicati nella Figura 482: nello scenario di progetto l'estrazione ha riguardato tutti i 6 punti (t1÷t6) mentre nello scenario attuale è stata possibile solo per i punti presenti all'interno dell'alveo inciso (t1, t2 e t5) essendo gli altri tre in aree golenali asciutte.

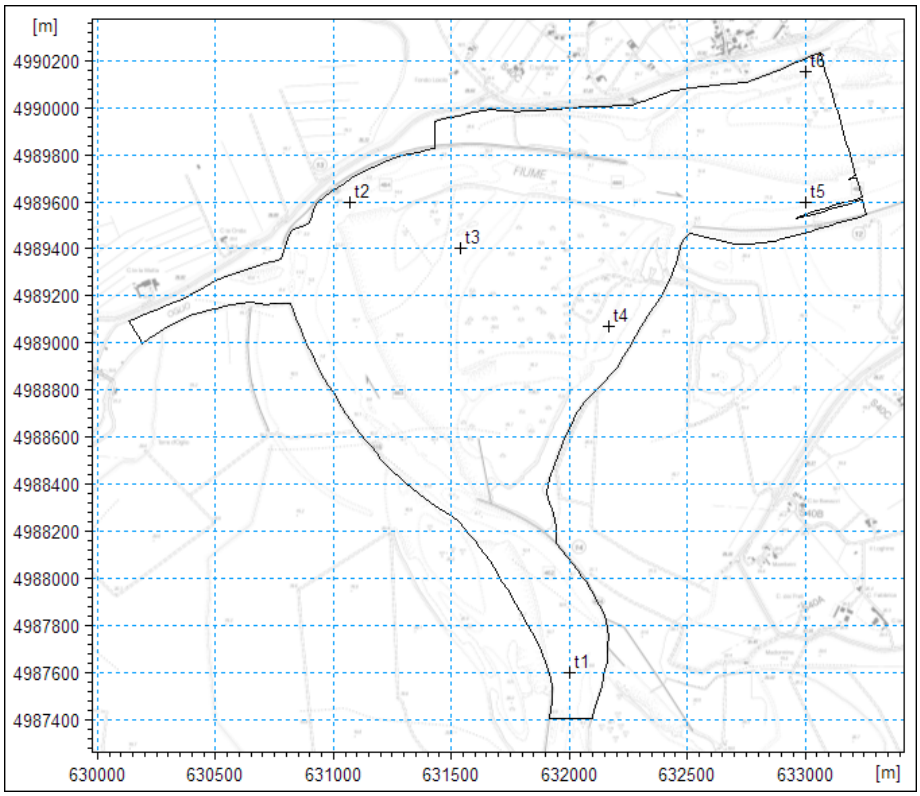


Figura 482 - Ubicazione dei punti di estrazione delle serie temporali delle variabili simulate.

Le mappe planimetriche di rappresentazione della distribuzione spaziale delle variabili di maggiore interesse sono state prodotte sia per lo strato più superficiale che per lo strato più profondo in relazione a due date significative: il 15/07/2003, in cui si è registrato il minimo di portata defluente in Po, e il 25/08/2003, in cui si è riscontrato un minimo nella concentrazione di ossigeno disciolto. Un esempio di restituzione è fornito in Figura 483 relativamente all'ossigeno disciolto.

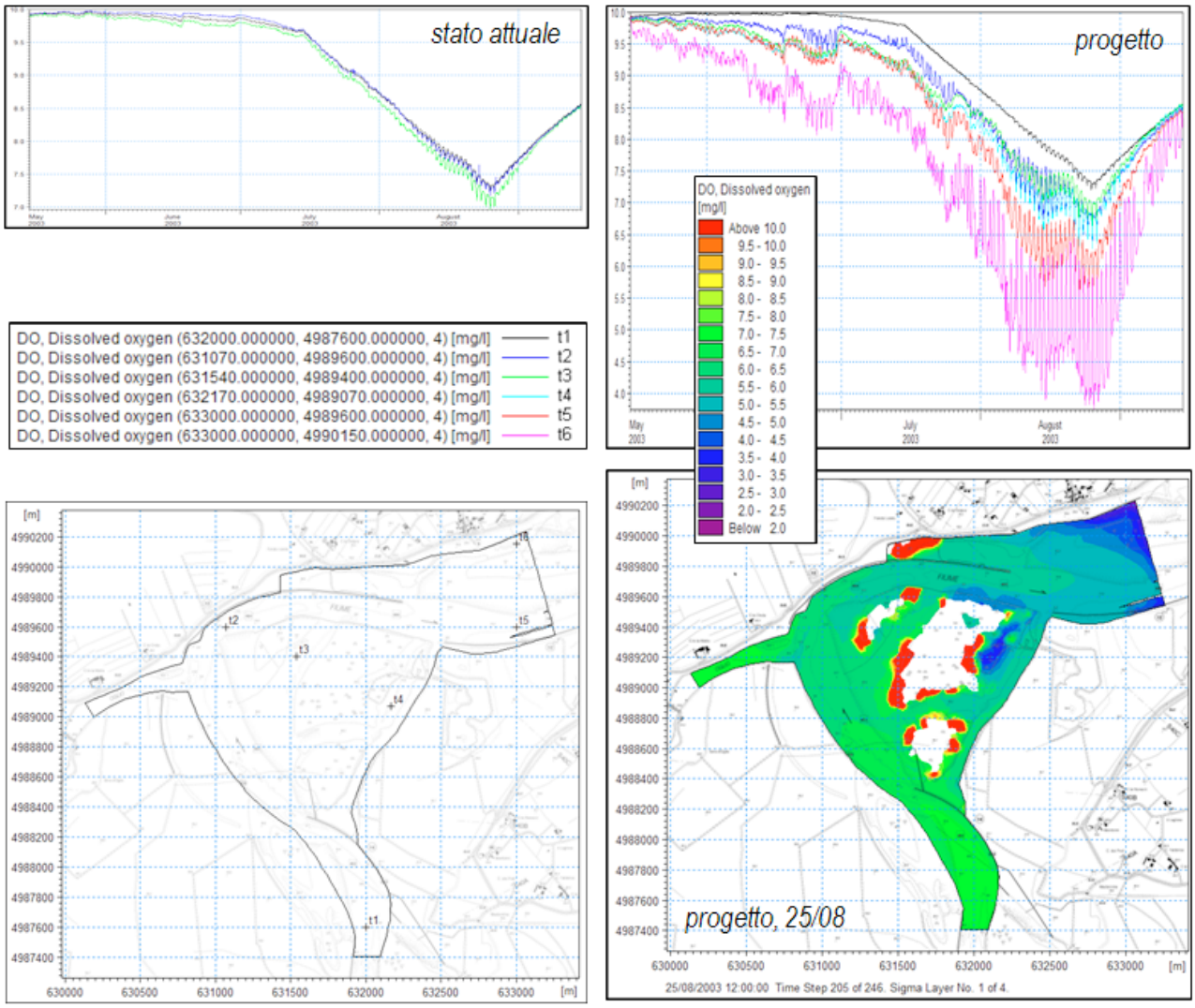


Figura 483 - Esempio di risultato del modello ecologico tridimensionale: distribuzione spaziale e andamenti temporali dell'ossigeno disciolto [mg/l] in condizioni di stato attuale e progetto

La relazione tecnica allegata analizza le variazioni riscontrate tra stato attuale e progetto per tutti i parametri indagati; di seguito si fornisce una sintesi degli elementi principali.

Occorre innanzitutto evidenziare come la complessità dei processi ecologici che il modello simula, solo in parte evidenziata dalla descrizione del calcolo dei bilanci di massa, rende particolarmente delicate e affette da incertezza le stime quantitative di alcune delle variabili ecologiche modellate.

In particolare, se per i parametri (essenzialmente fisico-chimici) per i quali è possibile procedere, in mancanza di una calibrazione effettiva del modello, almeno a un controllo dell'attendibilità dei risultati basata sull'esperienza del gruppo di lavoro, si può affermare che lo strumento è in grado di rappresentare affidabilmente il comportamento stagionale, man mano che ci si sposta verso i livelli "più elevati" delle variabili biologiche, quali ad esempio il fitoplancton, lo zooplancton, la vegetazione bentica, le stime quantitative delle concentrazioni di tali parametri risultano caratterizzate da più ampia incertezza.

Si osserva tuttavia come ci sia in ogni caso una buona rispondenza qualitativa in termini di variabilità stagionale delle concentrazioni, da cui deriva la significatività di confronti "in relativo" tra l'assetto attuale e lo scenario di intervento.

La possibilità quindi di modellare quantitativamente un'ampia gamma di variabili ecologiche ha reso possibile e particolarmente interessante l'analisi del quadro propositivo, analizzando le differenze, anche molto significative, del comportamento ecologico del sistema Po in termini di

aumento o diminuzione della tendenza all'eutrofizzazione.

In sintesi, si è osservato come, anche in queste condizioni di particolare cautela nella scelta di forzanti esterne (idrologiche) gravose per l'ecosistema, e con gli apporti di nutrienti ipotizzati (derivanti da dati di misura "storici"), la configurazione di progetto produca delle variazioni rispetto allo stato attuale generalmente limitate e sostenibili dall'ecosistema.

La concentrazione di nutrienti tende ad aumentare rispetto allo stato attuale soprattutto nel periodo di luglio e agosto, quando già i valori in ingresso risultano elevati (nel 2003 i nitrati risultavano associabili a una classe di qualità "sufficiente", il fosforo ad una classe "buona"); sia per il fosforo che per l'azoto gli incrementi simulati non sono tali da provocare un decadimento di classe, ma occorre comunque tenerne conto nel momento in cui le opere in progetto si inseriscono in una condizione di partenza di migliore qualità rispetto alla passata.

Il punto in cui si registra il maggiore incremento (presente in questo caso lungo l'intero periodo simulato, pur con valori modesti prima di luglio) è quello posto immediatamente a monte dello sbarramento, dove maggiore è il rallentamento della corrente.

Per quanto riguarda i processi trofici il sistema si mantiene lontano da condizioni che possano innescare l'insorgere di fenomeni di eutrofia; le concentrazioni di fitoplancton, zooplancton e biomassa algale oscillano su valori non dissimili da quelli di stato attuale. Il sistema è verosimilmente fosforo-limitato, visto l'andamento delle concentrazioni di nutrienti; si riscontra un maggiore incremento delle concentrazioni di Azoto disponibili nelle acque, e una crescita dei microorganismi che risulta comunque contenuta entro range sostenibili dall'ecosistema senza deviare significativamente verso condizioni a rischio di eutrofia.

Questa considerazione è maggiormente vera in considerazione della presenza di periodiche fasi di apertura degli sbarramenti contestuali alle fasi idrologiche di maggiore portata, che "azzerano" le situazioni di progressiva deviazione rispetto allo stato attuale, conseguenti alla presenza degli sbarramenti.

L'unica rilevante eccezione è costituita dall'andamento dell'ossigeno disciolto, che nell'area più prossima alla traversa, con particolare riferimento allo strato di fondo, fa osservare rilevanti diminuzioni rispetto allo stato attuale (Figura 483), con valori minimi che da circa 6,5 mg/l scendono a circa 3,0 mg/l, dato che denuncia l'insorgere di condizioni di anossia (valori di 4-5 mg/l sono tipicamente assunti come limite che consente la vita dell'ittiofauna), oltre a essere responsabile di un decadimento a "cattivo" del livello di qualità espresso dal LIMeco (con riferimento a questo singolo valore e non alla media dell'anno).

Il perdurare di condizioni critiche di questo tipo (dalle simulazioni si manterrebbero quasi per l'intero mese di agosto) potrebbe risultare causa anche di liberazione in acque di sostanze tossiche dal fondale, in presenza di significativi depositi organici che andrebbero incontro a decomposizione anaerobica.

La caratterizzazione svolta sui sedimenti attuali non ha riscontrato la presenza di contaminanti eccedenti le soglie definite dal D. Lgs.152/06; il materiale d'alveo risulta però prettamente sabbioso. In presenza di depositi anche limosi (che potrebbero sedimentare in virtù della riduzione di velocità) maggiori concentrazioni di inquinanti potrebbero essere presenti, con rischio di rilascio in acqua in presenza di fenomeni di acidificazione.

22.3 INCIDENZA DELLE PROPOSTE PROGETTUALI SULLA QUALITÀ DELLE ACQUE DI TUTTO IL TRATTO

22.3.1 Impostazione metodologica

Per l'analisi dell'intero tratto oggetto di studio si è innanzitutto proceduto all'individuazione di sottotratti omogenei che potessero consentire una definizione e rappresentazione di sintesi dei risultati attesi a un grado di dettaglio congruente con la fase progettuale (alla scala dell'asta fluviale), astraendosi dalle specificità della singola sezione.

Come prima ipotesi di suddivisione si è fatto riferimento a quelle che sono le cause di potenziale

"impatto" sulla qualità delle acque, ovvero le modificazioni idrodinamiche indotte dalle opere in progetto.

In particolare sono stati analizzati i due scenari di progetto di sistemazione a corrente libera e di regimazione, già descritti in precedenza.

Le simulazioni condotte mediante il modello numerico monodimensionale allestito a scala di asta (cfr. capitolo 5), volto alla valutazione dei principali parametri idraulico-strutturali allo stato attuale e nelle due soluzioni di progetto, hanno evidenziato come la soluzione con sistemazione a corrente libera non modifichi sostanzialmente i parametri idraulico-strutturali che caratterizzano il deflusso, per cui per l'individuazione di tratti omogenei si è fatto riferimento agli effetti indotti dalla soluzione di regimazione.

In particolare, sulla base dei risultati del modello citato, si è indagata l'entità dei sovralzi di livello attesi tra stato attuale e progetto per valori di portata caratteristici associati a due durate significative, rappresentative di condizioni di magra e di deflusso ordinario (355 e 182 giorni - Figura 484 e Figura 485).

La prima suddivisione è stata tracciata in funzione della Q355, indicativa di uno stato di magra, considerando le fasce di incremento di livello a passo 1 m rappresentate nelle figure.Tale suddivisione è stata poi adattata considerando anche criteri di tipo morfologico, le confluenze e l'estensione dei tratti.

La differenza tra le due condizioni idrologiche (ovvero l'analisi di quanto si riduce l'incremento di livello provocato dai sostegni al variare della portata) fornisce informazioni in merito alla persistenza ed entità delle perturbazioni indotte in rapporto alla naturale variabilità dei livelli del fiume.

Il tratto di indagine è stato suddiviso in 24 sottotratti omogenei, codificati con lo schema TX.n, dove X è il numero dell'opera di sostegno prevista nella soluzione di regimazione, progressivo da monte verso valle (Figura 485); per l'ultimo tratto di valle è stato assegnato il codice "6"), mentre n è un numero progressivo del sottotratto, crescente da valle verso monte (TX.1 è sempre il tratto più prossimo alla traversa).

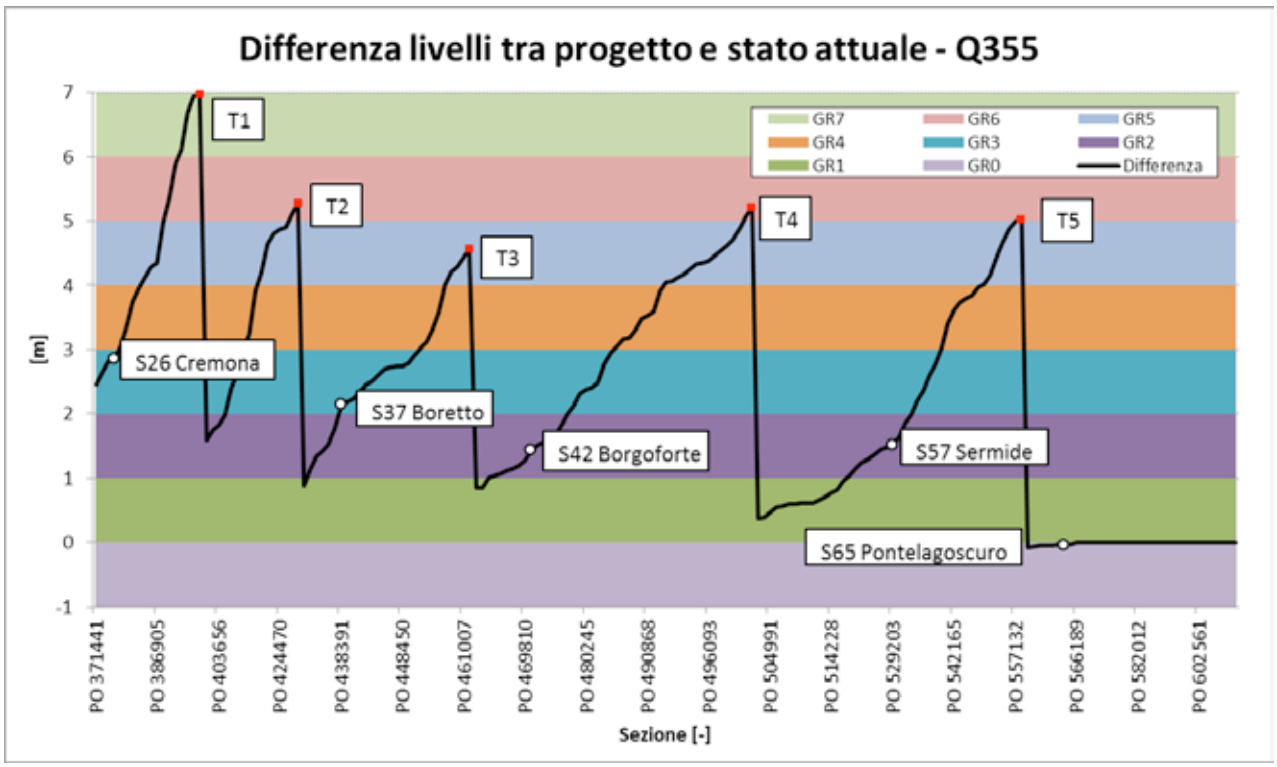


Figura 484 - Variazione dei livelli tra stato attuale e progetto (regimazione) per portata di durata 355 giorni. Sono indicate le stazioni di monitoraggio delle portate del fiume Po.

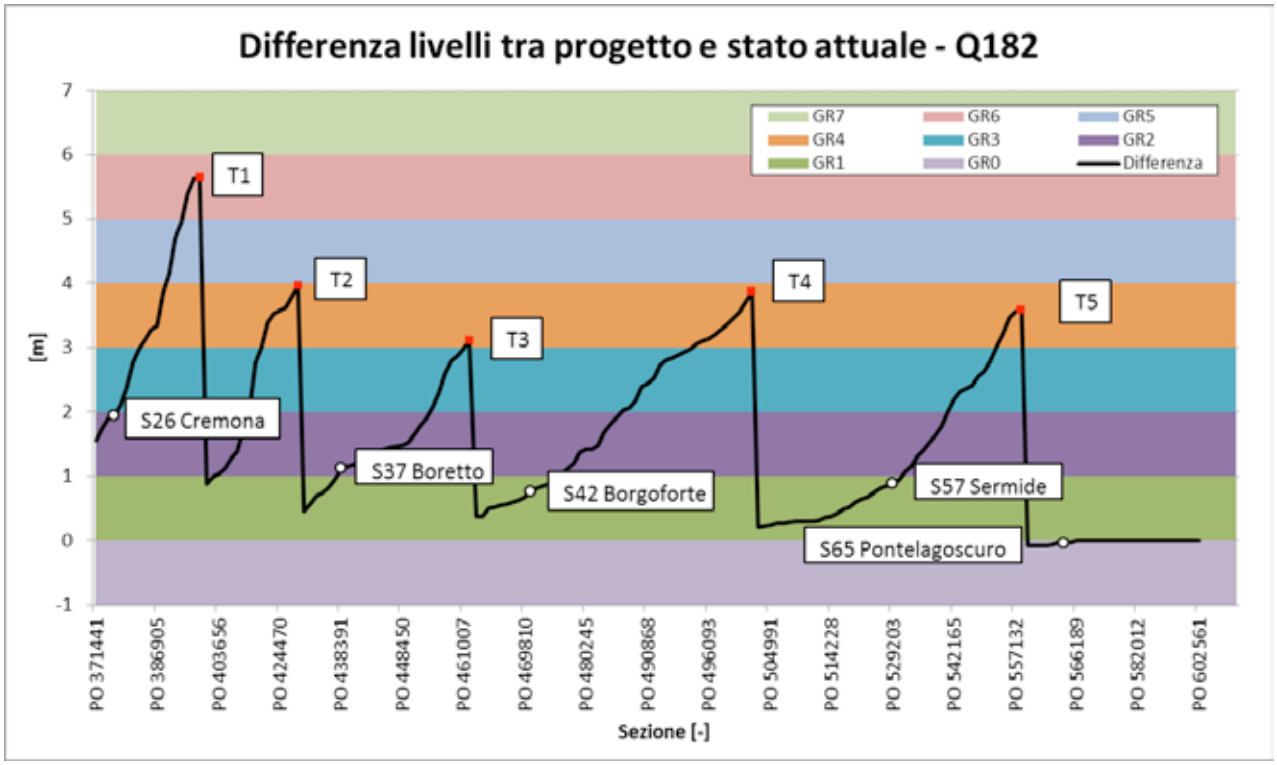


Figura 485 - Variazione dei livelli tra stato attuale e progetto (regimazione) per portata di durata 182 giorni. Sono indicate le stazioni di monitoraggio delle portate del fiume Po.

Una caratterizzazione di sintesi dei tratti individuati è presentata in Tabella 176.

MACROTRATTO	LUNGH. TRATTO [km]	N. SOTTOTRATTI OMOGENEI	LUNGH. MEDIA SOTTOTRATTI [km]
Valle Isola Serafini - Traversa 1	29,90	4	7,48
Traversa 1 – Traversa 2	26,16	3	8,72
Traversa 2 – Traversa 3	34,00	4	8,50
Traversa 3 – Traversa 4	42,20	5	8,44
Traversa 4 – Traversa 5	53,51	5	10,70
Traversa 5 – incile Po di Goro	46,80	3	15,60

Tabella 176 Caratteristiche dei tratti individuati.

La valutazione degli effetti attesi sulla qualità delle acque è stata condotta per inferenza dall'analisi delle modificazioni idrodinamiche indotte dalle opere in progetto, sulla base dei risultati ottenuti sul sito pilota.

Per la determinazione di queste modificazioni sull'intero tratto di studio si è fatto ricorso ai risultati del modello idrodinamico morfologico predisposto dal Servizio 1 del presente progetto (*Approfondimento delle analisi di trasporto solido e di sicurezza idraulica relative ai progetti di regimazione e sistemazione a corrente libera del fiume Po*).

Si tratta di un modello numerico bidimensionale a fondo mobile allestito (mediante il codice di calcolo MIKE 21C del DHI) per la verifica degli effetti morfologici indotti dalle opere in progetto sull'intero tratto in esame, suddiviso in 10 parti. È importante evidenziare come tale modello, calibrato sulla base dei dati del Programma Generale di Gestione dei Sedimenti (PGGS), non abbia finalità predittive di una configurazione morfologica "finale" di progetto, ma sia utilizzato per il confronto relativo di scenari.

I dati acquisiti sono relativi alla configurazione del modello con simulazioni condotte su un periodo

di riferimento di 2 anni (03/07/2007-03/07/2009), caratterizzato da un primo anno di deflussi relativamente stabili e da un secondo anno più "vivace", con diversi eventi di intensità tale da incidere sull'evoluzione morfologica del corso d'acqua. Nella soluzione di regimazione l'apertura delle traverse è attuata per portate superiori ai 1200 m3/s.

Per tutto il tratto di studio sono state quindi acquisite dal Servizio 1 le mappe di distribuzione delle altezze d'acqua e velocità di flusso derivanti dal modello, nelle tre condizioni di stato attuale, regimazione e sistemazione a corrente libera.

Sono stati considerati 2 istanti temporali della simulazione:

- il primo nel periodo iniziale, con portata di magra (circa corrispondente alla Q355);
- il secondo dopo circa un anno di simulazione dal primo, con portata prossima alla Q182.

Si evidenzia come, trattandosi di un modello morfologico, la batimetria dell'alveo inciso subisca delle modificazioni nel tempo anche piuttosto rilevanti, che variano tra le tre configurazioni di stato attuale e progetto. Mentre per la Q355 è possibile assumere una sostanziale equivalenza del fondo alveo, non essendo ancora intercorsi rilevanti eventi, i fondali dei diversi scenari con la Q182 sono differenti, per cui l'analisi eseguita tiene anche implicitamente conto delle modificazioni indotte a livello morfologico.

Per ciascun sottotratto sono state condotte analisi di tipo statistico, sia per la Q355 che per la Q182, per fornire descrizioni sintetiche della distribuzione dei parametri idraulico-strutturali e della variazione di quest'ultima nello scenario di progetto.

Le medesime analisi sono state condotte per il tratto oggetto di analisi modellistica di dettaglio per il sito pilota, in modo da individuare i parametri di riferimento sulla base dei quali estrapolare i risultati ottenuti dal modello idrodinamico-ecologico per valutare il potenziale impatto atteso per ciascun sottotratto.

In funzione dei parametri analizzati sono stati quindi definiti degli **indicatori in grado di oggettivare il grado di impatto atteso** per ogni tratto esaminato. Tali indicatori sono descritti in dettaglio nel capitolo seguente, e riguardano in sintesi i seguenti elementi:

- percentuale di aree caratterizzate da condizioni di deflusso a bassissima energia (fortemente rigurgitate);
- percentuale di aree caratterizzate da altezze d'acqua relativamente modeste (inferiori a 1 m), rappresentative di habitat marginali nell'area fluviale del Po (correnti a bassa profondità, lanche, aree laterali), di pregio in quanto maggiormente idonee per la vita dei pesci giovani e di piccola taglia, degli anfibi, delle comunità macrobentoniche e per lo stazionamento dell'avifauna;
- differenziazione nel tratto dei valori del numero di Froude e quindi, in senso lato, dei diversi habitat o condizioni idrodinamiche di riferimento;
- persistenza nel tempo degli effetti prodotti (da confronto tra la Q355 e la Q182);
- indice di "gradimento" da parte dell'ittiofauna, considerando schematicamente le curve di idoneità per l'ittiofauna di una specie target rappresentativa in analogia con quanto tipicamente effettuato in attività di analisi dei microhabitat fluviali.

Le analisi sono state condotte per entrambi gli scenari di progetto in tutti i sottotratti. I risultati ottenuti sono però presentati solo per la configurazione di progetto maggiormente significativa, in quanto:

- per i primi cinque macrotratti (cfr.Tabella 176), la sistemazione a corrente libera produce risultati sostanzialmente identici a quelli di stato attuale dal punto di vista dell'idrodinamica, per cui il confronto è stato condotto con riferimento alla sola condizione di regimazione;
- per il tratto terminale compreso tra l'ultima traversa (Stienta, tratto T5.1) e l'incile del Po di Goro (tratto T6.1) si presenta invece il confronto con la sola configurazione di progetto corrispondente alla sistemazione a corrente libera, in quanto la soluzione di regimazione non prevede variazioni in questo tratto rispetto allo stato attuale.

22.3.2 Analisi di incidenza per sotto-tratti omogenei

Per l'acquisizione dei dati idrodinamici di interesse per l'intero tratto oggetto di studio dal modello morfologico predisposto dal Servizio 1 sono stati individuati due "istanti" di simulazione significativi, caratterizzati da portate prossime a quelle di durata caratteristica di interesse (circa 355 e 182 giorni, cfr. capitolo 5), in periodi di buona stabilità dei deflussi per evitare il più possibile la presenza di effetti transitori.

La Figura 486 rappresenta l'andamento dell'idrogramma in input al modello morfologico (per la sezione di Cremona, a titolo di esempio). La serie è stata costruita a partire dai dati di misura delle diverse stazioni esistenti nel periodo 03.07.2007-03.07.2009, eliminando le portate inferiori a 500 m³/s in quanto non significative per la movimentazione di materiale; le date fittizie di simulazione sono 15.10.2006-18.07.2008.

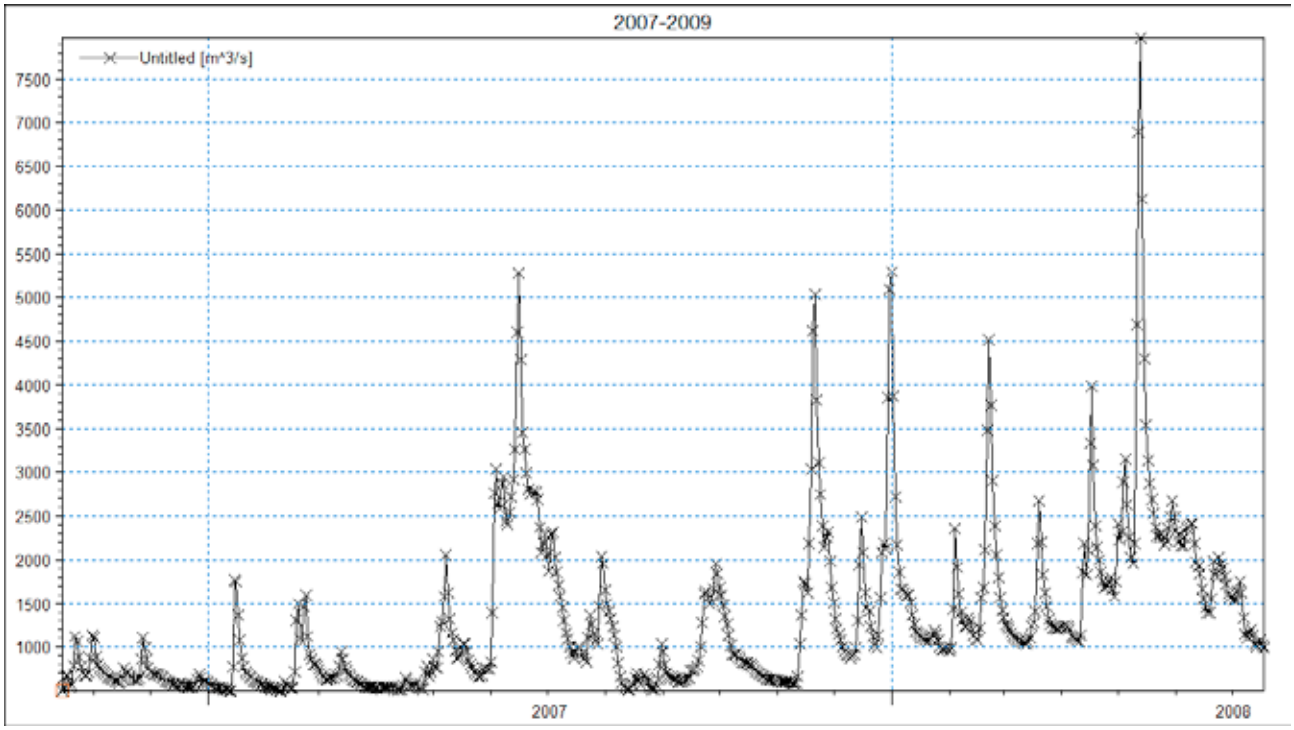


Figura 486 - Serie delle portate utilizzata nel modello morfologico (sezione di Cremona).

I due "istanti" (ovvero giorni, in relazione al passo temporale della simulazione) considerati per il confronto dei parametri idrodinamici sono i seguenti:

- 10.04.2007 (step 177), corrispondente a una portata di circa 500 m³/s a Cremona e 700 m³/s a Borgoforte, assimilabile a una durata di 355 giorni e riferita nel seguito come condizione "Q355";
- 12.03.2008 (step 514), corrispondente a una portata di circa 1000 m³/s a Cremona e 1300 m³/s a Borgoforte, assimilabile a una durata di 182 giorni e riferita nel seguito come condizione "Q182".

I dati acquisiti per tali istanti corrispondono ai parametri idraulico-strutturali, che definiscono le caratteristiche del deflusso e degli habitat acquatici nei vari sottotratti: area bagnata, livelli idrici, velocità di corrente sulle singole celle del modello. In Figura 487 e Figura 488 si riportano due esempi di restituzione dei dati acquisiti, in forma di griglia spaziale curvilinea con dati definiti per ciascuna cella.

Per ciascun sottotratto sono state selezionate le celle corrispondenti e condotte analisi di tipo statistico, sia per la Q355 che per la Q182, per fornire descrizioni sintetiche della distribuzione dei parametri e della variazione di quest'ultima nello scenario di progetto.

I parametri analizzati sono innanzitutto quelli base acquisiti, ovvero altezze d'acqua e velocità della corrente, oltre a dati correlati quali l'estensione delle superfici bagnate e il volume idrico complessivo del tratto.

Un parametro derivato dalla combinazione di livello e velocità è il numero di Froude, rapporto tra le forze di inerzia e quelle gravitazionali, che definisce il "livello di energia" della corrente.

Esso è stato posto in relazione da diversi autori con le caratteristiche di habitat fluviale prevalente che la corrente in quel tratto è in grado di esprimere. A titolo indicativo (Jowett, 1993), si può ritenere che per consentire la presenza di significative componenti di "pool" (in generale di zone idonee per il rifugio dei pesci) il deflusso debba avvenire con numeri di Froude Fr<0,18. Viceversa, per sviluppare condizioni di deflusso prevalentemente riferibili allo stato "riffle" va fatto riferimento (Jowett, 1993) a numeri di Froude Fr>0,42 (condizione non riscontrabile sul Po nel tratto in esame). Valori intermedi sono associabili ad una condizione di "run", idonea come habitat per la ricerca di nutrimento.

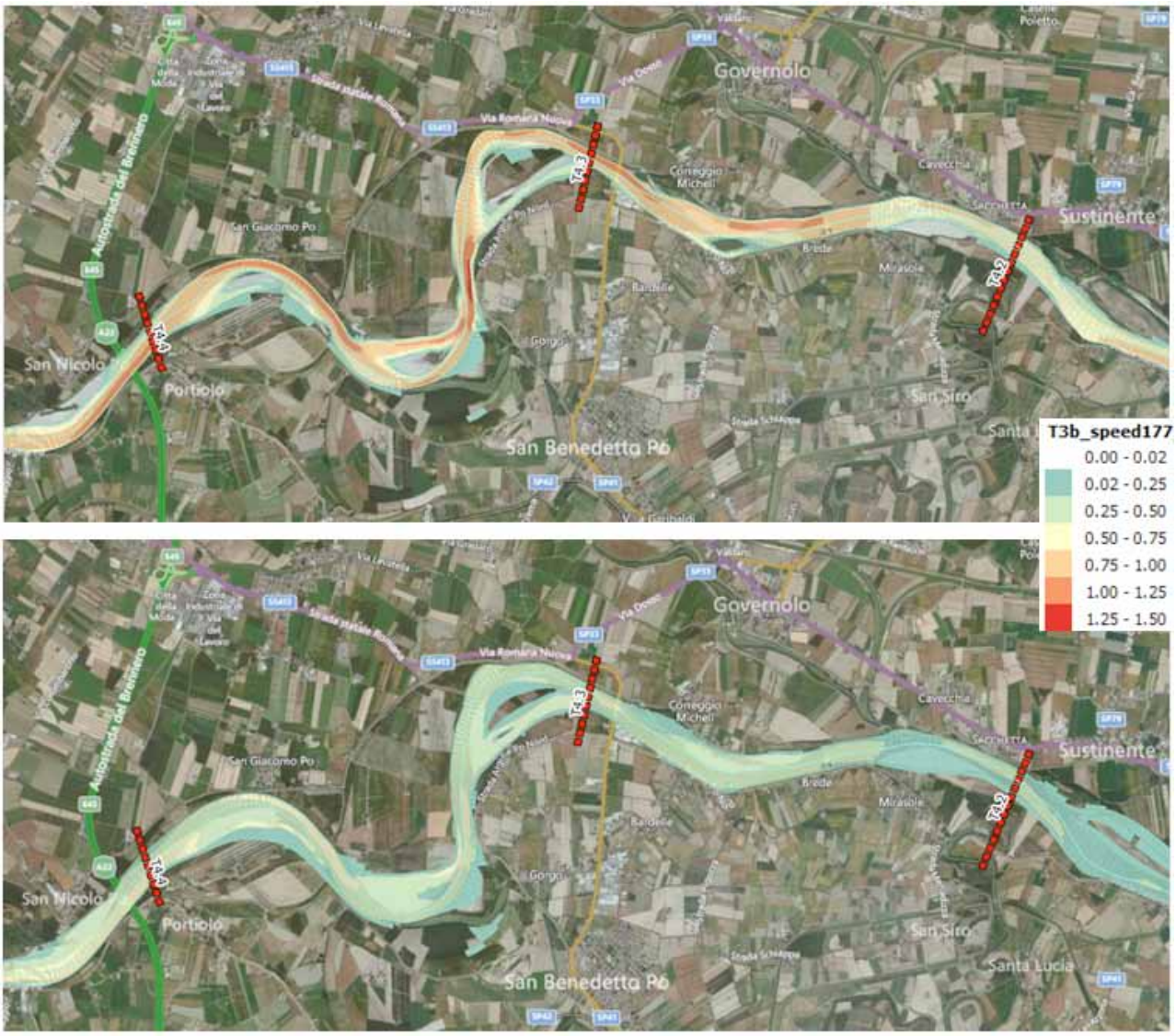


Figura 487 - Esempio della distribuzione di velocità tra stato attuale (sopra) e progetto-regimazione (sotto) estratta dal modello morfologico del Servizio 1, sovrapposta alla delimitazione dei tratti omogenei

L'**analisi statistica** ha riguardato, per ogni sottotratto, la determinazione di media, deviazione standard e indice di Simpson della distribuzione di ognuno dei tre parametri sopracitati (livello, velocità, numero di Froude) sia allo stato attuale che di progetto e la corrispondente variazione percentuale tra lo stato attuale e quello di progetto.

Inoltre è stata analizzata la distribuzione dei parametri rispetto a classi fisse di valori, come rappresentato in Figura 489, per una visualizzazione immediata delle modificazioni indotte dalle opere in progetto sulle caratteristiche idrodinamiche del tratto (con un dettaglio maggiore rispetto a quello desumibile dalla sola analisi di singoli valori di riferimento –medie, ecc.– per ciascun tratto).



Figura 488 - Esempio della distribuzione di altezze d'acqua tra stato attuale (sopra) e progetto-regimazione (sotto) estratta dal modello morfologico del Servizio 1, sovrapposta alla delimitazione dei tratti omogenei.

L'indice di Simpson è un indice statistico di diversità utilizzato per l'analisi della diversità di habitat presenti nel tratto, elemento di pregio dal punto di vista biologico-ambientale in quanto si rifletta anche in una maggiore biodiversità e migliore idoneità per la vita delle biocenosi.

Definita la probabilità che un elemento del campione preso a caso appartenga ad una classe omogenea i (range di valori di un parametro idraulico strutturale, tipo di substrato, specie biologica, cc.) come $p_i = N_i/N$, con N numero totale degli elementi e Ni numero degli elementi della classe i (i=1,2,…S), un indice di diversità è una funzione H(pi) che assume valore massimo se le classi sono equidistribuite (massima eterogeneità).

L'indice di Simpson ha il vantaggio di una semplice interpretazione intuitiva. Simpson (1949) definì un indice di diversità come la probabilità che due organismi presi a caso in una certa comunità non siano della stessa specie. In formula:

$$H_{SI} = 1 - \sum_{i=1}^{S} p_i^2$$

essendo p_i^2 la probabilità di scegliere a caso due organismi della stessa classe i, e $\sum_{i=1}^{S} p_i^2$ la probabilità di scegliere a caso due organismi della stessa classe, una qualsiasi tra le disponibili. L'indice di Simpson risulta pertanto sempre compreso tra 0 e 1.

Parametri idraulico-strutturali: statistica distribuzione **attuale**			
parametro	Profondità [m]	Velocità [m/s]	Froude [-]
Media	2,32	0,66	0,14
σ	1,36	0,32	0,05
Indice di Simpson	0,72	0,67	0,80
Parametri idraulico-strutturali: statistica distribuzione ***progetto***			
parametro	Profondità [m]	Velocità [m/s]	Froude [-]
Media	6,18	0,21	0,03
σ	2,91	0,10	0,01
Indice di Simpson	0,66	0,65	0,00

Geometria	Q355 attuale	Q355 progetto	Q182 attuale	Q182 progetto
Area bagnata [km²]	1,707	2,809	5,125	5,381

Variazioni percentuali				
percentuali progetto - stato attuale	media		σ	
	Q355	Q182	Q355	Q182
Δ% su velocità	-67,89%	-52,59%	-70,42%	-58,81%
Δ% su livelli	166,20%	96,66%	114,09%	67,43%
Δ% su Froude	-80,41%	-64,33%	-81,18%	-68,54%
Δ% su Simpson (Fr)	-100,00%	-34,02%		

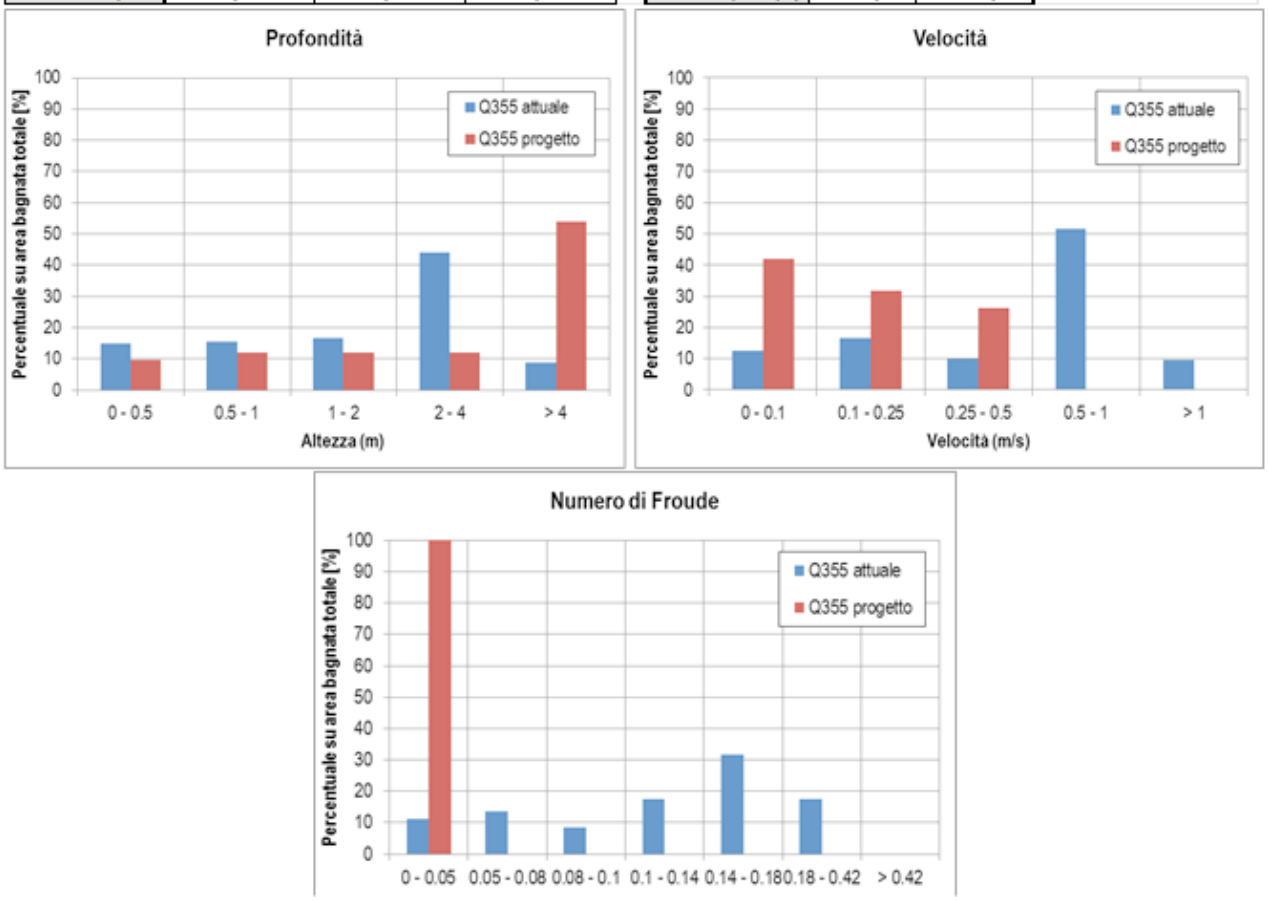


Figura 489 - Esempio di analisi statistica effettuata sul tratto T1.1.

L'analisi statistica è stata condotta anche sul sito pilota, utilizzando i parametri idrodinamici forniti dal modello 3D descritto in precedenza (v. Figura 490, a titolo di esempio), scomponendone il dominio in due aree (individuate in Figura 491) rappresentative della zona in cui si sono riscontrati gli effetti negativi più pronunciati in termini di fenomeni di anossia sul fondo (colonna destra in figura, area a ridosso dello sbarramento) e del tratto più a monte, in cui i valori si discostano meno dalle condizioni di stato attuale (cfr. capitolo 8.2 per maggiori dettagli).

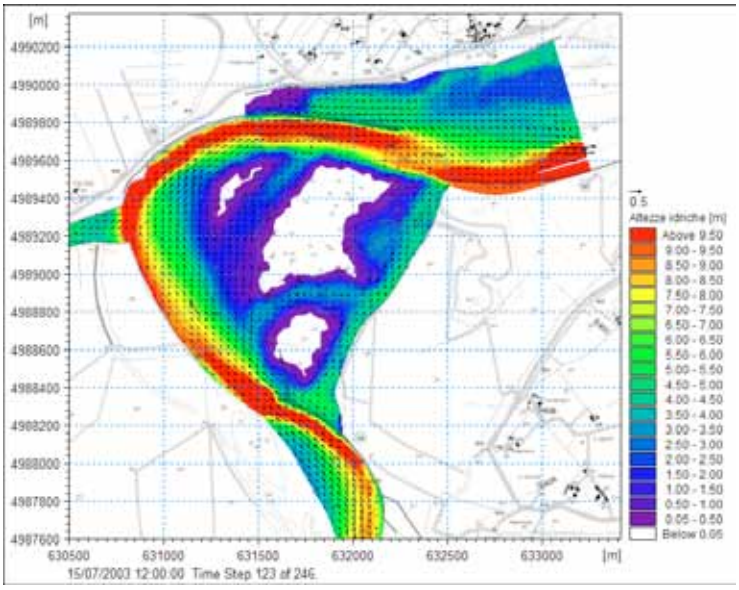


Figura 490 - Output del modello idrodinamico: scenario di progetto - mappa delle altezze idriche e distribuzione dei vettori velocità nel periodo di portata minima.

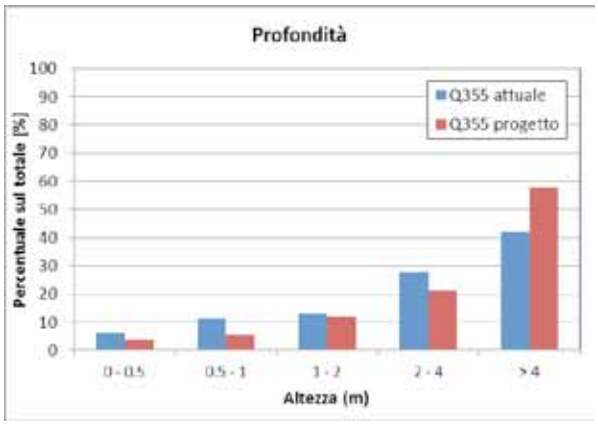
Dall'analisi dei risultati del modello sul sito pilota si è valutato come importante indicatore di potenzialità di decadimento della qualità delle acque (in particolare per rischio di rilevante riduzione della concentrazione di ossigeno disciolto) la presenza preponderante di aree caratterizzate da Fr molto bassi (Fr < 0,08) con netto incremento di queste ultime rispetto allo stato attuale. Per tale ragione l'analisi di distribuzione di questo parametro, oltre ai valori sopra indicati, ha tenuto conto anche di questa classe inferiore, corrispondente a acque quasi ferme con bassissima energia.

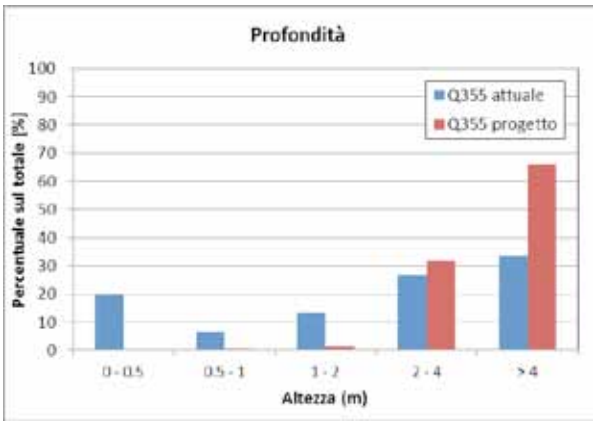
In considerazione di questi risultati la distribuzione in classi del numero di Froude, correlabile come già detto a tipologie di mesohabitat differenti, è stata condotta con riferimento ai valori soglia caratterizzanti questi ultimi, rappresentati anche in un grafico a torta in termini di percentuale sull'area complessiva:

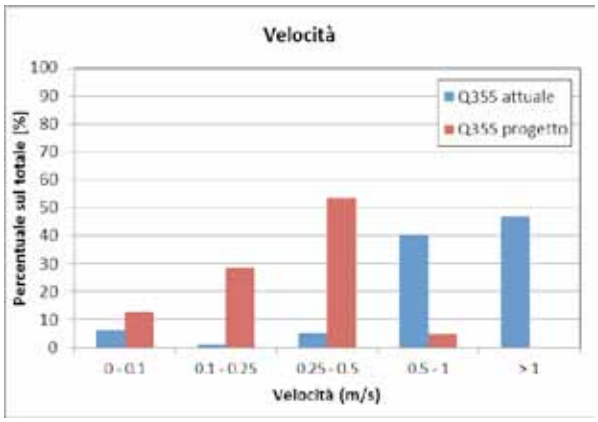
- *pool* caratterizzate da Fr < 0,08;
- *pool* caratterizzate da Fr >0,08;
- *run* (Fr 0,18÷0,42);
- *riffle* (Fr > 0,42, condizione non riscontrabile in questo tratto di Po).

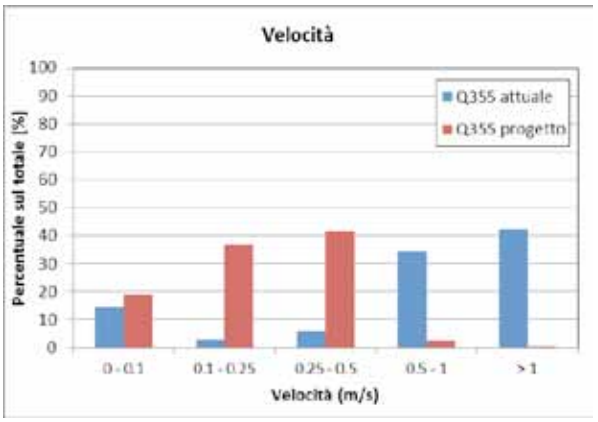


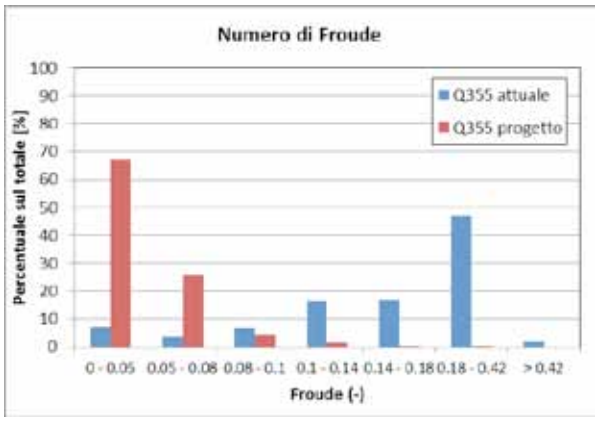












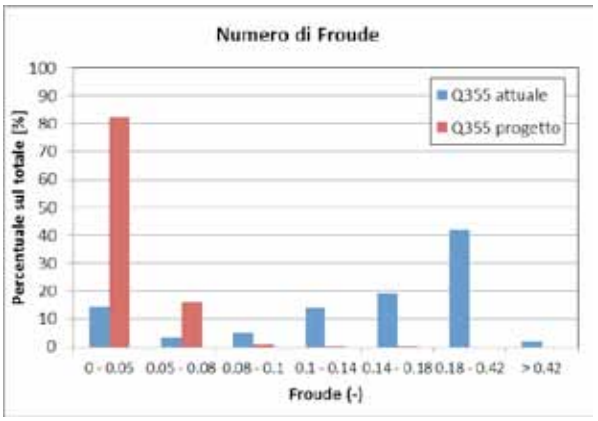


Figura 491 - Distribuzione in classi dei parametri idraulico-strutturali per il sito pilota.

Si è voluto inoltre includere nelle analisi anche un elemento più direttamente correlato agli aspetti biologici, secondo una metodologia di analisi affine a quella dei microhabitat fluviali, secondo la quale si effettua una stima dell'idoneità del tratto per la vita di una o più specie ittiche di riferimento

(specie bersaglio) che vengono assunte a rappresentare l'intero sistema biologico del corso d'acqua, basandosi sull'assunzione che la qualità e la diversificazione degli habitat acquatici siano valutabili, in funzione della portata defluente, anche in base a questi parametri correlati allo stato morfologico ed idraulico del corso d'acqua.

La disponibilità di habitat viene espressa mediante la quantità ADP [m2], "Area Disponibile Ponderata", che rappresenta la quota parte della superficie totale occupata dall'acqua utile per la sopravvivenza della specie bersaglio.

Essa è calcolata moltiplicando ogni unità di area per un coefficiente compreso tra 0 e 1 che esprime il "gradimento" della specie bersaglio per le condizioni idrodinamiche in tale punto ("curve di idoneità" o "di preferenza", relative alla profondità dell'acqua, alla velocità e alla tipologia di substrato); la somma di tali valori fornisce quindi un'area equivalente di gradimento da parte della specie (e dello specifico stadio vitale: giovani, adulti, ecc.). Il parametro può essere anche espresso come valore percentuale ADP% rispetto all'area bagnata complessiva (che varia con la portata).

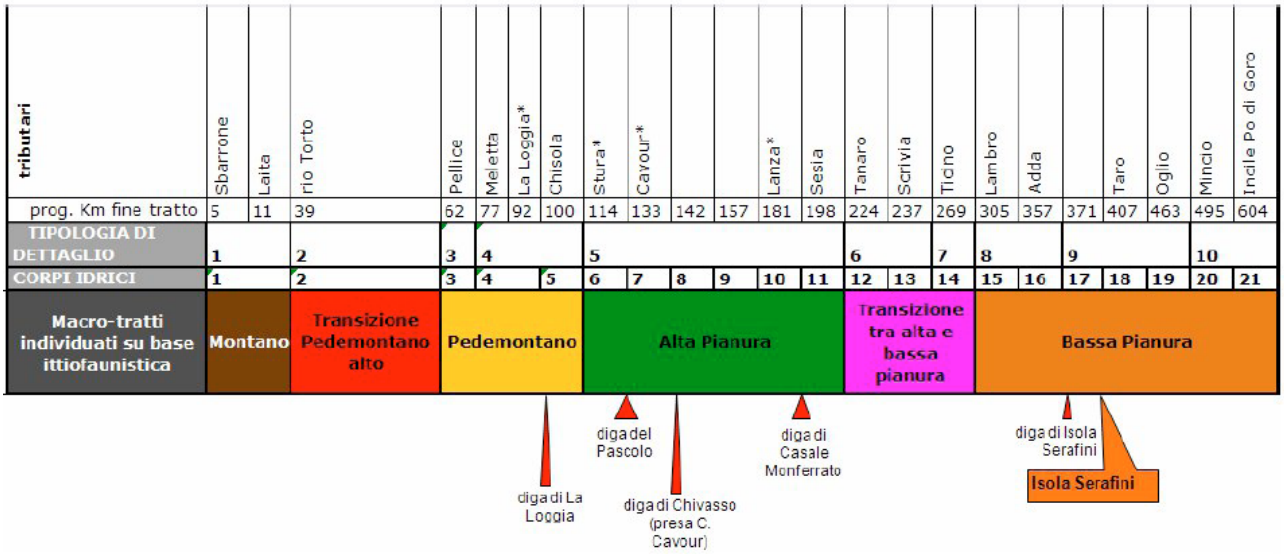
La relazione portata/habitat è influenzata in modo sostanziale dalla forma delle curve di preferenza delle specie (Orth e Maughan, 1982; Bovee, 1986); può spesso capitare che, in funzione della curva utilizzata, i risultati dell'habitat non siano fra loro coerenti e quindi difficili da interpretare per ricavarne un valore di portata. È quindi fondamentale scegliere in modo oculato la specie o le specie da utilizzare, innanzi tutto assumendo che esse fungeranno da indicatori dell'ecosistema nel suo complesso (Bovee, 1982): ciò significa che tramite la tutela di tali specie si assume di tutelare l'intero ecosistema acquatico (comunità ittica, macrobentonica, vegetale). È inoltre chiaro, a valle di numerosi studi a livello internazionale, come non esistano curve di preferenza "universali" (Heggens, 1988), cui consegue la necessità di svilupparne di sito-specifiche o comunque riferite a tipologie analoghe di corpi idrici.

Nel caso in esame non si vuole effettuare una completa applicazione di questa metodologia, sia perché l'analisi idrodinamica disponibile può risultare non sufficientemente rappresentativa per questa finalità, in relazione alla dimensione delle celle e agli scenari indagati, sia per la complessità nell'individuare effettive specie bersaglio adatte ai vari tratti (ed in particolare reperire da studi pregressi affidabili curve di idoneità per tali specie).

Facendo riferimento alla Carta Ittica del fiume Po (cfr. Figura 492), l'intero tratto di studio è incluso nel tratto di "bassa pianura" in cui "le dimensioni raggiunte dal corso d'acqua, la morfologia, le acque profonde, più calde e lente, il percorso sinuoso costellato da lanche e rami abbandonati, la vicinanza e connessione con il mare hanno determinato lo stabilirsi di una comunità ittica in cui dominano le specie eurialine e si fanno numerose le specie migratrici, tra cui gli storioni, la cheppia, la passera di mare e il cefalo".

Le specie "ordinarie" indicate in figura rappresentano quelle che, per loro caratteristiche ecologiche e distribuzione, devono essere rinvenute nel tratto in esame in assenza di consistenti alterazioni antropiche dell'habitat o della comunità biotica.

Rimandando a future fasi progettuali approfondimenti di maggior dettaglio in merito all'effettiva incidenza a livello di specie delle singole opere in progetto (anche in relazione ai passaggi di risalita previsti, e tenendo conto di come per portate ancora prossime a quelle di regime ordinario gli sbarramenti verrebbero aperti, annullando sostanzialmente il loro effetto), nel presente studio, a scala di tratto complessivo, si è voluto inserire un indicatore di riferimento che consentisse una stima in relativo tra stato attuale e progetto in termini di idoneità di habitat, così da evidenziare un eventuale possibile fattore di impatto meritevole o meno di ulteriori studi.



Tratto di bassa pianura	Specie ordinaria	alborella	*Alburnus alburnus alborella*
	Specie ordinaria	anguilla	*Anguilla anguilla*
	Specie ordinaria	barbo comune	*Barbus plebejus*
	Specie ordinaria	carpa	*Cyprinus carpio*
	Specie ordinaria	cavedano	*Leuciscus cephalus*
	Specie ordinaria	cefalo calamita	*Liza ramada*
	Specie ordinaria	cheppia o alosa	*Alosa fallax*
	Specie ordinaria	cobite comune	*Cobitis taenia bilineata*
	Specie ordinaria	ghiozzo padano	*Padogobius martensii*
	Specie ordinaria	gobione	*Gobio gobio*
	Specie ordinaria	lampreda di mare	*Petromyzon marinus*
	Specie ordinaria	luccio	*Esox lucius*
	Specie ordinaria	pesce persico	*Perca fluviatilis*
	Specie ordinaria	scardola	*Scardinius erythrophthalmus*
	Specie ordinaria	spinarello	*Gasterosteus aculeatus*
	Specie ordinaria	storione cobice	*Acipenser naccarii*
	Specie ordinaria	tinca	*Tinca tinca*
	Specie ordinaria	triotto	*Rutilus erythrophthalmus*
	Specie straordinaria	cagnetta	*Salaria fluviatilis*
	Specie straordinaria	lasca	*Chondrostoma genei*
	Specie straordinaria	pigo	*Rutilus pigus*
	Specie straordinaria	sanguinerola	*Phoxinus phoxinus*
	Specie straordinaria	savetta	*Chondrostoma soetta*

Figura 492 - Zonazione ittica del Po e elenco specie per il tratto in esame (da Carta Ittica del fiume Po).

Si è pertanto fatto riferimento ad una specie target che mostrasse una buona adattabilità alla vita in condizioni idrodinamiche anche piuttosto differenziate tra loro, così da disporre di un indicatore comune indipendentemente dalle caratteristiche del singolo sottotratto, e che fosse caratterizzata da un buon gradimento del substrato sabbioso, identificato come prevalente dalle analisi condotte in sito.

Considerate tali caratteristiche si è individuata come specie target il cavedano, peraltro sempre presente come specie ordinaria anche nelle zone ittiche di monte del fiume, escluso il solo tratto montano.

Sono state utilizzate curve di idoneità determinate sperimentalmente sul fiume Po, in prossimità della confluenza del fiume Tanaro (tratto di transizione tra alta e bassa pianura), con condizioni confrontabili con quelle del tratto indagato, rappresentate in Figura 493. La tipologia di substrato è individuata da un codice identificativo: 1 – terreno vegetale; 2 – argilla; 3 – fango; 4 – sabbia; 5 –

ghiaia; 6 – ciottoli; 7 – massi; 8 – roccia. Per le applicazioni del presente studio è stato considerato un unico tipo di substrato, quello sabbioso.

L'**indice di idoneità per l'ittiofauna** definito per ciascun sottotratto è stato quindi determinato calcolando l'ADP relativa ai valori di velocità e altezza d'acqua estratti dal modello morfologico, per tutte le celle incluse nel tratto, con riferimento alle curve definite per individui giovani e adulti.

Nel caso specifico e per le finalità del confronto le due curve sono da intendersi rappresentative di individui di piccola taglia e di grossa taglia, che gradiscono habitat di differente tipologia, in particolare per quanto riguarda le altezze d'acqua.

Il calcolo dell'indice è stato effettuato sia per la Q355 che per la Q182, nelle condizioni di stato attuale e di progetto, valutandone la differenza percentuale sull'ADP effettiva (espressa in km2 di area disponibile). Si consideri che generalmente nella condizione di progetto (regimazione) l'area bagnata totale è maggiore, per effetto dei livelli idrici più elevati, per cui a parità di area disponibile l'ADP% può risultare inferiore.

Le analisi di caratterizzazione dell'**entità degli effetti** delle opere in progetto sono presentate con riferimento a quanto osservato per la **Q355**, condizione che rappresenta una condizione di magra gravosa e per la quale ci si attende una maggiore influenza degli interventi sulle condizioni idrodinamiche e sulle caratteristiche qualitative del corso d'acqua.

Le analisi svolte sulla portata **Q182** sono invece finalizzate a indagare la **persistenza degli scostamenti** osservati, con riferimento a indici di persistenza che rappresentano il rapporto tra gli scostamenti attuale-progetto determinati per le due portate: se tale rapporto è prossimo o superiore a 1 le condizioni non variano molto tra portate di magra e di regime ordinario, per cui l'incidenza delle opere è maggiore in quanto permane immutata per un lungo periodo dell'anno. In caso contrario invece le modificazioni indotte sono limitate ai periodi di minor portata, per cui l'incidenza complessiva sull'ambiente fluviale è da ritenersi minore.

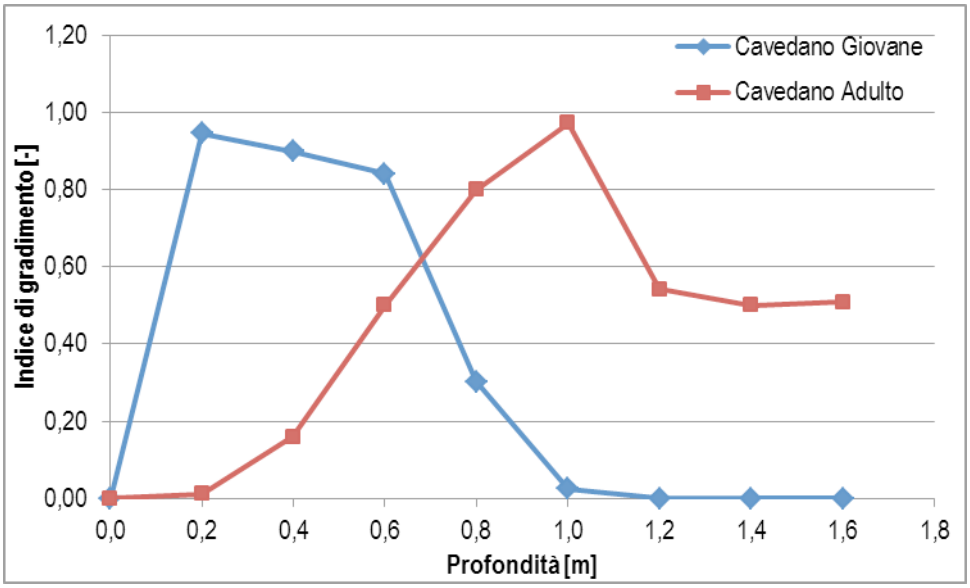
In particolare, gli indici di persistenza individuati sono cinque, di cui quattro relativi a parametri idrodinamici e uno, IPIH, relativo alla tipologia di habitat.

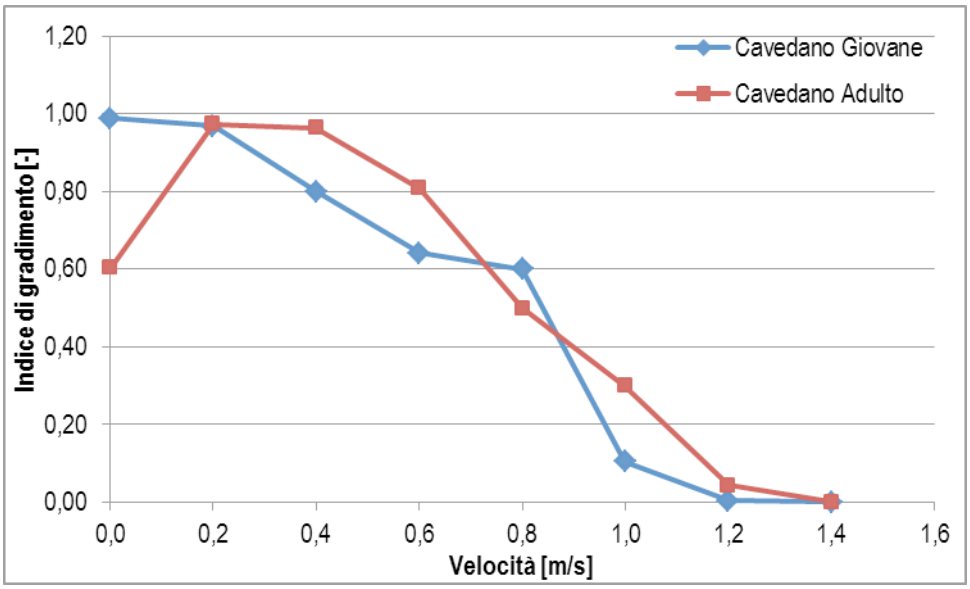
- **IPI1** definito come il rapporto tra lo scostamento, tra la condizione attuale e lo stato di progetto, del valor medio calcolato in riferimento alla Q182 e il medesimo scostamento ottenuto in riferimento alla Q355. L'indice viene calcolato in funzione del parametro (tra livello, velocità e numero di Froude) che presenta il massimo scostamento in valore assoluto tra la condizione attuale e quella di progetto in presenza della Q355.
- Lo scostamento medio tra la condizione di progetto e quella attuale per il singolo parametro X è definito come:
- Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. [-]

dove μ è il valor medio del parametro X.

Per il parametro che in riferimento alla Q355 presenta il massimo scostamento in valore assoluto si calcola quindi l'indice di persistenza come:

Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. [-]





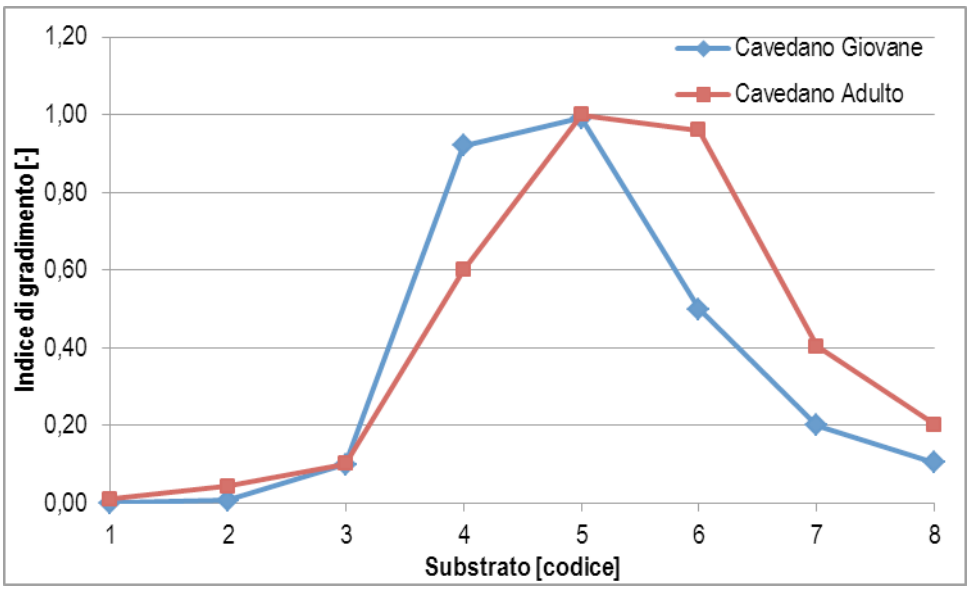


Figura 493 - Curve di idoneità per il cavedano.

- **IPI2** definito con modalità analoga a quella dell'indice IPI1, ma calcolando lo scostamento in riferimento alla deviazione standard del singolo parametro.
- Lo scostamento della deviazione standard tra la condizione di progetto e quella attuale per il singolo parametro X è definito come:
- Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. [-]
- dove - è la deviazione standard del parametro X.
- Per il parametro che in riferimento alla Q355 presenta il massimo scostamento in valore assoluto si calcola l'indice di persistenza:
- Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. [-]

- **IPI3** definito con modalità analoga a quella degli indici precedenti, ma calcolando lo scostamento in riferimento all'indice di Simpson del numero di Froude.
- Lo scostamento dell'indice di Simpson S tra la condizione di progetto e quella attuale è definito come:
- Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. [-].
- L'indice di persistenza è calcolato come:
- Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. [-].
- **IPIM** definito come il massimo tra gli indici idrodinamici:
- Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. [-].
- **IPIH** indice di habitat dato dalla media del rapporto tra l'Area Disponibile Ponderata [km2] nella situazione attuale e in quella di progetto, calcolate in riferimento alla Q182 e alla Q355 per il cavedano (specie target) giovane e adulto.

Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. [-].

L'analisi svolta, effettuata con determinazione dei parametri sopra descritti, è stata finalizzata a definire per ciascun tratto omogeneo un **indice di impatto complessivo**, ovvero un punteggio (variabile tra 0 e 100) che permette di individuare in quali tratti ci si attende una maggiore incidenza sul comparto della qualità delle acque superficiali da parte delle opere in progetto.

Il valore dell'indice NON è stato direttamente correlato a un giudizio di qualità ambientale, ma è indicativo della maggiore o minore necessità di prevedere misure mitigative o indagini di approfondimento nei diversi tratti considerati.

L'indice viene definito come somma dei punteggi assegnati a cinque indicatori di impatto, di seguito descritti sinteticamente.

- **IFRD**: definito come la percentuale sul totale delle aree caratterizzate da un numero di Froude inferiore a 0,08 (rappresentative di corrente a bassissima energia e indicative, come già descritto, di potenziali criticità per la qualità fisico-chimica delle acque) nella situazione di progetto. Il punteggio assegnato varia da 0 (impatto nullo) a 30 (impatto massimo); il punteggio è però sempre pari a 0 se lo scostamento tra progetto e stato attuale (in termini di area) è inferiore al 20% (ovvero se il tratto è contraddistinto da condizioni idrodinamiche simili già allo stato attuale).
- Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo.[%]
- **ILVL**: espresso in percentuale, è definito come il complementare a 1 del rapporto tra la somma delle aree caratterizzate da altezze d'acqua inferiori a 1 m nella situazione di progetto e la medesima sommatoria nella condizione attuale. Il punteggio assegnato varia da -5 (miglioramento rispetto alla condizione attuale) a 20 (impatto massimo). Tali aree sono rappresentative di habitat marginali nell'area fluviale del Po (correnti a bassa profondità, lanche, aree laterali), di pregio in

quanto maggiormente idonee per la vita dei pesci giovani e di piccola taglia, degli anfibi, delle comunità macrobentoniche e per lo stazionamento dell'avifauna. Un ampliamento di tali aree può risultare un effetto positivo delle opere in progetto, mentre al contrario una banalizzazione dell'alveo con innalzamento di tutti i livelli provoca la perdita di queste aree di maggior pregio per la biodiversità.

- Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. [%]

- **ISMP**: definito come la variazione, espressa in percentuale, dell'indice di Simpson della distribuzione del numero di Froude tra la situazione attuale e la condizione di progetto calcolato in relazione alla Q355. Il punteggio assegnato varia da -5 (miglioramento rispetto alla condizione attuale) a 20 (impatto massimo).

- Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo.[%]

- **IPIM**: indice di persistenza idrodinamico massimo. É calcolato come il massimo tra gli indici di persistenza idrodinamici (IPI1, IPI2 e IPI3) definiti sulla base del rapporto tra gli scostamenti attuale-progetto dei parametri idrodinamici tra i diversi scenari idrologici. Il punteggio assegnato varia da 0 (impatto nullo) a 20 (impatto massimo).

- Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. [-]

- **IHAB**: definito come il rapporto, espresso in percentuale, tra la somma delle aree ADP in corrispondenza della Q355 relative alla specie di riferimento (cavedano) agli stadi giovanile ed adulto nella situazione di progetto e la medesima sommatoria nella condizione attuale. Il punteggio assegnato varia da -10 (miglioramento rispetto alla condizione attuale) a 10 (impatto massimo).

- Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo. [%]

In Tabella 177 si riporta una sintesi dei punteggi assegnati ai diversi indicatori in funzione del range del parametro (espresso in termini percentuali tranne IPIM).

IFRD		ILVL		ISMP		IPIM		IHAB	
Valore [%]	Punti	Valore [%]	Punti	Valore [%]	Punti	Valore [-]	Punti	Valore [%]	Punti
IFRD ≤ 30	0	ILVL ≤0	-5	ISMP ≥0	-5	IPIM ≤0,5	0	ILVL <100	10
30<IFRD≤60	10	0<ILVL≤15	0	-10≤ISMP<0	0	0,5<IPIM≤0,95	10	100≤ILVL<120	0
60<IFRD≤90	20	15<ILVL≤30	5	-50≤ISMP<-10	5	IPIM >0,95	20	120≤ILVL<160	-5
IFRD >90	30	30<ILVL≤50	10	-90≤ISMP<-50	10			ILVL ≥160	-10
		ILVL>50	20	ISMP < -90	20				

Tabella 177 Punteggi assegnati ai diversi indicatori di impatto.

I risultati ottenuti per ogni tratto omogeneo, in termini di analisi statistiche e calcolo degli indici descritti, vengono presentati in schede monografiche di sintesi (allegate al presente documento), che forniscono una panoramica completa del quadro quali-quantitativo ed idrodinamico delle acque superficiali per ciascun tratto.

In Figura 494 viene riportata, a titolo di esempio, la scheda relativa al tratto T1.1, ubicato immediatamente a monte della traversa di Roccabianca.

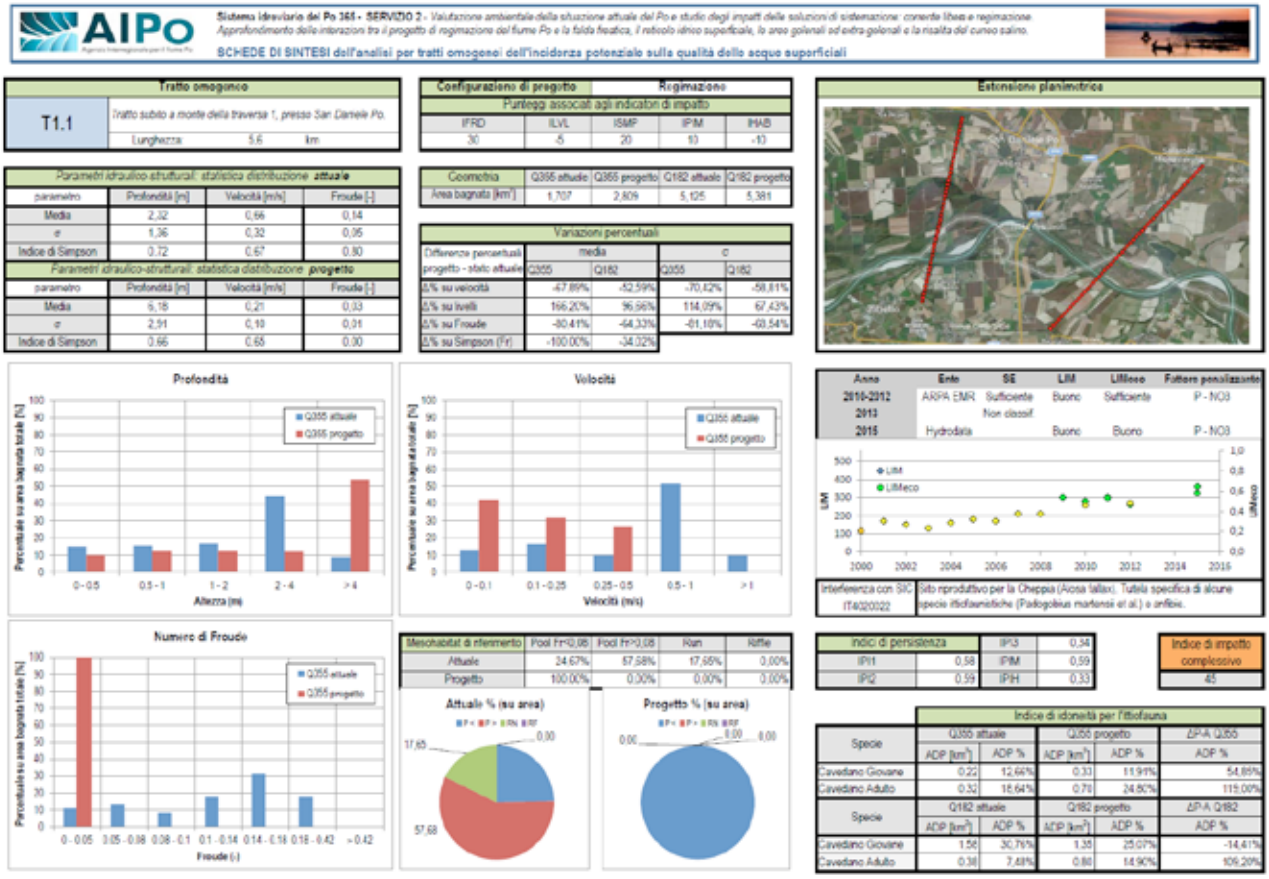


Figura 494 - Esempio di scheda monografica di sintesi.

Ogni scheda fornisce innanzitutto una sintetica identificazione del tratto omogeneo (codice, breve descrizione, identificazione estensione su ortofoto) e della geometria, valutata in termini di area bagnata allo stato attuale e di progetto, in riferimento alla Q355 e alla Q182.

Relativamente ai parametri idraulico-strutturali vengono riportati in forma sia tabulare che grafica i risultati delle analisi statistiche su profondità, velocità e numero di Froude ottenuti in condizioni di magra (Q355) allo stato attuale e allo stato di progetto.

La distribuzione di habitat prevalente, valutata come precedentemente descritto in funzione del numero di Froude, viene riportata sia in forma grafica che tabulare.

La scheda presenta inoltre il calcolo dell'indice rappresentativo dell'idoneità del tratto per l'ittiofauna e la sua variazione tra la condizione di progetto e quella attuale. Tale indice, descritto in precedenza, è definito con l'applicazione schematica della metodologia dell'Area Disponibile Ponderata (ADP), assumendo come target una specie di riferimento ad alta adattabilità, ovvero il cavedano, considerando le curve di gradimento per individui sia adulti che giovani. L'applicazione di tale indice ha unicamente significato di confronto relativo tra i diversi scenari analizzati, per comprendere come le modificazioni idrodinamiche prodotte possano incidere sulla "vivibilità" del tratto per i livelli trofici superiori.

Relativamente agli aspetti qualitativi, una tabella illustra la classificazione, in termini di stato ecologico, chimico e LIMeco, dei campionamenti effettuati da Enti (ARPA) per il triennio 2010/2012 e, ove presente, nell'anno 2013. L'analisi conoscitiva viene integrata con i risultati dei monitoraggi effettuati dal RTI nel 2015. Per ogni tratto viene anche riportato un grafico con gli andamenti nel tempo degli indici LIM (ex D.Lgs. 152/99) e LIMeco (ex D.Lgs. 152/06) dal 2000 al 2015 e una indicazione dell'eventuale interferenza dei livelli idrici di progetto con aree SIC (Siti di Importanza Comunitaria).

In ciascuna scheda sono infine riportati i valori di calcolo degli indici di persistenza e degli indicatori di impatto descritti nel presente capitolo, giungendo alla definizione dell'indice di impatto complessivo.

22.3.3 Valutazione degli effetti attesi per tratti omogenei: configurazione di regimazione

Come già descritto, la valutazione dei potenziali effetti della sistemazione di "regimazione" è stata indagata per i primi cinque macrotratti (cfr.Tabella 176), in quanto non sono previste, né sono state riscontrate dalle analisi, variazioni significative a valle dell'ultima traversa in progetto.

Le analisi di caratterizzazione degli effetti delle opere in progetto sono presentate con riferimento alla metodologia e agli indici descritti nel capitolo 8.3.2.

Relativamente ai parametri idrodinamici, la soluzione di progetto determina un incremento del livello idrico medio del sottotratto variabile tra 0,84 m e 4,07 m rispetto alla condizione attuale (Figura 495).

Per ogni macrotratto TX nella condizione di progetto i livelli massimi si osservano generalmente, come atteso, in corrispondenza delle traverse (Figura 495).

Si osserva come la sistemazione di progetto provochi un incremento della deviazione standard del parametro (Figura 496). Questo effetto non è semplicemente correlabile con una maggiore variabilità dei livelli (ricaduta positiva in termini di differenziazione degli habitat), in quanto spesso è condizionato dalla presenza di classi di valori più lontane dalla media in una condizione che risulta più banalizzata rispetto allo stato attuale. Per tale motivo l'interpretazione della differenziazione dei vari parametri è da condursi con riferimento all'indice di Simpson, appositamente introdotto.

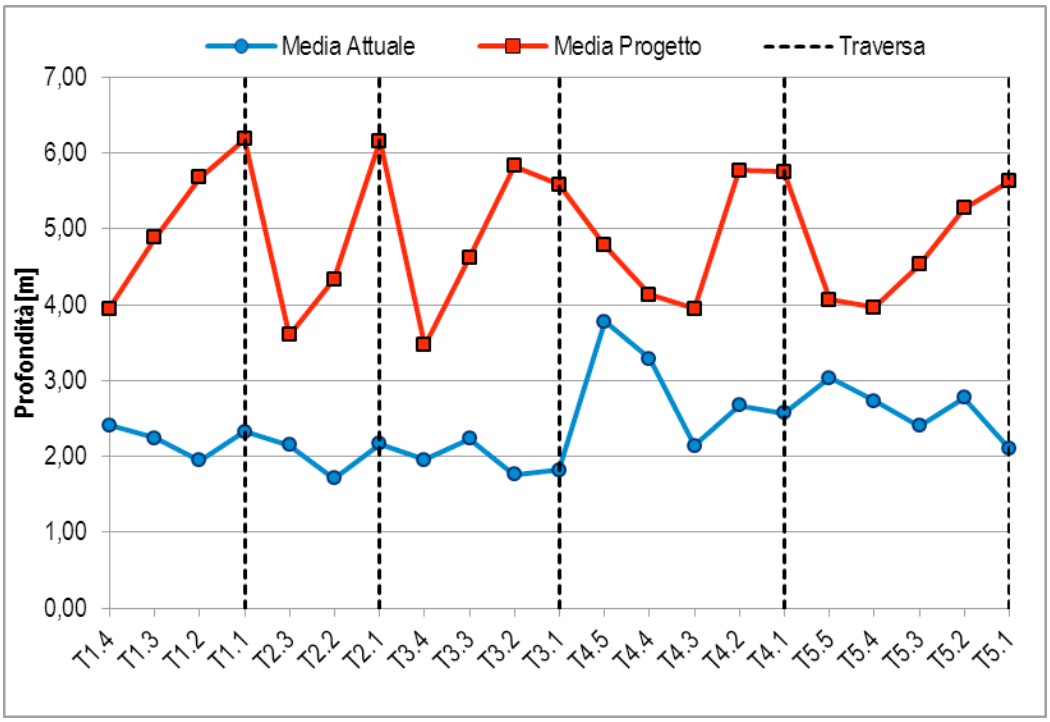


Figura 495 - Andamento dei livelli idrici alla condizione attuale e di progetto (scenario di regimazione).

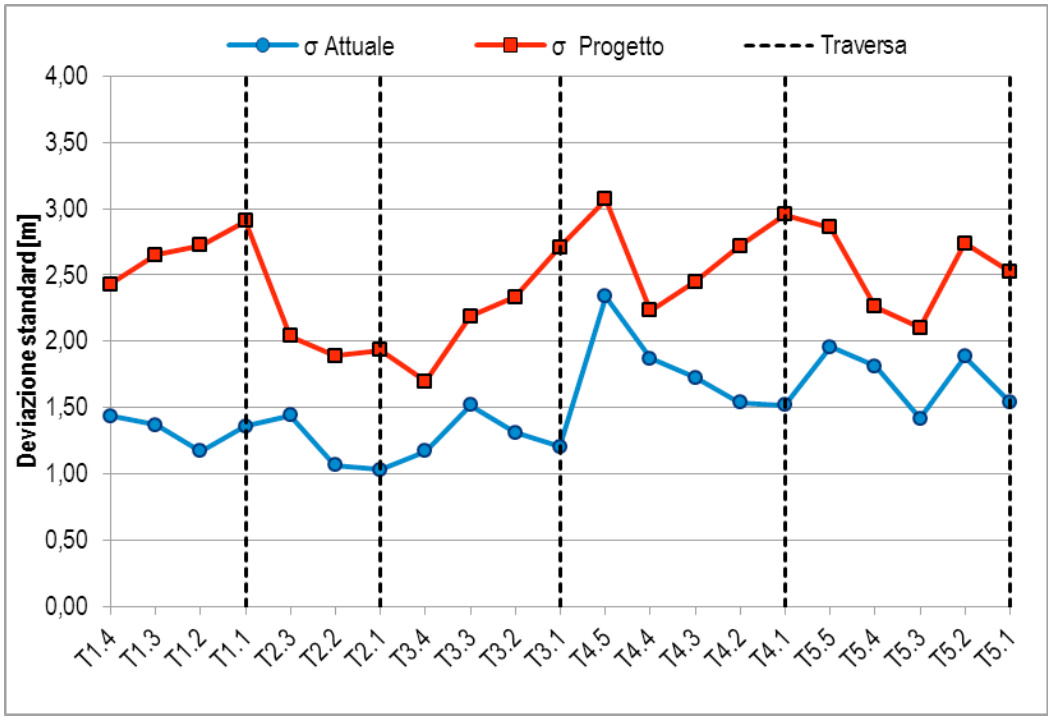


Figura 496 - Andamento della deviazione standard della distribuzione dei livelli alla condizione attuale e di progetto (scenario di regimazione).

Per ogni macrotratto, inoltre, il massimo scostamento percentuale tra la profondità media alla condizione di progetto e alla condizione attuale si verifica in corrispondenza della traversa o immediatamente a monte (tratti T1 e T3, in cui il massimo scostamento si ha in corrispondenza dei sottotratti T1.2 e T3.2). Il minimo scostamento si ha invece nel sottotratto più a monte (Figura 497).

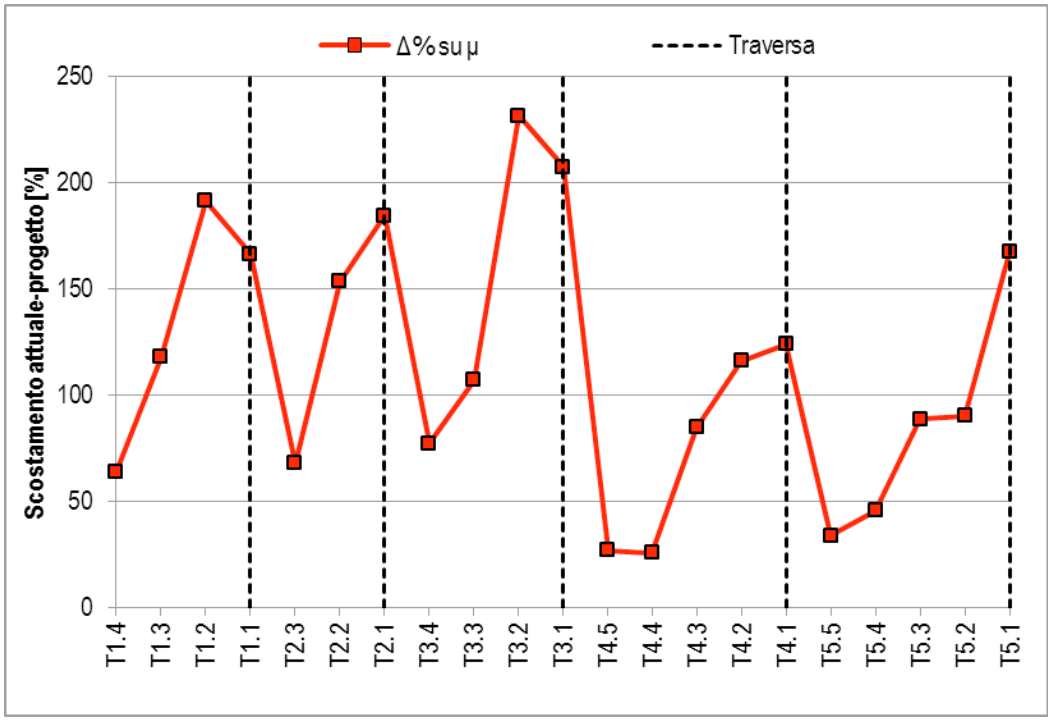


Figura 497 – Andamento dello scostamento percentuale tra la profondità media allo stato attuale e di progetto (scenario di regimazione).

Relativamente alle velocità, alla situazione di progetto si osserva una importante riduzione dei valori

rispetto alla condizione attuale (dal 27% al 80% a seconda dei sottotratti). Scostamenti inferiori (10%), sempre in riduzione, si osservano solo nel sottotratto T4.5.

La velocità media nell'intero tratto di fiume analizzato (da Isola Santa a Stienta) passa da circa 0,61 m/s nella condizione attuale a circa 0,34 m/s nella situazione di progetto, con la deviazione standard che presenta valori molto contenuti in entrambe le condizioni e si riduce da circa 0,31 a circa 0,15.

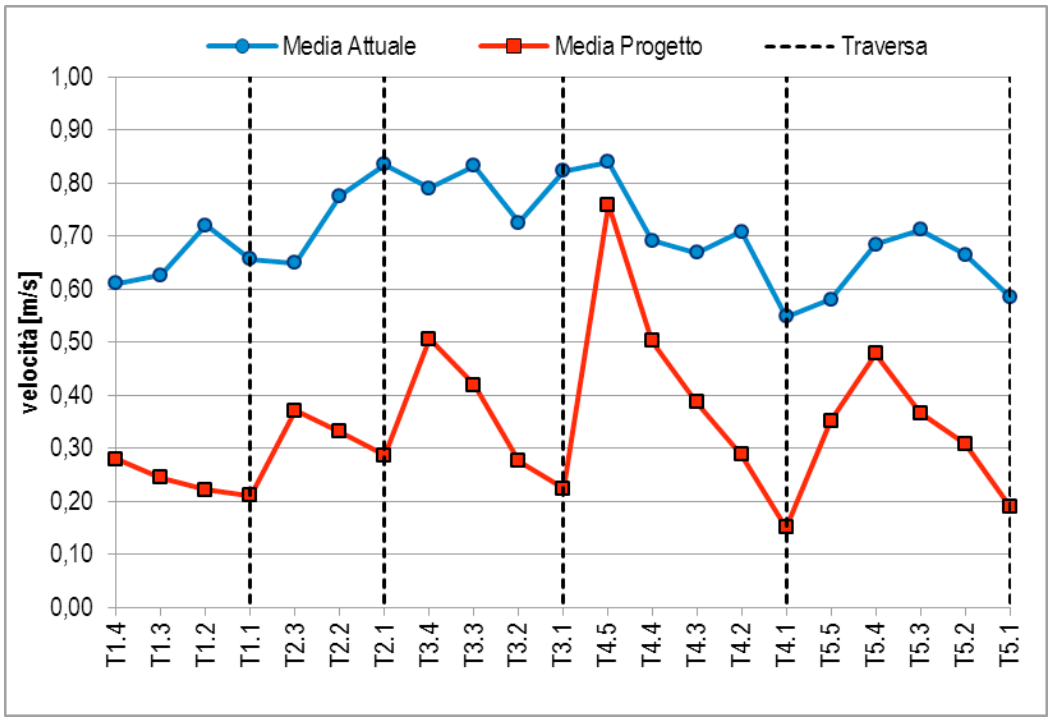


Figura 498 - Andamento delle velocità alla condizione attuale e di progetto (scenario di regimazione).

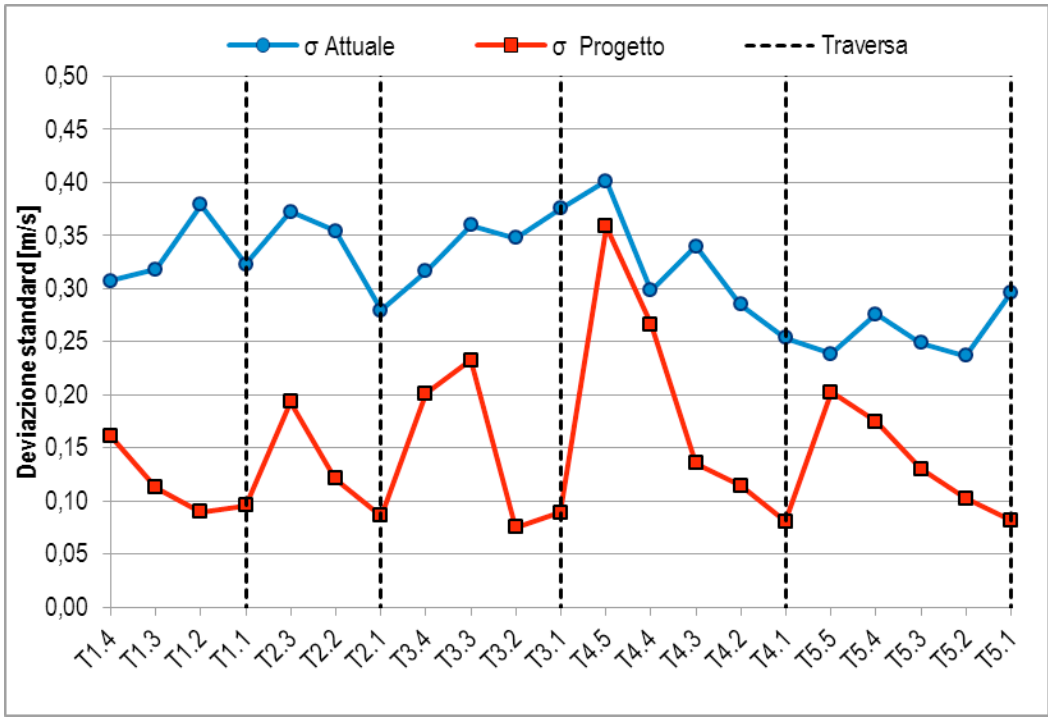


Figura 499 - Andamento della deviazione standard della distribuzione delle velocità alla condizione attuale e di progetto (scenario di regimazione).

Per ogni macrotratto, il massimo scostamento percentuale tra la velocità media alla condizione di progetto e alla condizione attuale si verifica in corrispondenza della traversa o immediatamente a monte (tratto T1 in cui il massimo scostamento si ha in T1.2). Il minimo scostamento si ha invece nel sottotratto più a monte (Figura 500).

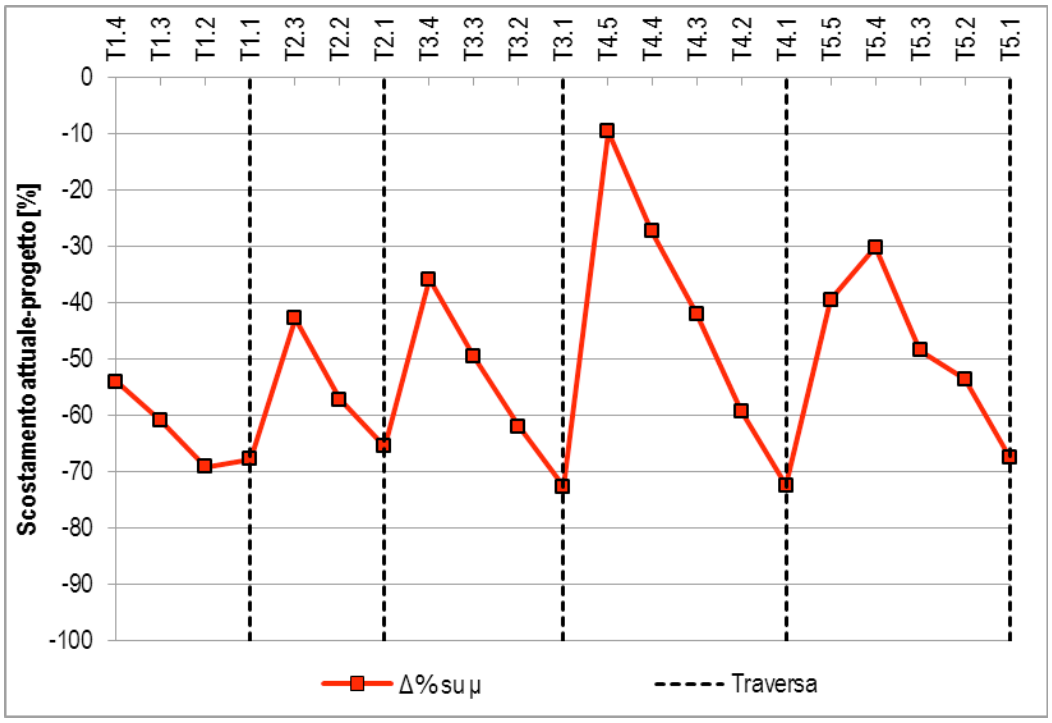


Figura 500 - Andamento dello scostamento percentuale tra la profondità media allo stato attuale e di progetto per i tratti a regimazione.

Relativamente al numero di Froude, nella situazione di progetto è stata osservata, in particolare in prossimità delle traverse, la presenza preponderante di aree caratterizzate da Fr molto bassi (Fr<0,08) con netto incremento di queste ultime rispetto allo stato attuale (Figura 501).

Come descritto in precedenza, tale parametro è un significativo indicatore della potenzialità di decadimento della qualità delle acque (in particolare per rischio di rilevante riduzione della concentrazione di ossigeno disciolto).

Per ogni macrotratto, spostandosi da monte verso valle (sito di ubicazione della traversa) si osserva una tendenza all'incremento di tali aree caratterizzate da acque quasi ferme con bassissima energia.

A titolo di esempio si riportano in Figura 502 i diagrammi relativi alla distribuzione percentuale sull'area bagnata totale del numero di Froude e della distribuzione dei mesohabitat alla condizione attuale e di progetto per il macrotratto T2.

Relativamente all'idoneità del tratto per la vita della specie ittica di riferimento (cavedano - specie bersaglio), espressa mediante la quantità **ADP** [m2], "Area Disponibile Ponderata" calcolata per il substrato unico di riferimento (sabbia), si osserva come relativamente agli esemplari adulti (ovvero di taglia maggiore) si verifichi generalmente nella condizione di progetto un incremento delle aree idonee rispetto alla condizione attuale, con picchi in corrispondenza delle traverse (la presenza di maggiori altezze d'acqua favorisce in generale questi individui).

Viceversa, l'idoneità alla vita degli esemplari giovani (ovvero di piccola taglia), che prediligono tiranti idrici inferiori, viene influenzata in modo variabile e discontinuo dalla presenza dei sostegni, in quanto si perdono alcune aree di gradimento attuali, dove il livello idrico cresce significativamente, ma nel contempo possono essere interessate del deflusso nuove aree che al momento non risultano bagnate (comprendendo anche l'eventuale riattivazione di lanche). Una sintesi dei risultati è fornita in Figura 503.

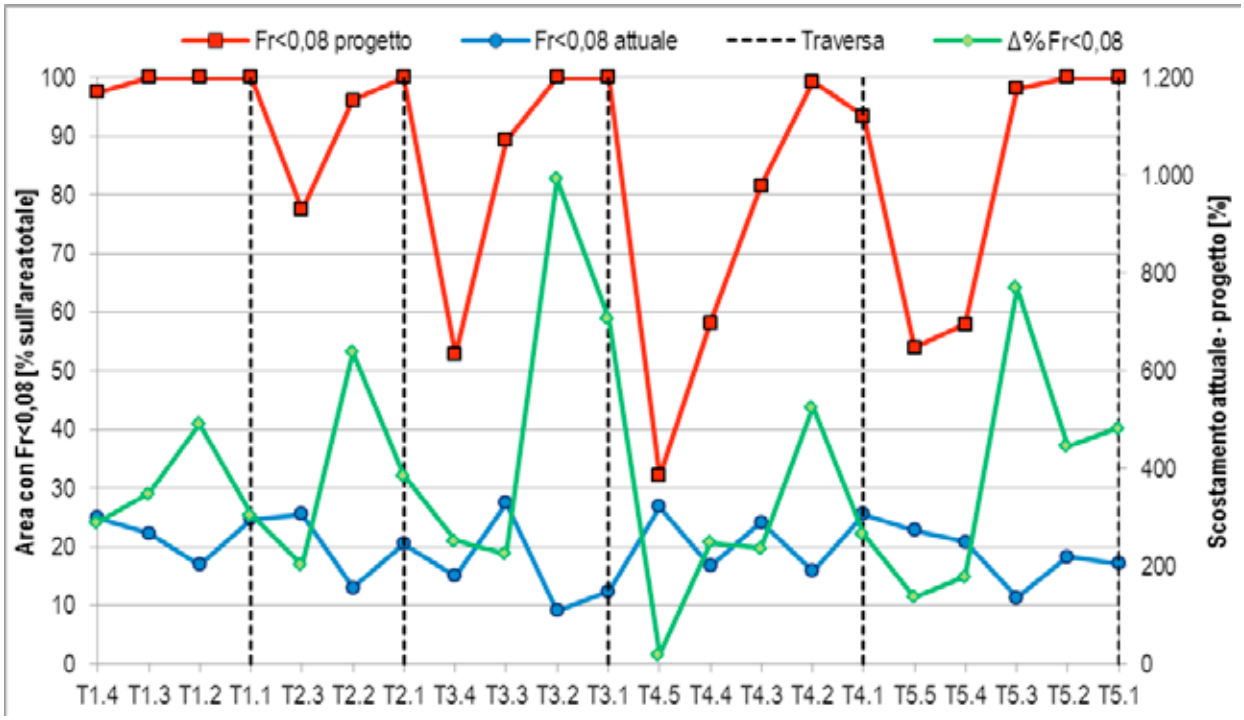


Figura 501 - Area percentuale sul totale caratterizzata da Fr<0,08 e scostamento percentuale tra la condizione attuale e lo stato di progetto.

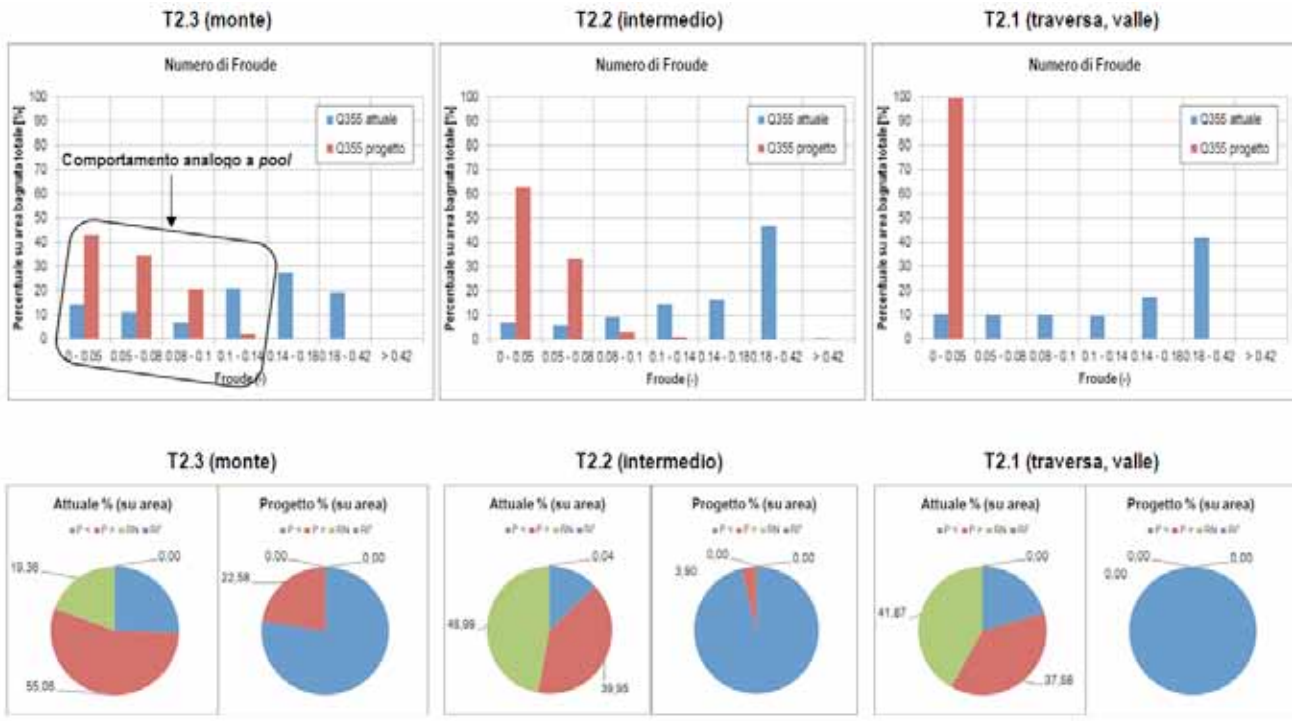


Figura 502 - Distribuzione del numero di Froude (sopra) e distribuzione dei mesohabitat alla Q355 (sotto) nei vari sottotratti del macrotratto T2 nelle condizioni attuale e di progetto.

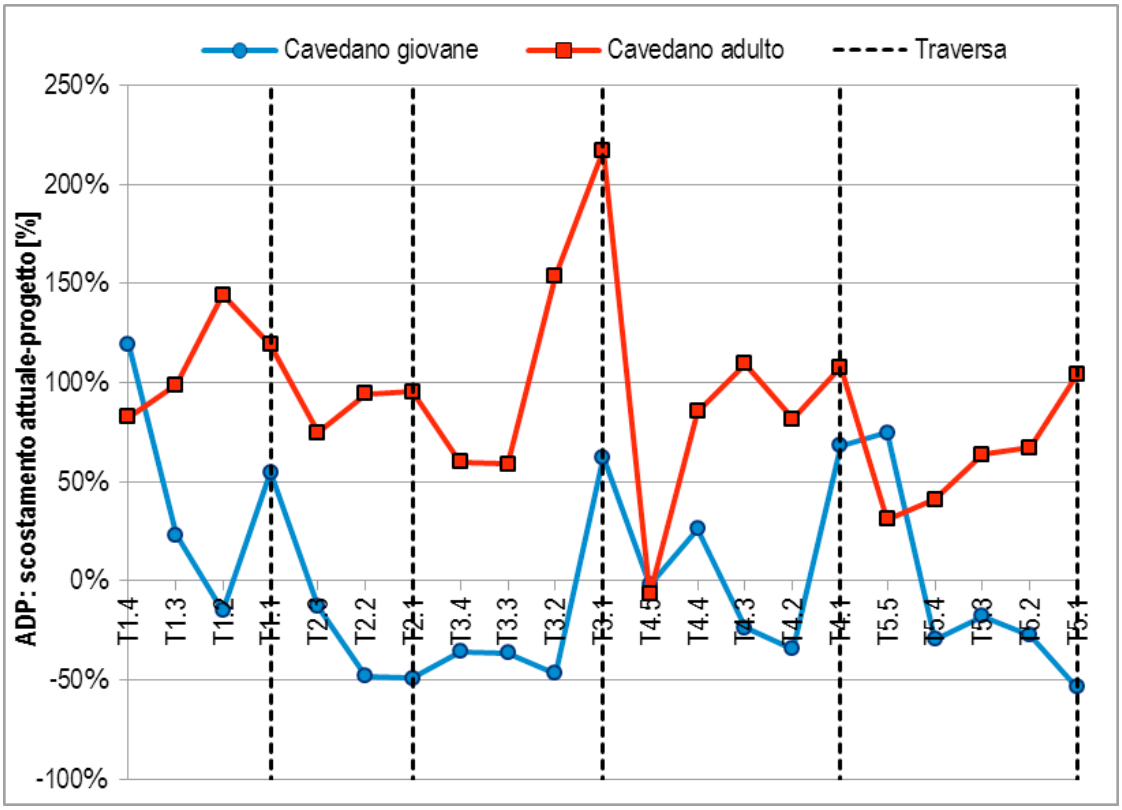


Figura 503 - Scostamento rispetto alla condizione attuale della percentuale di ADP per la specie target.

Come descritto in precedenza, le analisi sono state effettuate sia in riferimento alla Q355, condizione di magra gravosa, sia alla Q182, indicativa della persistenza delle condizioni idrodinamiche nel corso d'acqua. Relativamente a quest'ultimo aspetto, sono stati determinati gli indici di persistenza idrodinamici e di habitat, il cui andamento nei sottotratti in esame è riportato in Figura 504.

Dall'analisi degli indici idrodinamici IPI1 e IPI2, che dipendono dai parametri di profondità, velocità e numero di Froude, si osserva come gli incrementi di livello e le riduzioni di velocità e numero di Froude si mantengano poco variabili sull'intero tratto con valori in genere compresi tra 0,5 e 1,0, indicativi quindi di una discreta persistenza degli effetti riscontrati nella condizione di magra anche per la fase di regime ordinario.

L'indice di Simpson (IPI3) mostra invece un migliore recupero al crescere della portata delle condizioni di variabilità del numero di Froude (e quindi in senso lato degli habitat idrodinamici) fino a metà del macrotratto T4, attestandosi invece su valori analoghi più a valle. Il sottotratto T3.4 presenta un valore molto alto che deriva da un'anomalia algebrica (l'indice aumenta, anziché diminuire, sia per la Q355 che per la Q182 passando dallo stato attuale al progetto, ma molto meno per la portata di magra; il rapporto fornisce quindi questo valore elevato), che si ritrova anche nell'IPIM, determinato come il massimo tra gli indici idrodinamici, ma non è indicativo di una particolare criticità, anzi si tratta di un'area in cui la condizione di progetto provoca un pur modesto incremento nella diversità degli ambienti idrodinamici.

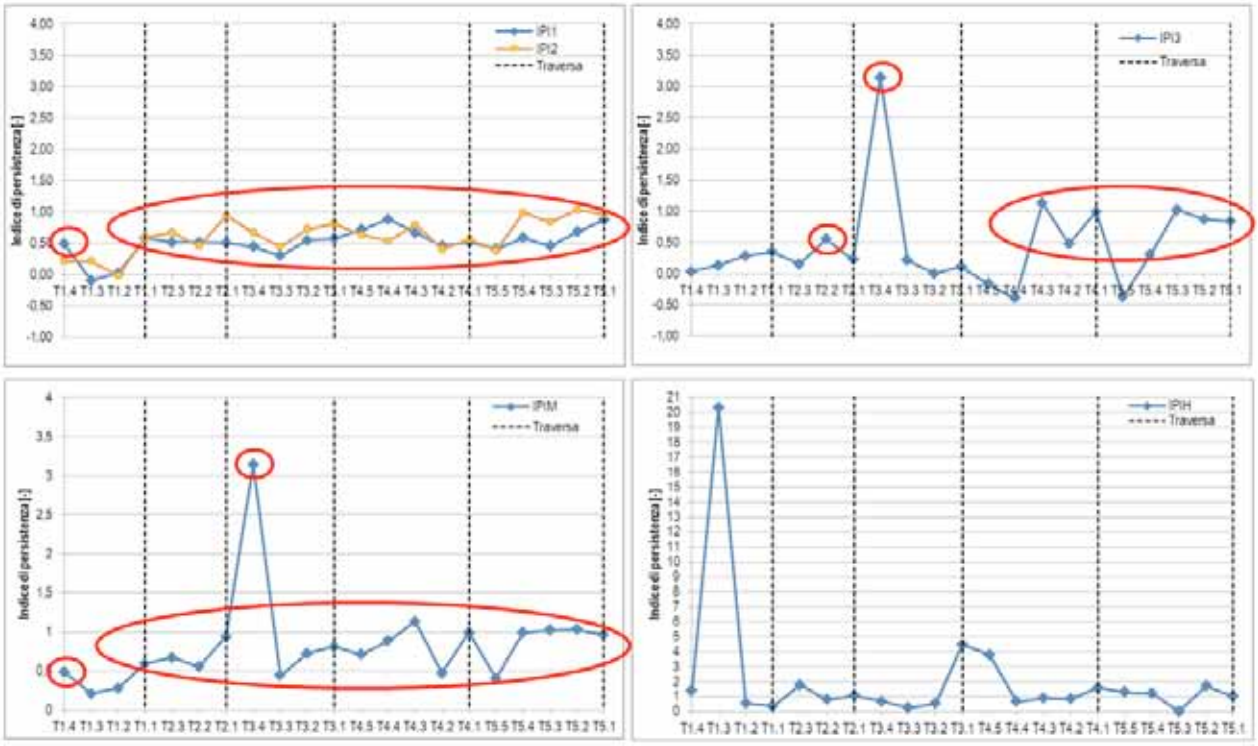


Figura 504 - Andamento degli indici di persistenza idrodinamici (figure in alto e in basso a sx) e di habitat (figura in basso a dx).

L'indice di persistenza di habitat IPIH, dato dalla media del rapporto tra le ADP alla Q182 e alla Q355 calcolate per il cavedano giovane ed adulto, evidenzia come nei sottotratti subito a monte delle traverse in condizioni di portata ordinaria (Q182) si abbia in genere un complessivo incremento delle aree idonee alla vita della specie target rispetto alle condizioni di magra (Q355); fa eccezione la traversa 1, presso la quale si osserva invece una riduzione.

Nel resto dei tratti l'andamento è più variabile, per le ragioni già esposte (Figura 505).

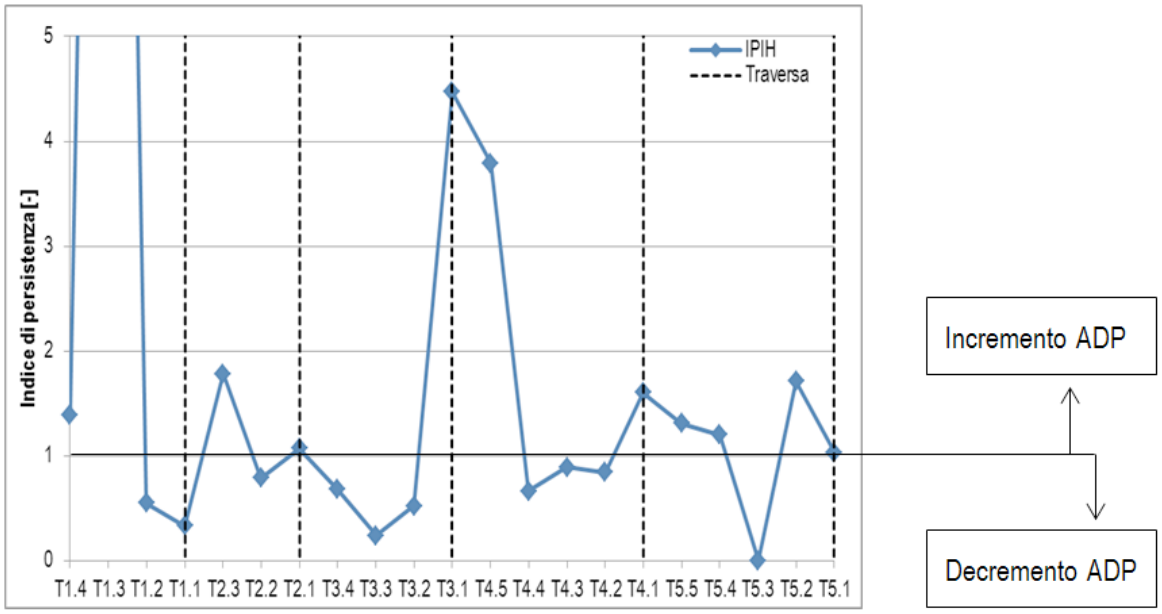


Figura 505 - Dettaglio dell'indice IPIH nei tratti a regimazione.

Per effettuare la valutazione su ciascun tratto omogeneo dell'indice di impatto complessivo, si è proceduto al calcolo degli indicatori IFRD, ILVL, ISMP, IPIM e IHAB (cfr. capitolo 8.3.2).

I punteggi ottenuti sono riportati su ciascuna scheda monografica di sintesi. Di seguito si fornisce un commento complessivo per l'intero tratto.

Per quanto riguarda l'indice IFRD, si può fare riferimento al grafico di Figura 501; particolarmente svantaggiati risultano soprattutto i tratti poco a monte delle traverse in progetto.

Relativamente all'indice ILVL, in generale si osserva una tendenza alla riduzione delle aree caratterizzate da altezze d'acqua inferiori ad un metro come conseguenza all'effetto di rigurgito provocato dai manufatti in progetto, con l'eccezione di 4 sottotratti in cui invece prevale l'effetto di estensione delle aree bagnate (Figura 506 e Figura 505).

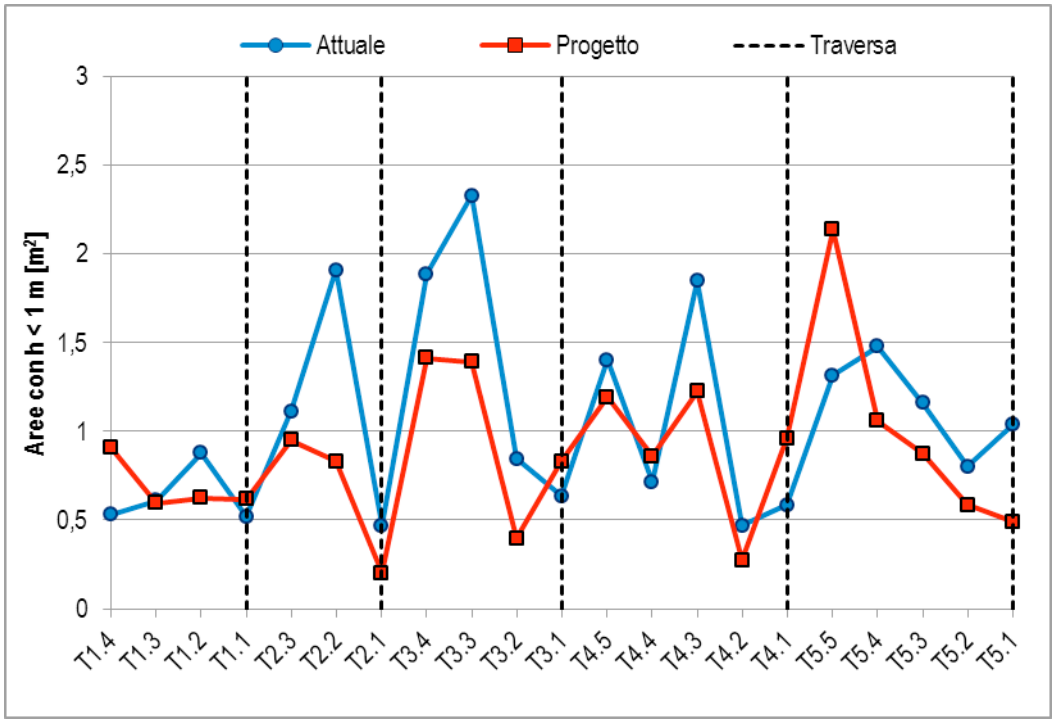


Figura 506 - Andamento delle aree caratterizzate da h < 1 m alla condizione attuale e di progetto.

Per ogni tratto compreso tra due traverse successive l'indice di impatto ISMP evidenzia una generale riduzione dell'indice di Simpson (minore diversità di ambienti idrodinamici), massima subito a monte del sostegno (condizione più banalizzata) e man mano ridotta spostandosi più a monte; dal grafico in Figura 507si osserva come la differenza percentuale tra stato attuale e di progetto presenti alcuni valori positivi immediatamente a valle delle tre traverse di valle (miglioramento in termini di aumento di diversità).

Per quanto riguarda l'indice IPIM si rimanda al grafico di Figura 504 e alle considerazioni già esposte in merito alla variabilità nel tratto di indagine.

Relativamente all'idoneità per l'ittiofauna, l'indice IMHB (Figura 508) evidenzia in generale un incremento importante delle ADP (aree disponibili ponderate) nella situazione di progetto. Questo è legato soprattutto alla presenza di maggiori altezze d'acqua, che in linea generale favoriscono gli individui adulti o di grossa taglia e sfavoriscono (ma in misura minore) quelli giovani o di piccola taglia. Una contenuta riduzione si osserva solamente nel tratto omogeneo T4.5. Tale riduzione, peraltro, va ad incidere in maniera contenuta su un tratto che allo stato attuale risulta già non idoneo alla vita del cavedano (cfr. Figura 503).

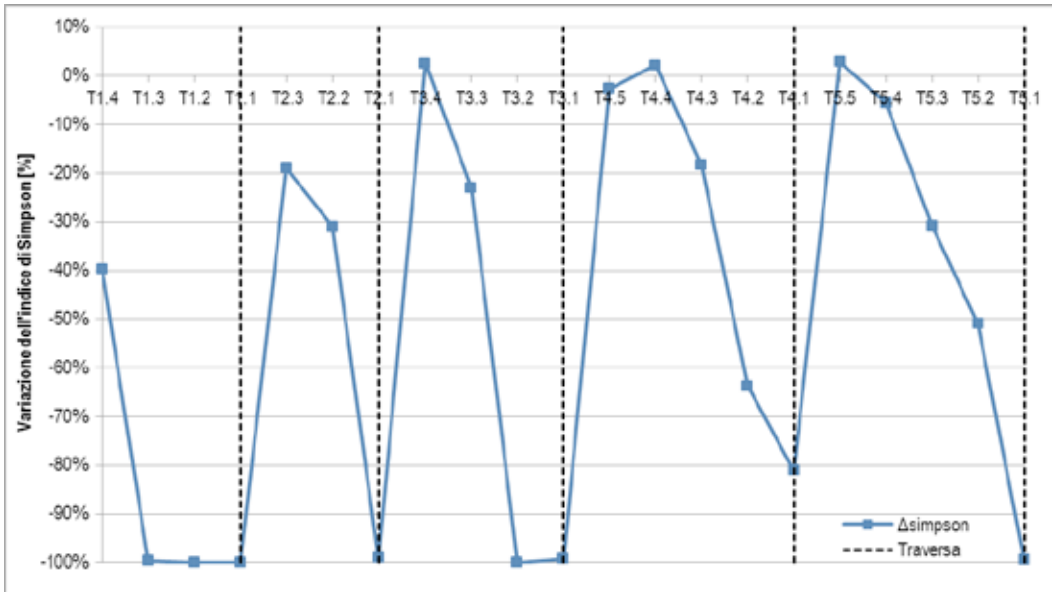


Figura 507 - Andamento della differenza percentuale dell'indice di Simpson tra stato attuale e di progetto.

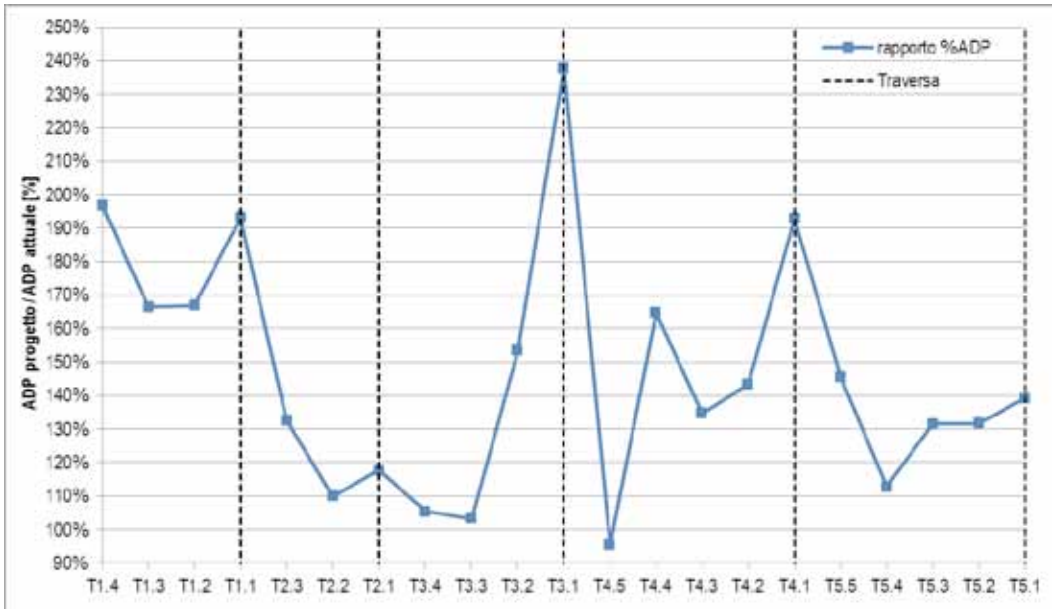


Figura 508 - Andamento del rapporto percentuale tra le Aree Disponibili Ponderate tra stato attuale e di progetto.

In Figura 509 è riportato, per ogni tratto omogeneo, l'andamento del punteggio complessivo. Si osserva una buona variabilità dell'indice, con incrementi del valore in corrispondenza delle traverse e una generale riduzione dei valori verso monte nel tratto compreso tra due sbarramenti.

Quest'ultimo fattore indica come l'impatto maggiore degli interventi in progetto rimanga confinato nella zona adiacente alle traverse stesse, la cui presenza comporta necessariamente effetti locali più rilevanti sugli aspetti idrodinamici del corso d'acqua.

Si evidenzia comunque come dal punto di vista della qualità delle acque l'incidenza delle opere in progetto sia differente tra le diverse opere di sostegno, e non correlata direttamente con la differenza di livello tra stato attuale e progetto (cfr. Figura 485).

Le traverse per le quali si prevede un maggiore "impatto" (ovvero maggiore necessità di interventi mitigativi) sono la seconda e la quinta. Nel tratto a monte della terza traversa, il sottotratto complessivamente più "impattato" non è quello subito a monte della traversa, ma quello precedente.

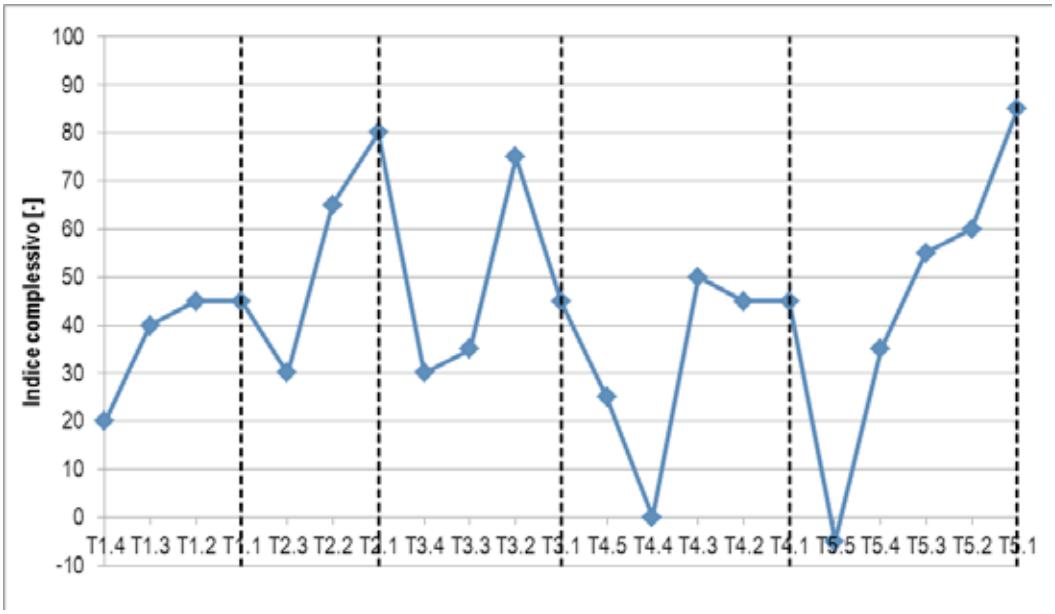


Figura 509 - Andamento dell'indice di impatto lungo il tratto di fiume Po di interesse. In nero è individuata la posizione delle traverse.

22.3.4 Valutazione degli effetti attesi per tratti omogenei: sistemazione a corrente libera

La soluzione di sistemazione a corrente libera, come già esposto, risulta significativa in relazione alla possibile incidenza sul comparto di qualità delle acque solo limitatamente all'ultimo macrotratto (cfr. Tabella 176), per il quale il progetto di regimazione produce risultati sostanzialmente identici a quelli di stato attuale dal punto di vista dell'idrodinamica (pur considerando le modeste modificazioni morfologiche restituite dallo specifico modello sviluppato dal Servizio 1).

Come nel capitolo precedente, la valutazione degli effetti delle opere in progetto è presentata con riferimento a quanto osservato per la Q355, condizione che rappresenta una fase di magra pronunciata e per la quale ci si attende una maggiore influenza degli interventi sulle condizioni idrodinamiche e sulle caratteristiche qualitative del corso d'acqua.

Relativamente ai parametri idrodinamici, la soluzione di progetto determina un ridotto incremento dei livelli idrici medi dei sottotratti, variabile tra 0,06 m e 0,37 m rispetto alla condizione attuale, con una contenuta riduzione della deviazione standard, associabile a una minor variabilità dei livelli (Figura 510 e Figura 511). L'effetto locale delle opere in progetto è in realtà più pronunciato, ma è limitato ad una larghezza d'alveo ridotta, in corrispondenza del percorso di maggiore fondale.

I livelli massimi si osservano in corrispondenza dell'incile del Po di Goro (tratto T6.1, Figura 510), dove le differenze tra stato attuale e progetto rilevate nei tratti precedenti tendono ad annullarsi.

Il massimo scostamento percentuale tra la profondità media di progetto e attuale si verifica infatti in corrispondenza del sottotratto di monte (Figura 511); si tratta comunque di variazioni (< 15%) assai meno impattanti sull'idrodinamica del tratto rispetto a quelle riscontrate nei tratti precedenti per la soluzione di regimazione.

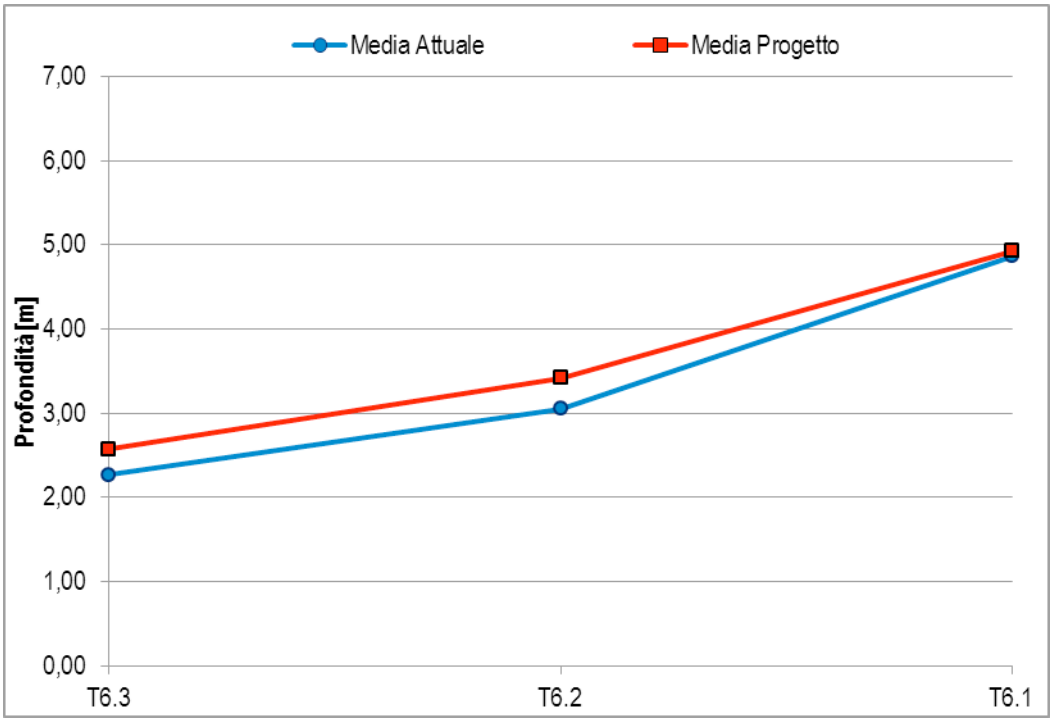


Figura 510 - Andamento dei livelli idrici alla condizione attuale e di progetto per il tratto a corrente libera.

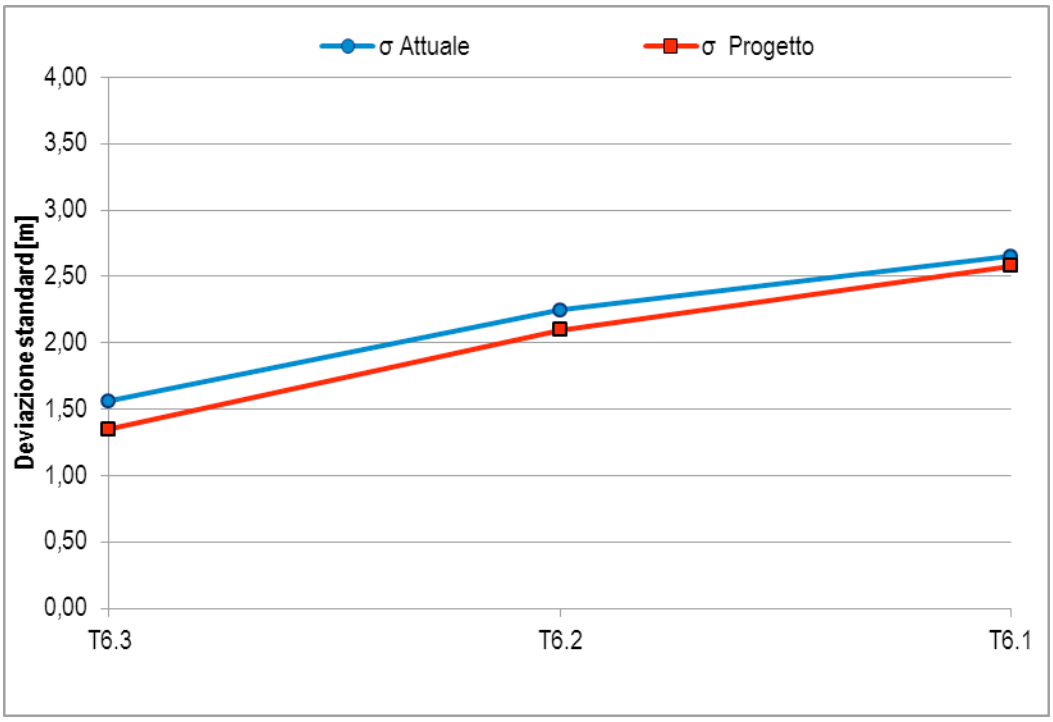


Figura 511 - Andamento dello scostamento percentuale tra la profondità media allo stato attuale e di progetto per il tratto a corrente libera.

Relativamente alle velocità, nella situazione di progetto si osserva una contenuta riduzione dei valori rispetto alla condizione attuale (dal 1,5% al 10%).

La velocità media nell'intero tratto di fiume analizzato (da Stienta all'incile del Po di Goro) passa da circa 0,52 m/s nella condizione attuale a circa 0,49 m/s nella situazione di progetto, con la deviazione standard, pari in media a 0,23 m/s, che rimane invariata.

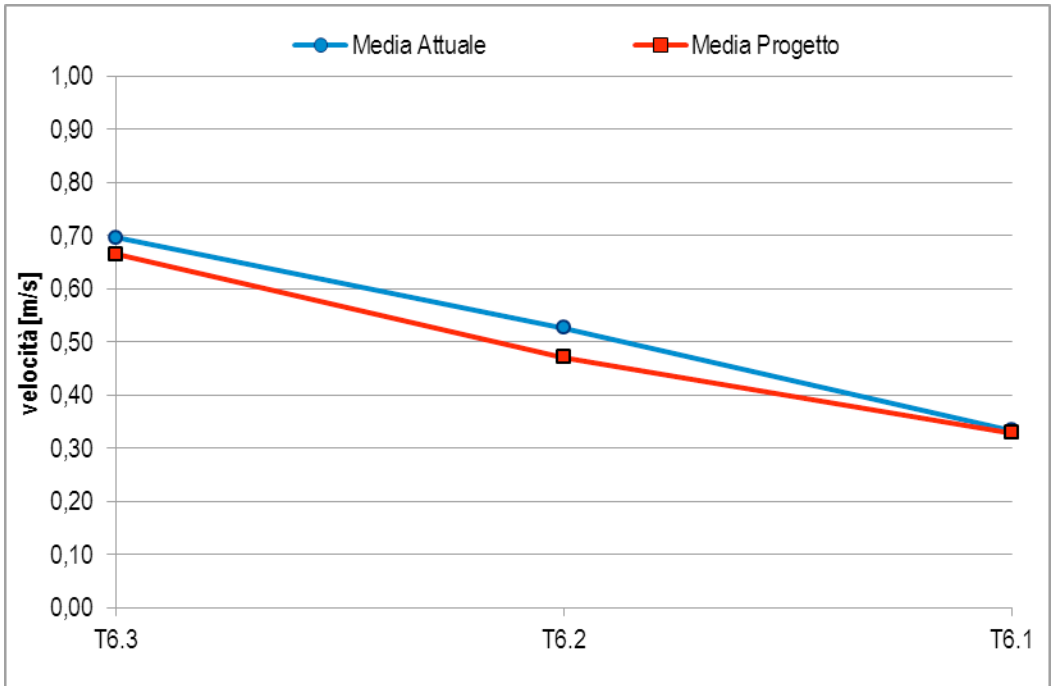


Figura 512 - Andamento delle velocità alla condizione attuale e di progetto per il tratto a corrente libera.

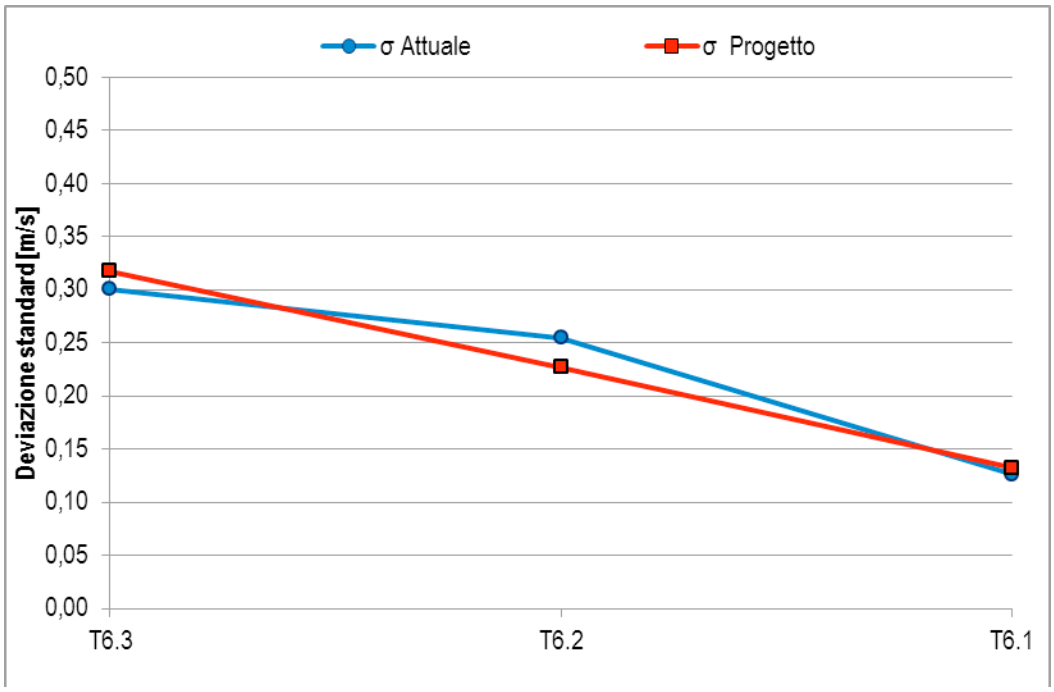


Figura 513 - Andamento della deviazione standard della distribuzione delle velocità alla condizione attuale e di progetto per il tratto a corrente libera.

Relativamente al numero di Froude, sia nella situazione di stato attuale che di progetto è stata osservata la presenza preponderante di aree caratterizzate da Fr molto bassi (Fr<0,08), ovvero correnti molto lente a bassa energia.

Tale parametro è stato individuato in precedenza come un importante indicatore di potenzialità di decadimento della qualità delle acque (in particolare per rischio di rilevante riduzione della concentrazione di ossigeno disciolto), ma solo se provocato dalla presenza delle nuove opere; in questo caso però si ha solo un contenuto incremento di queste aree rispetto allo stato attuale (Figura 514).

Si mantengono pertanto condizioni idrodinamiche non molto differenti da quelle attuali, interessate da rilevanti fenomeni di rigurgito vista la prossimità del delta.

Spostandosi da monte verso valle (incile del Po di Goro) si osserva infatti una tendenza all'incremento di queste aree di correnti a bassissima energia sia nella condizione attuale che nello scenario di progetto, con differenze che tendono progressivamente a ridursi.

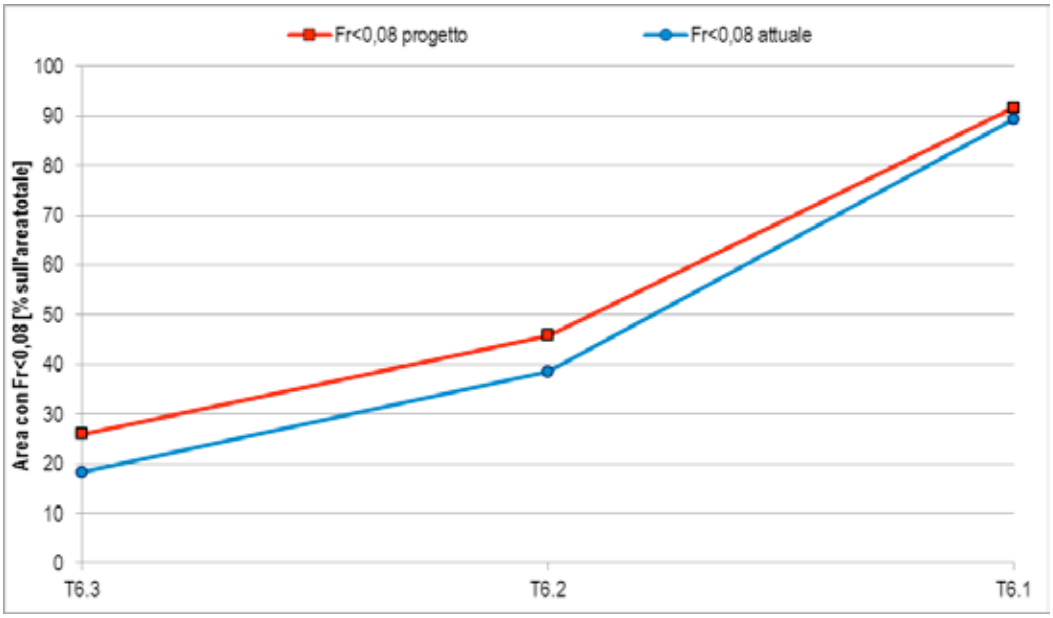


Figura 514 -Area percentuale sul totale caratterizzata da Fr<0,08 e scostamento percentuale tra la condizione attuale e lo stato di progetto.

Si riportano in Figura 515 i diagrammi relativi alla distribuzione percentuale sull'area bagnata totale del numero di Froude e della distribuzione dei mesohabitat alla condizione attuale e di progetto per il macrotratto T6.

Gli effetti della sistemazione appaiono poco significativi, con variazioni modeste nella distribuzione di Fr ma che comunque tendono a ridurne il valore. Spostandosi verso valle si osserva già allo stato attuale una maggiore banalizzazione e la sparizione di aree con velocità non minime.

Relativamente all'idoneità del tratto per la vita della specie ittica di riferimento (cavedano - specie bersaglio), espressa mediante la quantità ADP [m2] calcolata per il substrato di riferimento (sabbia), si osserva come si verifichi un decremento delle aree idonee rispetto alla condizione attuale (di circa il 20%) relativamente agli esemplari di piccola taglia (giovani), mentre per gli individui di taglia maggiore la situazione si mantenga sostanzialmente invariata (Figura 516).

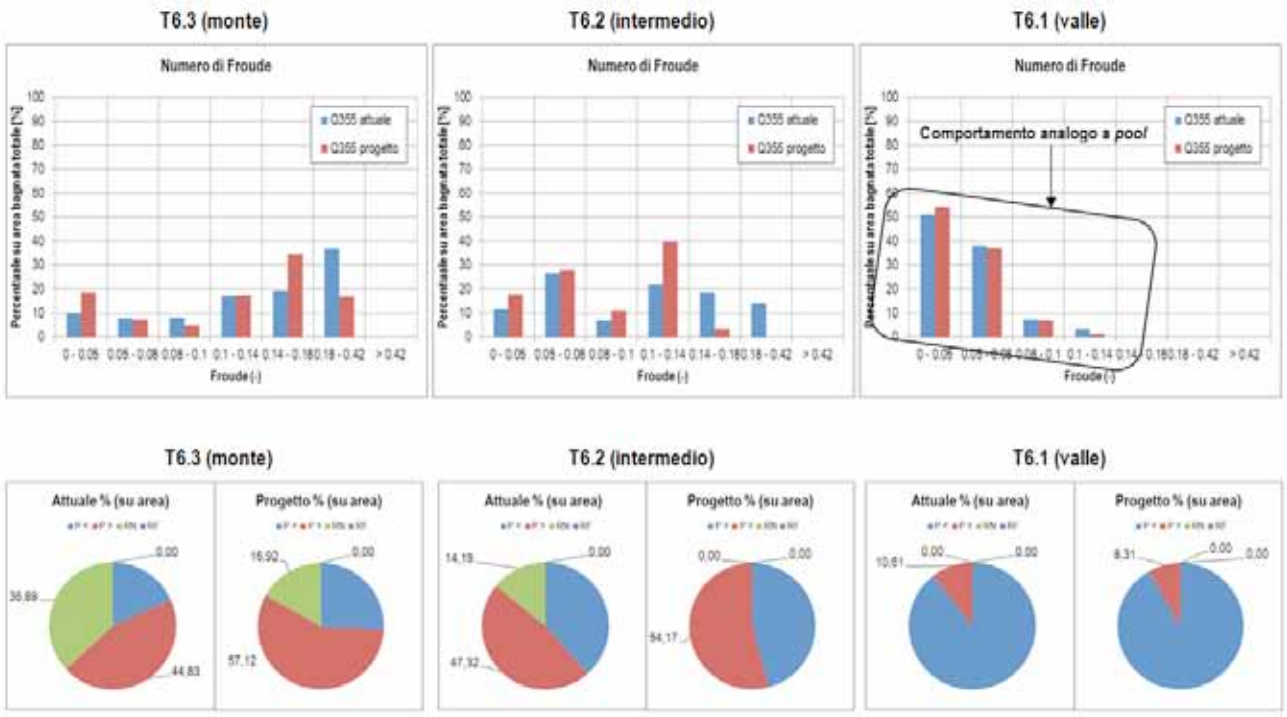


Figura 515 - Distribuzione del numero di Froude (sopra) e distribuzione dei mesohabitat alla Q355 (sotto) nei vari sottotratti del macrotratto T6 alla condizione attuale e di progetto.

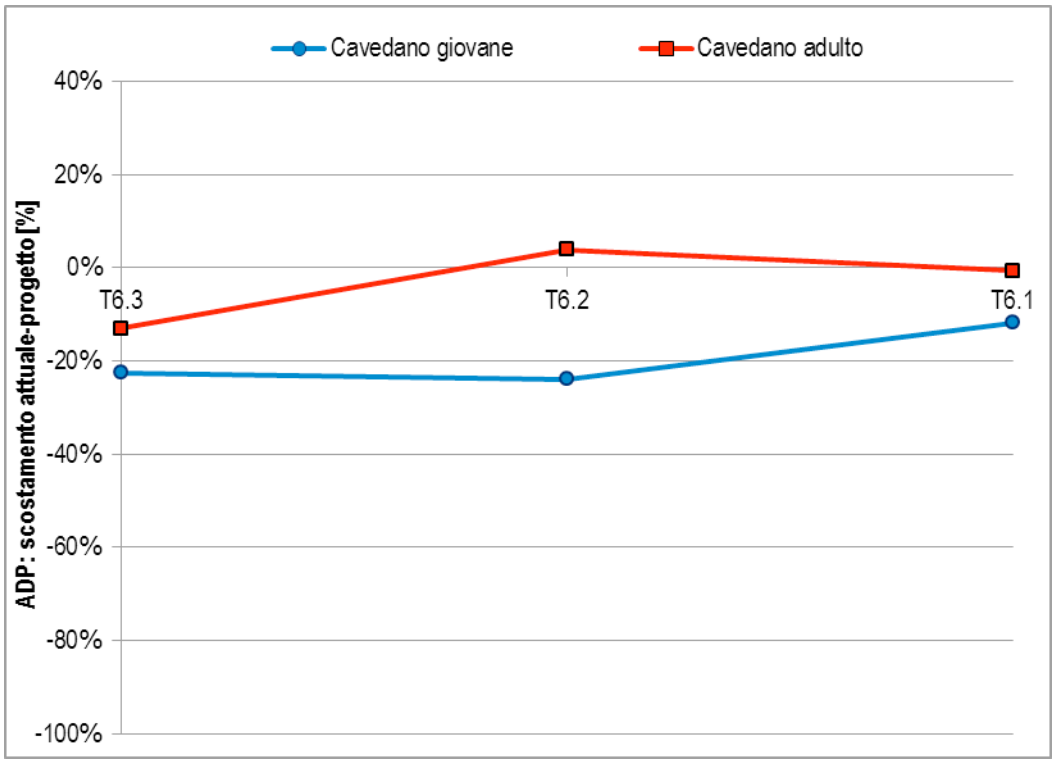


Figura 516 - Scostamento rispetto alla condizione attuale della percentuale di ADP per la specie target.

Come descritto in precedenza, le analisi sono state effettuate con riferimento sia alla Q355, condizione di magra pronunciata, sia alla Q182, portata di regime ordinario; il confronto è indicativo della persistenza delle variazioni indotte all'idrodinamica del corso d'acqua.

Relativamente a quest'ultimo aspetto, sono stati determinati gli indici di persistenza idrodinamici e di habitat, il cui andamento nel sottotratto in esame è riportato in Figura 517.

Dall'analisi dell'indice idrodinamico IPI1, che dipende dai valori medi dei parametri di profondità, velocità e numero di Froude, si osserva una sostanziale stabilità delle variazioni connesse alla realizzazione delle opere al variare delle portate.

Relativamente invece alla deviazione standard (IPI2), ovvero alla variabilità dei valori nel tratto, gli effetti (minimi) riscontrati appaiono persistenti solo nel tratto prossimo al delta, mentre più a monte risultano significativi solo in caso di magra, e quasi scompaiono al crescere delle portate.

L'indice di persistenza relativo all'indice di Simpson (IPI3), ovvero alla distribuzione di Fr, mostra un valore elevato nel sottotratto più a monte, che si rispecchia nell'indice IPIM, determinato come il massimo tra gli indici idrodinamici. Tale condizione deriva da un'anomalia algebrica, in quanto le variazioni tra i parametri considerati sono numeri molto piccoli e nella differenza tra stato attuale e progetto una variazione anche modesta può falsare il rapporto. Il risultato non è comunque indicativo di una condizione di particolare criticità.

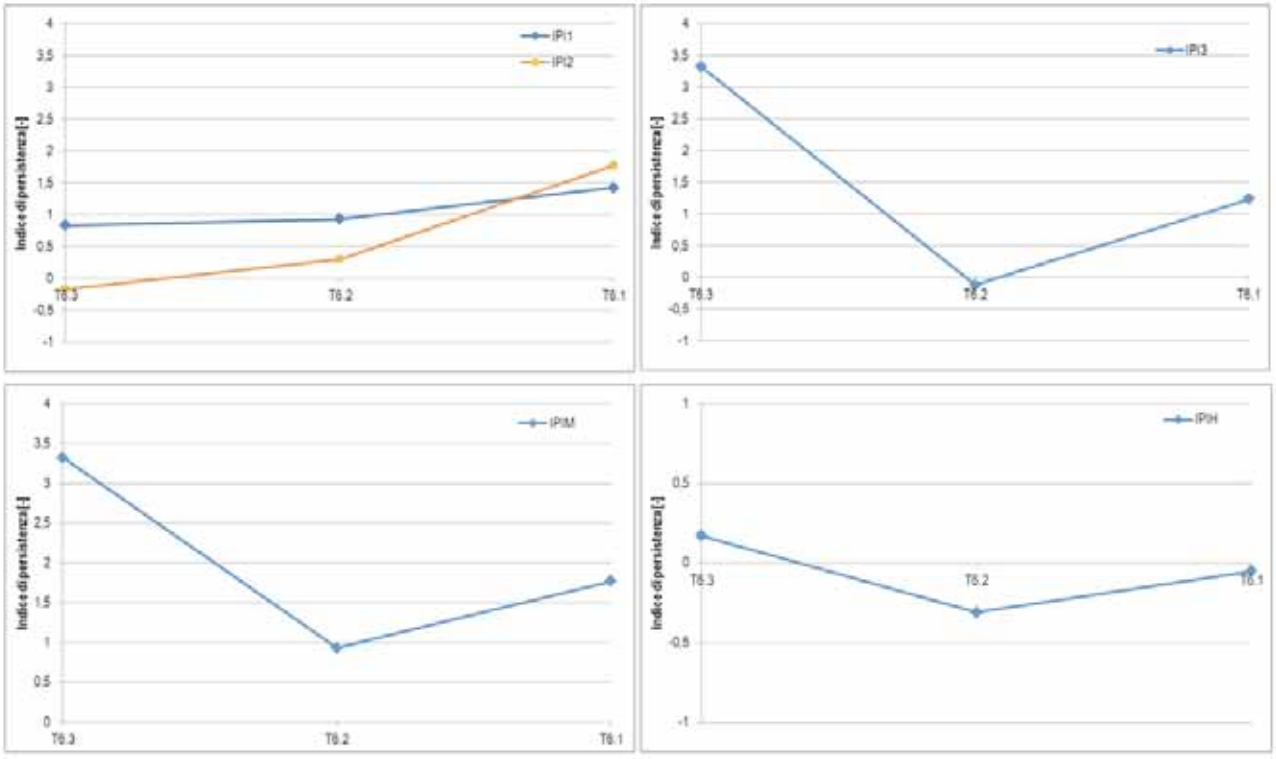


Figura 517 - Andamento degli indici di persistenza idrodinamici (figure in alto e in basso a sx) e di habitat (in basso a dx).

L'indice di persistenza di habitat IPIH, dato dalla media del rapporto tra le ADP alla Q182 e alla Q355 calcolate per gli stadi giovane ed adulto, evidenzia come in condizioni di portata maggiore (Q182) si abbia un decremento rispetto alle condizioni di magra (Q355) delle aree idonee come habitat per la specie considerata.

È stata infine effettuata la valutazione su ciascun sottotratto omogeneo dell'indice di impatto complessivo, dato dalla somma degli indici IFRD, ILVL, ISMP, IPIM e IHAB (cfr. capitolo 8.3.2).

Relativamente all'indice ILVL, si osserva nel complesso una diminuzione delle aree caratterizzate da altezze d'acqua inferiori a un metro rispetto alla condizione attuale.

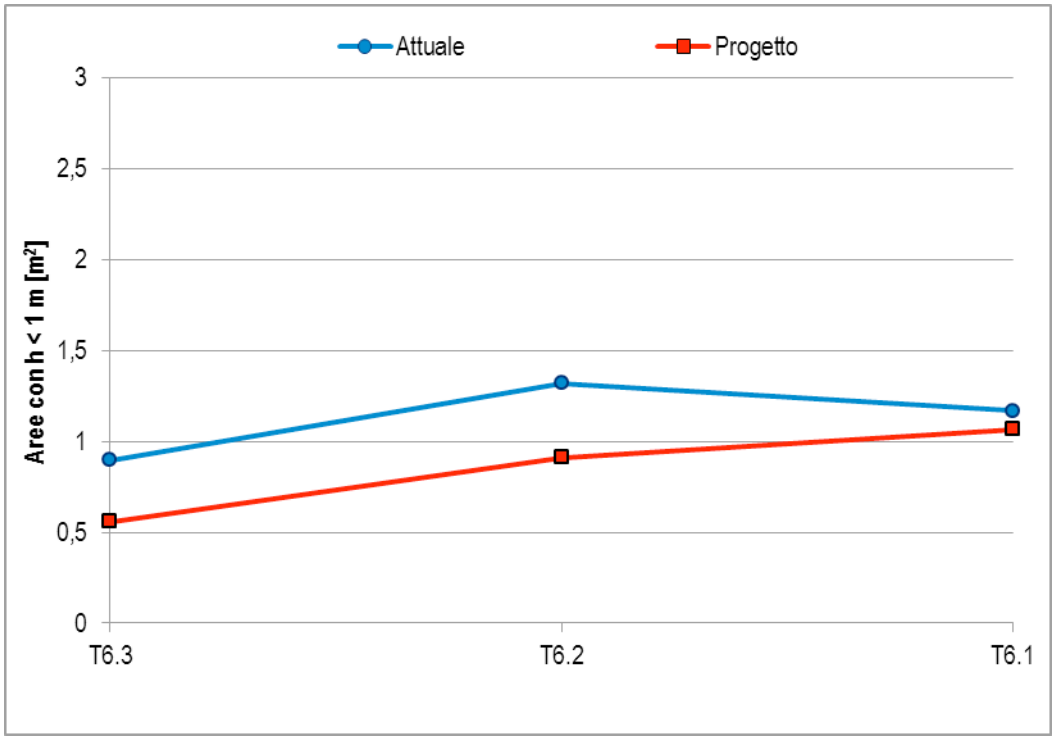


Figura 518 - Andamento delle aree caratterizzate da h<1m alla condizione attuale e di progetto.

Sul tratto in esame l'indicatore di impatto ISMP evidenzia un trend di riduzione dell'indice di Simpson (minore diversità di ambienti idrodinamici), a parte nel primo tratto di monte in cui la condizione è sostanzialmente stabile (Figura 519).

L'indicatore IMHB evidenzia in generale un decremento delle ADP (aree disponibili ponderate) nella situazione di progetto. Gli scostamenti sono comunque minimi in quanto altezze d'acqua e velocità sono confrontabili con la situazione attuale.



Figura 519 - Andamento della differenza percentuale dell'indice di Simpson tra stato attuale e di progetto.

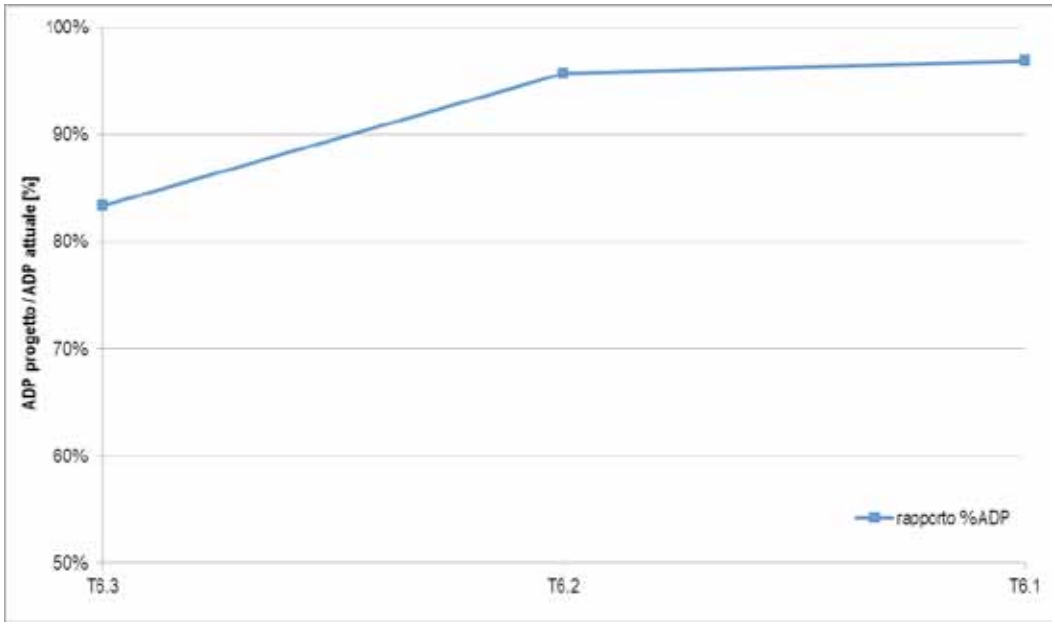


Figura 520 - Andamento del rapporto percentuale tra le Aree Disponibili Ponderate tra stato attuale e di progetto.

In Figura 521 è riportato, per ogni tratto omogeneo, l'andamento del punteggio complessivo. *Si* osserva una limitata variabilità dell'indice, con una modesta riduzione del valore nel tratto più a valle.

In valore assoluto il grado di impatto potenziale è dunque da ritenersi modesto, presentando l'indice valori di 30-35 a fronte di valori determinati a monte delle traverse nella configurazione di regimazione compresi nei tratti peggiori tra 70 e 90.

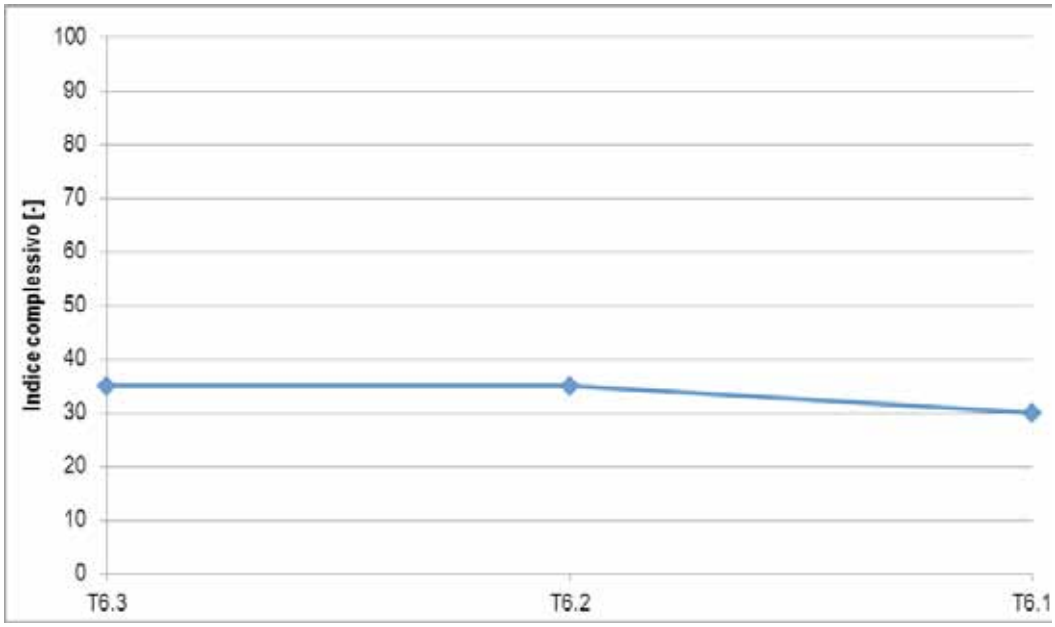


Figura 521 - Andamento dell'indice di impatto lungo il tratto di fiume Po di interesse.

22.3.5 Sintesi dei risultati

Le analisi condotte sono state finalizzate alla stima dei potenziali impatti delle opere in progetto sul sistema fluviale, in relazione allo stato ambientale attuale e agli obiettivi del Piano di Gestione del Distretto idrografico del fiume Po e in generale della normativa vigente.

Come descritto in premessa, gli interventi di sistemazione del fiume Po proposti (corrente libera, regimazione) non sono tali da incidere direttamente sulla qualità delle acque del fiume; tuttavia le modificazioni indotte ai parametri idraulici nei tratti di interesse, prevalentemente per quanto riguarda la soluzione di regimazione, possono potenzialmente indurre effetti indiretti sia sulle componenti fisico-chimiche che su quelle biologiche.

Per una corretta analisi degli effetti che tali "sollecitazioni" idrodinamiche (variazione dei parametri idraulico-strutturali, cioè aree bagnate, altezze d'acqua, velocità) possono provocare sulle componenti di qualità chimico-fisica e biologico-ecologica è necessario raggiungere un livello di dettaglio, ricorrendo anche a strumenti modellistici avanzati, assai maggiore di quello che caratterizza una progettazione a livello preliminare.

Per poter comprendere adeguatamente il funzionamento atteso del sistema e nel contempo riuscire ad estendere l'analisi sull'intero tratto di studio del fiume Po (da Isola Serafini all'incile del Po di Goro) si è proceduto quindi mediante un'analisi approfondita su un singolo sito pilota rappresentativo, con allestimento di un modello numerico idrodinamico-ecologico di elevato dettaglio calibrato sulla base di indagini dirette in sito.

Dall'analisi dei risultati ottenuti (da modello, indagini in sito e analisi del quadro conoscitivo pregresso) sono stati individuati degli indicatori che possano esprimere la presenza e l'entità dei possibili impatti. È stata quindi condotta un'analisi parametrica in funzione di questi indicatori a scala dell'intero tratto di studio, suddiviso in sottotratti omogenei, giungendo a determinare per ciascuno di questi ultimi un grado di potenziale impatto che permette di individuare i possibili aspetti di criticità.

I citati indicatori, in grado di oggettivare il grado di impatto atteso per ogni tratto esaminato, riguardano in sintesi i seguenti elementi:

- percentuale di aree caratterizzate da condizioni di deflusso a bassissima energia (fortemente rigurgitate), parametro individuato dai risultati del modello idroecologico come un importante indicatore di potenzialità di decadimento della qualità delle acque (in particolare per rischio di rilevante riduzione della concentrazione di ossigeno disciolto) - IFRD;
- percentuale di aree caratterizzate da altezze d'acqua relativamente modeste (inferiori a 1 m), rappresentative di habitat marginali nell'area fluviale del Po (correnti a bassa profondità, lanche, aree laterali), di pregio in quanto maggiormente idonee per la vita dei pesci giovani e di piccola taglia, degli anfibi, delle comunità macrobentoniche e per lo stazionamento dell'avifauna. Un ampliamento di tali aree può risultare un effetto positivo delle opere in progetto, mentre al contrario una banalizzazione dell'alveo con innalzamento di tutti i livelli provoca la perdita di queste aree di maggior pregio per la biodiversità - ILVL;
- differenziazione nel tratto dei valori del numero di Froude e quindi, in senso lato, dei diversi habitat o condizioni idrodinamiche di riferimento - ISMP;
- persistenza nel tempo degli effetti prodotti (da confronto tra la Q355 e la Q182) - IPIM;
- indice di "gradimento" da parte dell'ittiofauna, considerando schematicamente le curve di idoneità per l'ittiofauna di una specie target rappresentativa, secondo una metodologia di analisi affine a quella dei microhabitat fluviali, secondo la quale si effettua una stima dell'idoneità del tratto per la vita di una specie bersaglio assunta a rappresentare l'intero sistema biologico del corso d'acqua, basandosi sull'assunzione che la qualità e la diversificazione degli habitat acquatici siano valutabili, in funzione della portata defluente, anche in base a parametri correlati allo stato morfologico ed idraulico del corso d'acqua - IHAB.

La valutazione su ciascun tratto omogeneo dell'indice di impatto complessivo deriva dalla somma dei punteggi degli indicatori descritti (IFRD, ILVL, ISMP, IPIM e IHAB, cfr. capitolo 8.3.2).

Le analisi sono state condotte per entrambi gli scenari di progetto in tutti i sottotratti.

I risultati ottenuti sono però presentati solo per la configurazione di progetto maggiormente significativa, in quanto:

- per i primi cinque macrotratti (cfr.Tabella 176), la sistemazione a corrente libera produce risultati

sostanzialmente identici a quelli di stato attuale dal punto di vista dell'idrodinamica, per cui il confronto è stato condotto con riferimento alla sola condizione di regimazione;

per il tratto terminale compreso tra l'ultima traversa (Stienta, tratto T5.1) e l'incile del Po di Goro (tratto T6.1) si presenta invece il confronto con la sola configurazione di progetto corrispondente alla sistemazione a corrente libera, in quanto la soluzione di regimazione non prevede variazioni in questo tratto rispetto allo stato attuale.

Nel seguito si forniscono rappresentazioni di sintesi che uniscono i risultati dei due scenari, fornendo sostanzialmente un confronto delle condizioni più gravose di progetto per l'intero tratto in esame.

Si evidenzia innanzitutto come l'analisi parametrica sia stata basata sui risultati del modello idrodinamico morfologico predisposto dal Servizio 1 del presente progetto (*Approfondimento delle analisi di trasporto solido e di sicurezza idraulica relative ai progetti di regimazione e sistemazione a corrente libera del fiume Po*).

I dati acquisiti sono relativi alla configurazione del modello con simulazioni condotte su un periodo di riferimento di 2 anni (03/07/2007-03/07/2009), caratterizzato da un primo anno di deflussi relativamente stabili e da un secondo anno più "vivace", con diversi eventi di intensità tale da incidere sull'evoluzione morfologica del corso d'acqua.

Sono stati considerati 2 istanti temporali della simulazione:

- il primo nel periodo iniziale, con portata di magra (circa corrispondente alla Q355);
- il secondo dopo circa un anno di simulazione dal primo, con portata prossima alla Q182.

Si evidenzia come, trattandosi di un modello morfologico, la batimetria dell'alveo inciso subisca delle modificazioni nel tempo anche piuttosto rilevanti, che variano tra le tre configurazioni di stato attuale e progetto. Mentre per la Q355 è possibile assumere una sostanziale equivalenza del fondo alveo, non essendo ancora intercorsi rilevanti eventi, i fondali dei diversi scenari con la Q182 sono differenti, per cui l'analisi eseguita tiene anche implicitamente conto delle modificazioni indotte a livello morfologico.

L'indicatore **IFRD** considera come indicatore di potenzialità di decadimento della qualità delle acque la presenza preponderante di aree caratterizzate da Fr molto bassi (Fr<0,08) con netto incremento di queste ultime nella condizione di progetto rispetto allo stato attuale.

Per effetto degli interventi in progetto, in ogni macrotratto spostandosi da monte verso valle (sito di ubicazione della traversa nella configurazione di regimazione) si osserva una tendenza all'incremento di tali aree, con acque quasi ferme con bassissima energia.

In generale gli incrementi della percentuale di area caratterizzata da numero di Froude inferiore a 0,08 sono maggiori in corrispondenza delle traverse e decrescono verso monte nel tratto compreso tra opere successive.

Si osserva dal grafico di Figura 522 come l'effetto dei sostegni sia quello di portare l'estensione percentuale di tali aree a livelli prossimi (superiori) a quelli riscontrabili già allo stato attuale nel tratto subito a monte del delta (T6.1, incile del Po di Goro), ovvero percentuali comprese tra l'80% e il 100% a fronte di percentuali medie allo stato attuale dell'ordine del 20%.

I tratti maggiormente svantaggiati sono quelli posti subito a monte delle traverse; l'effetto a valle dell'ultima traversa è sostanzialmente trascurabile.

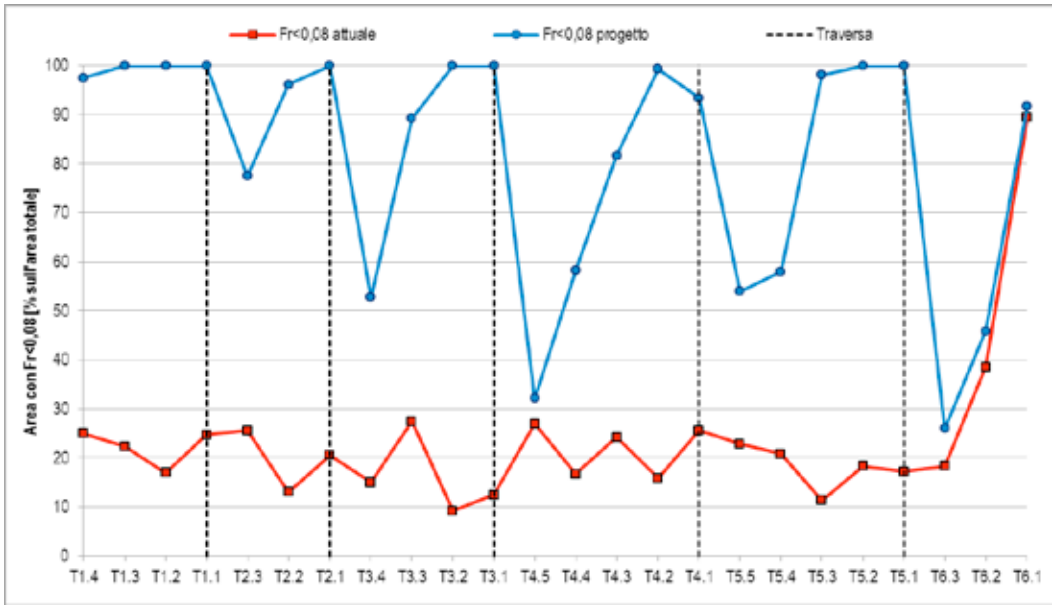


Figura 522 -Andamento dell'area percentuale caratterizzate da Fr<0,08 allo stato attuale e di progetto.

Relativamente all'idoneità del tratto per la vita della specie ittica di riferimento, espressa mediante la quantità ADP [m2], "Area Disponibile Ponderata" calcolata per il substrato unico di riferimento (sabbia), si osserva come per gli esemplari adulti (di maggiore taglia) si verifichi generalmente un incremento delle aree idonee rispetto alla condizione attuale, con picchi in corrispondenza delle traverse, in quanto tali individui sono favoriti dalla presenza di aree con maggiore profondtà.

Viceversa, l'idoneità alla vita degli esemplari giovani (ovvero di piccola taglia), che prediligono tiranti idrici inferiori, viene influenzata in modo variabile e discontinuo dalla presenza dei sostegni (cfr. Figura 524), in quanto si perdono alcune aree di gradimento attuali, dove il livello idrico cresce significativamente, ma nel contempo possono essere interessate del deflusso nuove aree che al momento non risultano bagnate (comprendendo anche l'eventuale riattivazione di lanche).

Nel complesso l'indice IMHB evidenzia un incremento significativo delle ADP nella situazione di progetto. Una contenuta riduzione si osserva solamente a valle dell'ultima traversa, tra Stienta e l'incile del Po di Goro, e nel tratto omogeneo T4.5.

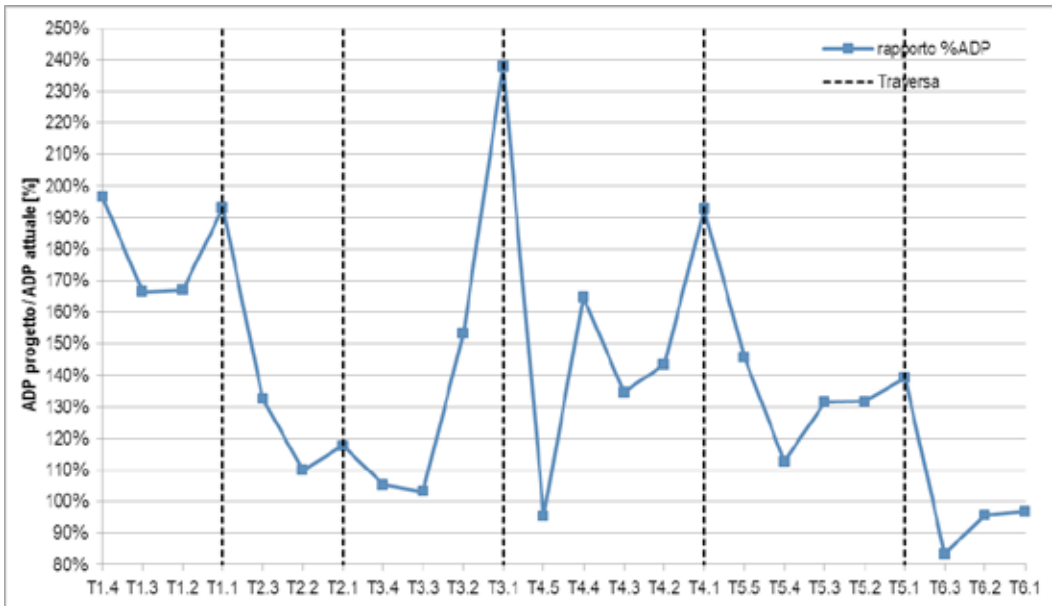


Figura 523 Andamento del rapporto percentuale tra le Aree Disponibili Ponderate tra stato attuale e di progetto.

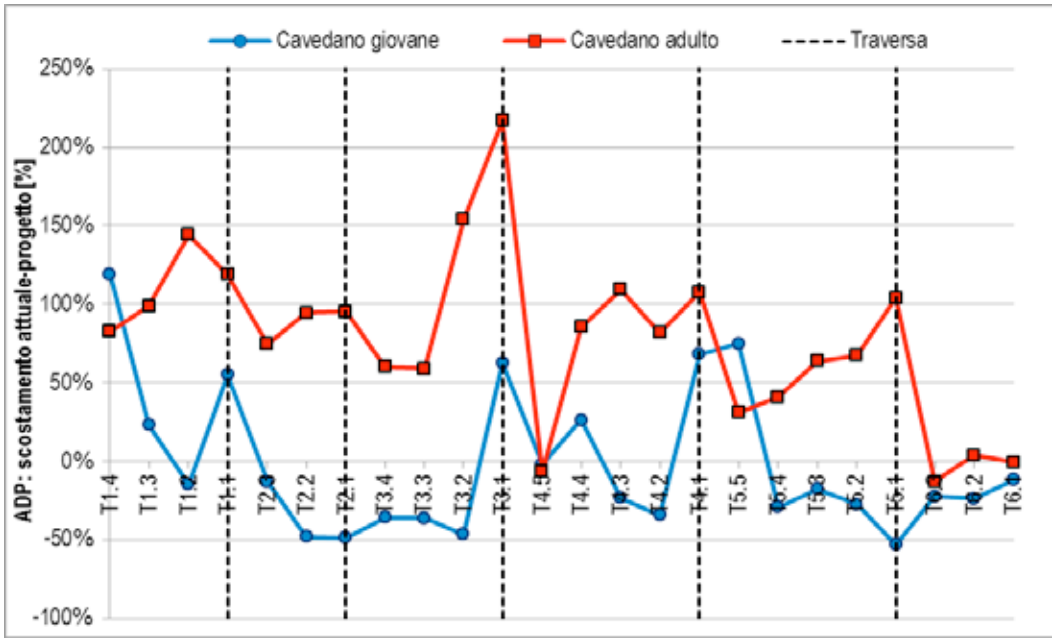


Figura 524 Scostamento rispetto alla condizione attuale della percentuale di ADP per la specie target.

L'analisi dell'indicatore ILVL mostra una generale riduzione delle aree caratterizzate da altezze d'acqua inferiori ad un metro, come conseguenza dell'effetto di rigurgito provocato dai manufatti in progetto, con l'eccezione di 4 sottotratti in cui invece (nella configurazione di regimazione) prevale l'effetto di estensione delle aree bagnate.

Per ogni tratto compreso tra due traverse successive l'indicatore di impatto ISMP evidenzia una generale riduzione dell'indice di Simpson (minore diversità di ambienti idrodinamici), massima subito a monte del sostegno (condizione più banalizzata) e man mano ridotta spostandosi più a monte; dal grafico in Figura 525 si osserva come la differenza percentuale tra stato attuale e di progetto presenti alcuni valori positivi immediatamente a valle delle tre traverse più di valle (miglioramento in termini di aumento di diversità).

La situazione nel tratto terminale, oggetto di sistemazione a corrente libera, mostra una sostanziale equivalenza tra progetto e stato attuale, con leggera riduzione (<10%).

Dall'analisi degli indici di persistenza IPI1 e IPI2, che dipendono dai parametri di profondità, velocità e numero di Froude, si osserva come le variazioni indotte sui parametri idrodinamici si mantengano abbastanza stabilmente sull'intero tratto su valori compresi tra 0,5 e 1,0, indicativi quindi di una discreta persistenza (Figura 526).

L'indice IPIM si mantiene sostanzialmente su questo andamento, valido anche per il tratto terminale fino all'incile del Po di Goro.

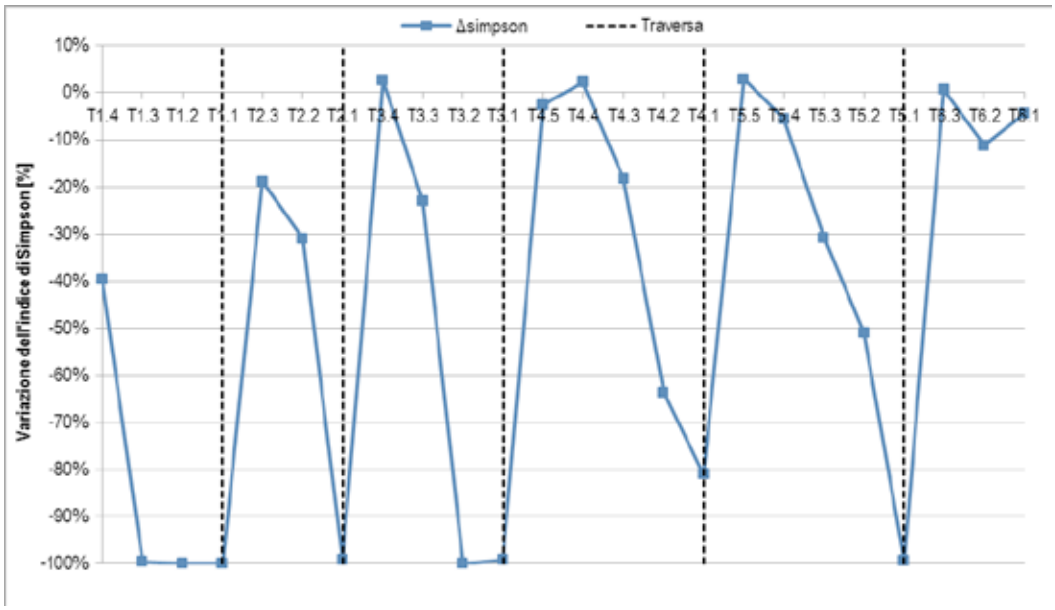


Figura 525 - Andamento della differenza percentuale dell'indice di Simpson tra stato attuale e di progetto.

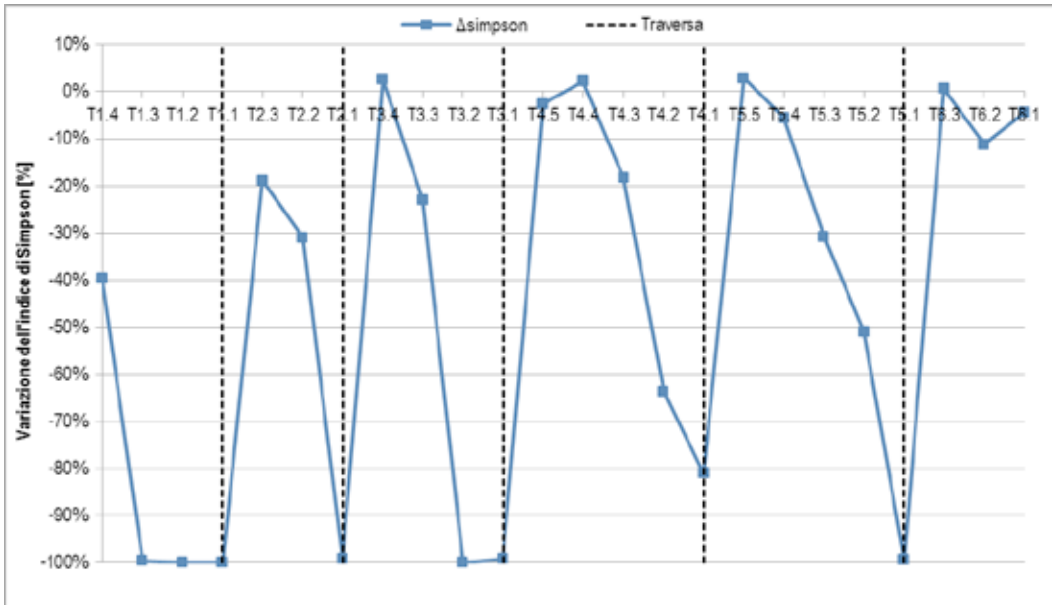


Figura 526 - Andamento degli indici di persistenza idrodinamici IPI1 e IPI2.

In Figura 527 è riportato l'andamento del punteggio dell'indice di impatto complessivo (relativamente al comparto della qualità delle acque superficiali) per i vari sottotratti omogenei.

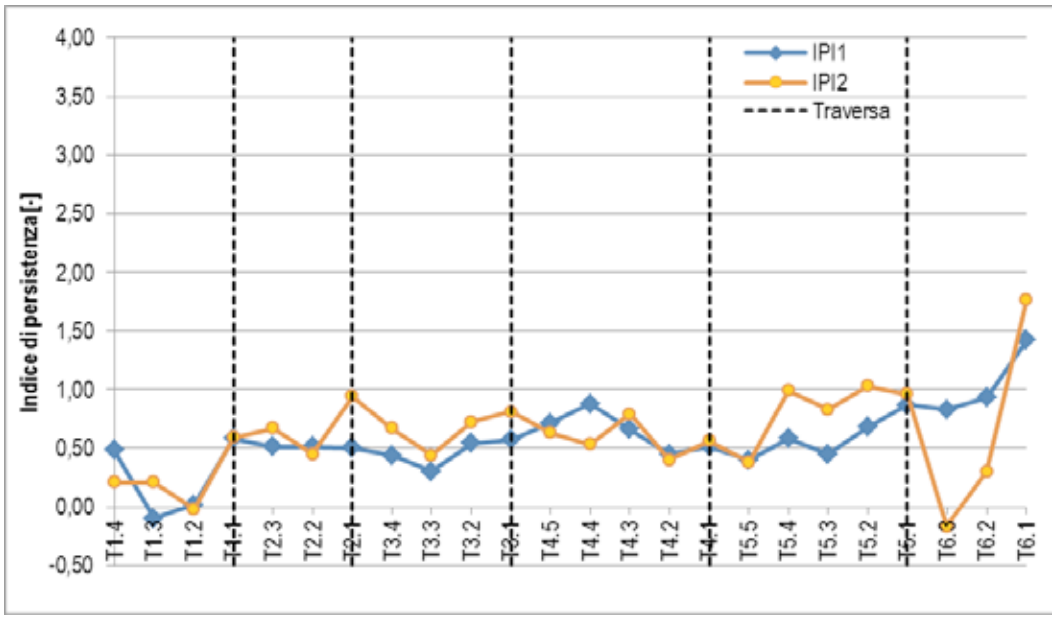


Figura 527 - Andamento dell'indice di impatto lungo il tratto di fiume Po di interesse

Si osserva una discreta variabilità, con incrementi del valore in corrispondenza delle traverse ed una generale riduzione spostandosi verso monte nel tratto compreso tra due sbarramenti.

Includendo due sottotratti (T4.4, T5.5) in cui il grado di impatto atteso è nullo o debolmente positivo, per circa la metà (46%) dei sottotratti in cui è stato suddiviso il tratto di fiume Po oggetto della sistemazione, compreso l'intero tratto a valle dell'ultima traversa in progetto fino all'incile del Po di Goro, il grado di impatto atteso è da ritenersi modesto (punteggio dell'indice inferiore a 40), e per circa un terzo dei tratti (33%) moderato (indice tra 40 e 60).

Per circa il 20% dei tratti invece l'indice restituisce un grado di impatto potenziale relativamente elevato (indice > 60): si tratta in particolare delle aree a monte delle traverse 2 (Viadana), 3 (Borgoforte) e 5 (Stienta). Si nota come i tratti di maggiore impatto potenziale siano tutti da mettere in relazione con l'effetto delle traverse nella configurazione progettuale di regimazione.

22.3.6 Definizione degli interventi di mitigazione

Per quanto osservato nel capitolo precedente, sugli aspetti di qualità delle acque superficiali ci si attende un impatto potenziale da parte delle opere in progetto sostanzialmente nullo per la configurazione di sistemazione a corrente libera, e relativamente modesto per l'ipotesi di regimazione, con l'eccezione particolare di alcuni tratti a monte delle traverse 2 (Viadana), 3 (Borgoforte) e 5 (Stienta).

Per questi tratti appare opportuno quindi un approfondimento di indagine nell'ambito delle future fasi progettuali per la verifica più accurata dei potenziali fattori di impatto e la corretta impostazione degli interventi.

Si precisa comunque come per tutte le traverse in progetto si sia riscontrato un elemento di potenziale criticità nel rilevante effetto di rigurgito prodotto nel tratto subito a monte (rif. Figura 524), in particolare per quello che riguarda la presenza totale o largamente preponderante di aree con corrente lenta a bassissima energia, fattore che potrebbe determinare, in particolare nelle condizioni più critiche di magra estiva, decadimenti della qualità delle acque.

In relazione ai risultati ottenuti dal modello idrodinamico-ecologico, per quanto riguarda i processi trofici il sistema si manterrebbe lontano da condizioni che possano innescare l'insorgere di fenomeni di eutrofia; le concentrazioni di fitoplancton, zooplancton e biomassa algale oscillerebbero su valori non dissimili da quelli di stato attuale. Il sistema rappresentato nel sito pilota è verosimilmente fosforo-limitato, visto l'andamento delle concentrazioni di nutrienti; la crescita dei microorganismi risulta contenuta entro range sostenibili dall'ecosistema senza deviare significativamente verso condizioni

a rischio di eutrofia.

Le rilevanti diminuzioni riscontrate nell'ossigeno disciolto nell'area più prossima alla traversa (attese a parità di condizioni anche a tergo delle altre traverse, in funzione dei risultati dell'analisi parametrica) denuncerebbero invece il possibile insorgere di condizioni di anossia (con raggiungimento di valori pari o inferiori a quelli tipicamente assunti come limite che consente la vita dell'ittiofauna), oltre a essere responsabile di un decadimento a "cattivo" del livello di qualità espresso dal LIMeco (con riferimento a questo singolo valore e non alla media dell'anno).

Il perdurare di condizioni critiche di questo tipo (dalle simulazioni si manterrebbero quasi per l'intero mese di agosto) potrebbe risultare causa anche di liberazione in acque di sostanze tossiche dal fondale, in presenza di significativi depositi organici che andrebbero incontro a decomposizione anaerobica.

Si precisa innanzitutto come la caratterizzazione svolta sui sedimenti attuali non abbia denunciato la presenza di contaminanti eccedenti le soglie definite dal D.Lgs.152/06; il materiale d'alveo risulta però prettamente sabbioso. In presenza di depositi anche limosi (che potrebbero sedimentare in virtù della riduzione di velocità) maggiori concentrazioni di inquinanti potrebbero essere presenti, con rischio di rilascio in acqua in presenza di fenomeni di acidificazione.

Dai risultati del modello morfologico sviluppato dal Servizio 1 risulta che il possibile incremento di deposito di sedimento coinvolge tratti piuttosto estesi a monte della prima traversa, mentre le traverse più a valle risulterebbero più "trasparenti" al trasporto solido (in rapporto alle evoluzioni morfologiche attuali). Orientativamente una stima degli incrementi di deposito oscillerebbe sul milione di m^3/anno a monte di Roccabianca e sui 200.000 m^3/anno a monte di Viadana, mentre nei tratti successivi si avrebbe una tendenza prevalente all'erosione, con influenza delle traverse solo a livello locale (distanze dell'ordine dei 5 km dalle opere), interessando volumi più modesti e di entità molto dipendente dalla gravosità degli eventi di piena considerati.

In relazione quindi al potenziale rischio sopra esposto non si ravvisano condizioni di rilevante criticità, considerando anche come la frazione più fine che tenderebbe eventualmente a depositarsi nel primo tratto sarebbe verosimilmente asportata quasi integralmente in occasione delle aperture delle traverse in condizioni di portata più elevata. Tenendo conto inoltre che la presenza di limo è particolarmente rilevante soprattutto nelle fasi di morbida e piena, nelle quali le traverse risulterebbero aperte, l'ipotesi di una significativa variazione della granulometria dei fondali è da ritenersi poco verosimile, se non eventualmente su aree molto localizzate.

In linea generale proprio la presenza di periodiche fasi di apertura degli sbarramenti contestuali alle fasi idrologiche di maggiore portata, che "azzerano" le situazioni di progressiva deviazione rispetto allo stato attuale conseguenti alla presenza degli sbarramenti, è una buona garanzia contro lo sviluppo di rilevanti processi eutrofici o comunque di degenerazione della qualità delle acque.

Per tale motivo una prima rilevante misura di mitigazione appare essere quella di considerare una portata limite per l'apertura delle traverse pari a 1200 m^3/s (scenario già introdotto nelle analisi di progetto da parte del Servizio 1 in luogo degli originariamente previsti 2000 m^3/s).

Si consideri che il valore di 1200 m^3/s rappresenta una condizione idrodinamica non molto dissimile da quella indagata nel presente studio come Q182; i tempi di permanenza nell'invaso a monte delle traverse di condizioni di acqua sostanzialmente ferma (fattore che può determinare il progressivo deterioramento qualitativo) sono quindi ridotti dalla maggiore frequenza di aperture.

In presenza di fasi estive di magra particolarmente pronunciate e siccitose potrebbe inoltre risultare opportuno procedere con delle aperture almeno parziali delle paratoie di ritenuta, con l'obiettivo di innescare correnti idriche nelle porzioni di invaso più lontane dalle aree di flusso stabile (ovvero dai flussi in direzione dell'impianto idroelettrico e/o della conca di navigazione), riossigenando le acque e asportando/rimiscelando eventuali concentrazioni di inquinanti o microorganismi.

Tali operazioni potrebbero essere coordinate con possibili rilasci effettuati nell'ambito di azioni di contrasto alla risalita del cuneo salino.

Poiché le eventuali aperture per finalità "ambientali" degli sbarramenti sono in contrasto con gli

obiettivi principali del progetto, ovvero consentire la navigabilità del tratto e, in subordine, permettere una valorizzazione energetica della portata, risulterebbe conveniente prevedere un sistema di monitoraggio della qualità ambientale delle acque nel tratto a monte delle traverse.

Tale sistema dovrebbe consistere innanzitutto in periodiche campagne di indagine in sito di specifici indicatori individuati in fase di progetto, per verificare eventuali modificazioni progressive dello stato qualitativo in condizioni idrologiche potenzialmente critiche.

Tali campagne fornirebbero i dati di input per un modello idrodinamico-ecologico analogo a quello sviluppato per il presente studio, che, realizzato in fase progettuale, costituirebbe poi un fondamentale strumento di supporto alle decisioni in fase di esercizio (periodicamente aggiornato o considerando una serie standard di possibili scenari evolutivi), permettendo sia di valutare la necessità di effettuare delle aperture, sia di definire le modalità delle stesse (in termini di durata, entità e di quali elementi di ritenuta utilizzare). Si ridurrebbero pertanto al minimo i costi e i disservizi dovuti alle aperture stesse, anche evitando di metterle in atto qualora non se ne ravvisi la necessità.

ALLEGATI:

Allegato 1 Rete di scolo e di derivazione e relative opere di regolazione interferenti con l'assetto di progetto;

Allegato 2 Soggiacenza media minima – stato attuale;

Allegato 3 Soggiacenza media minima – stato di progetto;

Allegato 4 Interazioni tra progetto di regimazione del fiume Po e falda freatica;

Allegato 5 Aree protette e Rete Natura 2000;

Allegato 6 Ambienti ripariali – stato attuale;

Allegato 7 Ambienti ripariali – assetto di progetto;

Allegato 8 Modello 3D idrodinamico e ecologico per analisi di dettaglio sul sito pilota;

Allegato 9 Report indagini in sito - Campagna Marzo 2015;

Allegato 10 Report indagini in sito - Campagna Agosto 2015;

Allegato 11 Schede di sintesi dell'analisi per tratti omogenei dell'incidenza potenziale sulle qualità delle acque superficiali.

Improvement of Northern Italy
Waterway System

365 PO RIVER SYSTEM

ATTIVITÀ N. 4: IMPATTO SOCIOECONOMICO DEL POTENZIAMENTO DELLA NAVIGABILITÀ DEL FIUME PO

-

ANALISI BENEFICI/COSTI E ANALISI MULTI-CRITERIA RISULTATI PRELIMINARI

I RESPONSABILI
Dott. Ing. Bruno Mioni
Dott. Ing. Ivano Galvani
Dott. Ing. Luigi Mille
Dott. Ing. Marcello Moretti

EUROSPORTELLO VENETO
Dott. Francesco Pareti
Dott. Urb. Lorenzo Carapellese
Ing. Marco Pascucci
Dott. Luca Pavanato

Cofinanziato dall'Unione europea
Rete transeuropea di trasporto (TEN-T)

23 CARATTERISTICHE DEI BACINI ECONOMICI POTENZIALMENTE INTERESSATI AL TRAFFICO FLUVIO-MARITTIMO

23.1 COMPARTO PRODUTTIVO

La crescente affermazione della logistica integrata e le potenzialità del trasporto plurimodale sottolineano il ruolo fondamentale assunto dagli scali fluvio – marittimi, sia come anelli della catena intermodale sia come centri logistici in grado di offrire servizi e valore aggiunto.

Oggi le idrovie, le vie fluviali e il cabotaggio (la navigazione in marea ridosso delle coste) rappresentano una risorsa importante economicamente e ecologicamente. Il loro sviluppo può ridurre infatti l'inquinamento ambientale causato dal traffico stradale.

Secondo un calcolo dell'Organizzazione marittima internazionale, **una chiatta da 1.350 tonnellate equivale a ben 50 Tir o 67 carri ferroviari**. Questa chiatta con 5 litri di gasolio percorre 500 km, mentre un solo Tir con 5 litri di gasolio ne percorre appena 100. Quindi in sintesi, **una chiatta da 1.350 tonnellate per ogni giorno di funzionamento evita 1,8 kg di polveri sottili, 10,8 kg di idrocarburi incombusti e 8 tonnellate di anidride carbonica**. C'è poi un risparmio in termini di costi: una singola chiatta può trasportare lo stesso numero di container di decine di autocarri, con un dispendio di carburante complessivamente minore.

Il trasporto merci sul fiume ha mantenuto una certa vivacità fino agli anni '70, per poi calare progressivamente, dal momento che l'efficienza e l'economicità del trasporto su gomma hanno portato molti imprenditori ad abbandonare l'idrovia.

Le merci attualmente trasportate sono merci povere, con una grande prevalenza degli inerti, delle argille e delle sabbie e una presenza significativa di prodotti chimici e scarti di lavorazione, oltre che di gas combustibile, e una presenza minima di componenti (trasporti speciali) e rinfuse secche. La maggior parte del trasporto, sostanzialmente la quasi totalità del trasporto di inerti, argilla e sabbia, avviene infra-fiume e supera l'80% del totale.

Le **relazioni fiume-mare e mare-fiume e quelle mare-interno e interno-mare**, più o meno di pari entità, costituiscono la restante parte del trasporto idroviario, per un totale nel 2014 di **263.000 tonnellate**. Nel 2010 c'è stato un aumento evidente delle merci trasportate, circa il 20% in più rispetto all'anno precedente. Il 2011 purtroppo non ha confermato la tendenza positiva e il 2012 ha registrato un ulteriore peggioramento della crisi economica, che ha ridotto la produzione e di conseguenza l'attività di trasporto. Il 2013 è stato invece caratterizzato da un buon incremento rispetto al 2012, con valori in linea con gli anni precedenti, attestati sulle 400.000 tonnellate. Nel 2014 si è registrato un a marcata flessione, le tonnellate si sono quasi dimezzate.

Da alcuni anni il settore dei trasporti ha iniziato a porsi delle domande che vanno anche oltre i numeri, tra le quali uno sviluppo duraturo e i problemi indotti dalla crisi economica. Studi recenti evidenziano che **sarà sempre più importante trasportare meglio, non solo trasportare molto, la qualità prima della quantità**. Bisogna insistere sulla necessità di prestare maggiore attenzione alla qualità dei servizi proposti, alla qualità dei contratti, alla qualità ambientale e al valore aggiunto determinato dalle tipologie di trasporto. La rete idroviaria padano veneta è ben definita e, anche se in presenza di limiti e vincoli, ci sono le condizioni per uno sviluppo del trasporto via acqua.

TRASPORTO MERCI – SISTEMA IDROVIARIO PADANO / VENETO				
	2011 (tonnellate)	2012 (tonnellate)	2013 (tonnellate)	2014 (tonnellate)
Porto di Rovigo (via Fissero)	13.767 (sfarinati) s	/	121.892 (sfarinati) s	45.000 (sfarinati) s
Canale Chioggia-Brondolo				2.500 (merci varie)s/d
Porto di Mantova (via Fissero)	83.250 (sfarinati) s 46.000 (coils/cont) s	22.525 (sfarinati) s 70.000 (container) s/d	75.000 (sfarinati) 40.000 (container) s/d	45.000 (sfarinati) s 25.000 (urea) s 10.000 (container) s/d
Attracchi industriali Mantova (via Fissero e Po)	9.848 (benzine) d 8.747 (colli ecc.) d	19.054 (benzine) d 3.446 (colli ecc.) d	17.510 (benzine) d 4.014 (acetone) d 4.000 (colli ecc.) d	31.000 (acetone) d 4.500 (colli ecc.)d
Banchina di Viadana (via Po)	49.919 (metanolo) s	30.188 (metanolo)s	9.780 (metanolo) s	30.000 (metanolo) s
Porto di Cremona (via Po)	19.000 (sfarinati) s 7.026 (rottame fe) s 2.534 (colli ecc.) d	7.020 (sfarinati) s 1.063 (colli ecc.) d	2.664 (colli ecc.) d	/
Attracchi industriali Cremona (via Po)	/	/	/	/
Banchine idrovia ferrarese	/	/	/	/
Banchine mantovane: **Roncoferraro** (Fissero) **S.Benedetto Po, Revere** (Po)	160.000 (inerti)	126.000 (inerti)	120.000 (inerti) valore stimato	70.000 (inerti) valore stimato
TOTALE	**400.091**	**279.296**	**394.860**	**263.000**
Attracchi industriali privati sul Po	1.000.000 (inerti del Po) valore stimato	800.000 (inerti del Po) valore stimato	valore non rilevato valore stimato	300.000 (inerti del Po) valore stimato

s = salita; d = discesa

Armamento utilizzato:

per il Po e Fissero / Tartaro / Canalbianco quasi esclusivamente convogli a spinta, mediamente in numero di 4 (spintore più chiatta) con portata media 1000/1200 t; n. 1 fluviomarittima con portata media 1300 t per il Po; circa 10 motonavi per il trasporto degli inerti del Po

Tabella 178 – Il traffico esistente sul sistema idroviario padano-veneto Fonte: QUIPO_N.1/2_GENNAIO/MAGGIO 2015

Il **sistema idroviario padano-veneto**, di cui il Po costituisce l'asse portante, ha un'estensione di 957 km, di cui 564 utilizzabili a fini commerciali:

- il fiume Po da Cremona a Porto Tolle: 275 km (presso la foce);
- il primo tratto del canale MI-CR-PO (fino a Pizzighettone): 14 km;
- il fiume Mincio da Mantova al Po (via Governolo): 20 km;
- il Fissero - Tartaro - Canalbianco - Po di Levante (incile): 117 km;
- il Canale Po Brondolo - Laguna Veneta: 19 km;
- il Po di Levante: 19 km;
- la Laguna Veneta (da Chioggia a Venezia): 30 km;
- l'Idrovia Ferrarese (Pontelagoscuro - Porto Garibaldi): 70 km.

Altri 37 km (da Cremona a Piacenza) potranno aggiungersi una volta realizzata la nuova conca di Isola Serafini, che permetterà di superare lo sbarramento della centrale idroelettrica presente (conclusione dei lavori prevista a fine 2016).

Porti commerciali presenti lungo l'asta del Po: Cremona; Mantova; banchina fluviale di Boretto; Rovigo; Revere e Ostiglia in Lombardia. Piacenza e Ferrara inseriti nelle programmazioni regionali. Conche: Isola Serafini (iniziati i lavori per la realizzazione della nuova conca); Cremona; Governolo e San Leone; Pontelagoscuro; Volta Grimana; 3 conche lungo l'idrovia ferrarese; 5 conche lungo il canale Fissero Tartaro Canalbianco e 3 lungo il Po Brondolo. Numerosi porti e approdi turistici e discreto numero di banchine private a uso commerciale. Circa 0,8 milioni di contributi regionali nel 2014. Circa 191 milioni di euro di finanziamenti statali dal 1990; oltre 47 milioni dalla Regione dal 1991 al 2014.

Di seguito viene analizzato il **territorio dell'area padana potenzialmente interessato a relazioni di tipo fluvio-marittimo** con il porto di Ravenna, Venezia, Chioggia e con i principali porti adriatici, frazionato per province: Ferrara, Reggio Emilia, Verona, Mantova, Cremona e Rovigo.

A fronte dei risibili apporti all'economia nazionale da parte del trasporto via acque interne, il territorio

da esso coinvolto è quello che produce: il 5,2% del valore aggiunto italiano, sono sede del 10,1% delle imprese attive italiane e genera il 7,8% delle esportazioni del nostro paese.

	Reggio nell'Emilia	Ferrara	Rovigo	Verona	Cremona	Mantova
Regione:	Emilia Romagna	Emilia Romagna	Veneto	Veneto	Lombardia	Lombardia
Superficie:	2.291,26 Km^2	2.635,12 Km^2	1.819,35 Km^2	3.096,39 Km^2	1.770,46 Km^2	2.341,44 Km^2
Comuni:	45	24	50	98	115	69
Abitanti:	534.258	355.101	244.062	921.717	362.141	415.147
% di stranieri residenti:	14	8	8	12	11	13
Indice di vecchiaia (Numero di over 64/Numero di under 15)*100:	134	239	208	142	170	162
Imprese registrate:	56.460	36.851	28.495	96.842	30.406	42.291
Densità imprenditoriale (Numero di imprese per 100 abitanti):	10,6	10,4	11,7	10,5	8,4	10,2
% di società di capitale:	21,7	15,7	16,1	22,3	17,1	17,2
Tasso di disoccupazione 15-64 anni:	6,0	14,4	8,8	6,0	9,1	9,2
Tasso di disoccupazione 15-24 anni:	26,3	53,1	33,0	18,5	37,4	22,0
Fonte: Geo Smart						

Tabella 179 - Caratteristiche principali delle province. Anno 2013

	CREMONA	FERRARA	MANTOVA	REGGIO EMILIA	ROVIGO	VERONA	Totale province	ITALIA
Settore	4.170	8.106	8.105	6.284	7.445	16.109	**50.219**	**757.758**
A Agricoltura, silvicoltura pesca	10	9	25	24	6	62	**136**	**3.392**
B Estrazione di minerali da cave e miniere	3.067	2.684	4.391	6.859	2.759	9.018	**28.778**	**506.782**
C Attività manifatturiere	61	41	55	66	37	134	**394**	**10.077**
D Fornitura di energia elettrica, gas, vapore e aria condiz...	35	56	51	64	57	137	**400**	**9.722**
E Fornitura di acqua; reti fognarie, attività di gestione d...	4.810	4.903	6.613	11.701	3.491	14.099	**45.617**	**774.124**
F Costruzioni	6.343	7.074	8.525	10.187	5.230	18.955	**56.314**	**1.412.349**
G Commercio all'ingrosso e al dettaglio; riparazione di aut...	734	936	932	1.491	699	2.973	**7.765**	**153.994**
H Trasporto e magazzinaggio	1.818	2.219	2.107	2.796	1.501	5.859	**16.300**	**366.559**
I Attività dei servizi di alloggio e di ristorazione	471	499	583	929	293	1.604	**4.379**	**113.856**
J Servizi di informazione e comunicazione	661	601	785	844	402	1.855	**5.148**	**112.621**
K Attività finanziarie e assicurative	1.447	1.659	1.798	3.035	1.134	5.327	**14.400**	**247.219**
L Attività immobiliari	750	906	894	1.663	573	2.967	**7.753**	**174.223**
M Attività professionali, scientifiche e tecniche	693	809	802	1.129	538	2.200	**6.171**	**158.970**
N Noleggio, agenzie di viaggio, servizi di supporto alle imp...	1	-	0	-	-	-	**1**	**62**
O Amministrazione pubblica e difesa; assicurazione sociale...	109	133	86	169	65	338	**900**	**25.400**
P Istruzione	194	166	199	197	90	429	**1.275**	**33.071**
Q Sanità e assistenza sociale	361	505	325	567	245	790	**2.793**	**61.496**
R Attività artistiche, sportive, di intrattenimento e diver...	1.388	1.610	1.703	1.871	1.030	3.852	**11.454**	**223.190**
S Altre attività di servizi	-	-	-	-	-	1	**1**	**17**
T Attività di famiglie e convivenze come datori di lavoro p...								**4**
X Imprese non classificate	13	22	16	11	12	24	**98**	**3.527**
Grand Total	**27.136**	**32.938**	**37.995**	**49.887**	**25.607**	**86.733**	**260.296**	**5.148.413**

Fonte: Infocamere-Movimprese

Tabella 180 - Imprese attive nelle province. Anno 2014

MERCE	Cremona	Mantova	Verona	Rovigo	Reggio nell'Emilia	Ferrara	ITALIA
CA-Prodotti alimentari, bevande e tabacco	138.927.619	142.856.014	557.731.005	52.265.299	151.295.179	32.910.403	7.675.610.406
CB-Prodotti tessili, abbigliamento, pelli e accessori	36.745.439	237.711.221	339.420.476	23.069.829	301.586.586	16.974.793	11.401.410.765
CC-Legno e prodotti in legno; carta e stampa	26.313.030	23.635.967	61.410.968	7.284.827	23.006.486	7.174.208	2.046.017.050
CD-Coke e prodotti petroliferi raffinati	864.171	2.305.390	1.363.007	51.887	529.855	21.484	3.410.244.783
CE-Sostanze e prodotti chimici	101.307.771	171.142.439	59.966.609	43.182.983	71.455.021	131.771.305	6.487.528.189
CF-Articoli farmaceutici, chimico-medicinali e botanici	1.185.795	10.454.021	24.931.089	15.391.750	4.718.847	47.163	5.809.955.814
CG-Articoli in gomma e materie plastiche	38.528.350	52.176.298	249.103.735	25.099.776	256.117.767	23.884.565	5.851.375.890
CH-Metalli di base e prodotti in metallo, esclusi macchine e impianti	314.702.214	235.923.754	209.220.649	47.504.944	240.741.550	18.852.017	11.146.813.222
CI-Computer, apparecchi elettronici e ottici	7.318.354	8.639.534	22.948.996	12.890.992	52.794.318	11.694.512	3.545.115.284
CJ-Apparecchi elettrici	24.737.558	35.306.582	161.357.941	7.011.149	143.421.764	16.126.629	5.548.693.403
CK-Macchinari ed apparecchi n.c.a.	182.907.171	207.338.067	534.943.717	62.338.547	854.572.089	113.104.415	19.772.253.246
CL-Mezzi di trasporto	13.986.572	230.138.650	99.982.728	11.056.404	61.361.004	206.223.696	10.636.576.076
CM-Prodotti delle altre attività manifatturiere	24.301.976	50.635.968	52.494.291	16.569.702	29.962.590	4.103.036	6.149.299.382
Totale manifatturiero	**911.826.020**	**1.408.263.905**	**2.374.875.211**	**323.718.089**	**2.191.563.056**	**582.888.226**	**99.480.893.510**
Fonte: Istat							

Tabella 181 - Esportazioni manifatturiere nelle province. Anno 2014

23.2 PROVINCIA DI ROVIGO

23.2.1 Popolazione e territorio

Con **244 mila persone** (2013), la Provincia di Rovigo rappresenta il 5% della popolazione veneta, e lo 0,4% della popolazione italiana. I giovani fino a 14 anni sono l'11,4% della popolazione, uno dei valori più bassi in Italia (104° posto), mentre gli anziani con più di 64 anni costituiscono il 23,8% degli abitanti. Gli stranieri nel 2013 erano 19 mila, di cui il 24,8% minorenni. Il saldo demografico è stato attivo nel 2013 per 1.520 unità, grazie all'immigrazione, visto che sono morte in quell'anno 2.910 persone, un numero superiore rispetto alle 1.730 nascite. La speranza di vita alla nascita per gli uomini è di 78,7 anni, e di 83,7 per le donne. La superficie della Provincia di Rovigo è di **1.820 kmq,** il 9,7% della superficie del Veneto. In Italia questa Provincia è la 78^ per estensione. La Provincia di Rovigo è articolata in 50 comuni.

23.2.2 Tessuto imprenditoriale

Con **28.500 imprese registrate** (2013) la Provincia di Rovigo raccoglie il 5,8% delle imprese venete e lo 0,47% di tutte le imprese italiane. In Italia è al 78° posto per imprese registrate. La Provincia presenta una elevata quota di imprese agricole: 26,8% del totale. Quelle del commercio sono il 19,9%, quelle delle costruzioni il 13,5%, mentre quelle manifatturiere sono il 11,1%. Le imprese artigiane sono 7.050. Il tasso di natalità delle imprese, 7,7%, è superiore al tasso di mortalità (6,5%). Le unità locali con 50 o più addetti sono 129 (dati del 2011), ed occupano 14mila lavoratori, mentre le unità locali complessive sono 19.920, con 71mila addetti. L'anzianità media delle imprese attive è di 13,7 anni (2012).

Sono **2.428 le strutture ricettive** nella Provincia di Rovigo che offrono 29.180 posti letto (2012), circostanza quest'ultima che la pone al 53° posto nella classifica delle province italiane. Queste strutture hanno consentito 1,7 milioni di giornate di presenza di turisti (54° posto tra le province italiane), di cui 846mila di turisti stranieri (dati del 2012).

23.2.3 Mercato del lavoro

Con **104 mila occupati** (2013) la Provincia di Rovigo è al 76° posto in Italia per questo parametro. Significativa è la quota di occupati in agricoltura: 6,9%, mentre nell'industria erano impiegati il 24,7% dei lavoratori. I rimanenti lavorano nei servizi. 74mila erano i dipendenti, e 30mila gli autonomi. 9.800 erano nel 2013 le persone in cerca di occupazione, ovvero il 8,8% della forza lavoro (75° posto in Italia per intensità del tasso di disoccupazione). Il tasso di occupazione, pari al rapporto tra occupati e popolazione compresa tra 15 e 64 anni, è del 62,8% (34° posto in Italia).

23.2.4 Risultati economici

La Provincia di Rovigo ha prodotto nel 2013 **5,71 miliardi di euro di valore aggiunto**, circostanza che la pone al 75° posto tra le province italiane. Il valore aggiunto di Rovigo rappresenta il 4,3% di quello del Veneto e lo 0,41% del valore aggiunto italiano. Il valore aggiunto pro capite era nel 2013 di 23.470

euro, di poco superiore rispetto al valore italiano medio (23.190). Per questo parametro Rovigo è al 47° posto tra le province italiane. Il valore aggiunto della Provincia di Rovigo è stato realizzato nel 2012 per il 19,3% dall'industria, il 8,4% dalle costruzioni, il 5,3% dall'agricoltura, e la parte rimanente dai servizi.

L'attività della pesca e dell'acquacoltura nella Provincia di Rovigo rappresenta, per il tessuto economico sociale delle aree geografiche rientranti nel **distretto ittico**, un settore a forte rilevanza economica. La ridotta dimensione e l'eccessivo individualismo degli operatori della filiera rappresentano dei limiti che l'esistenza del distretto consente in parte di superare offrendo ad essi l'opportunità di presentarsi al mercato con la forza del settore e non con la debolezza della singola azienda. Il Distretto vanta rapporti privilegiati con tutti i mercati dell'Unione in maniera particolare con Francia, Germania e Spagna. La promozione dei prodotti del Distretto è garantita dall'assidua partecipazione alle più importanti fiere e manifestazioni di settore a livello internazionale. La filiera dell'ittico, composta dalle attività della pesca professionale e da imprese che operano nel settore della trasformazione e commercializzazione dei prodotti ittici, rappresenta una peculiarità dell'economia polesana.

Un altro settore di eccellenza è rappresentato dalla costruzione di giostre, spettacoli viaggianti, attrezzature per luna park, spettacoli pirotecnici, diffuso nell'area occidentale della provincia di Rovigo, soprattutto, nei Comuni di Melara e Bergantino, che alimenta il **distretto della giostra**.

23.2.5 Apertura dei mercati

Il saldo commerciale della provincia di Rovigo è stato nel 2013 positivo per 0,14 miliardi di euro, in conseguenza di **esportazioni pari a 1,3 mld** e importazioni per 1,2 mld. Le esportazioni della provincia di Rovigo hanno rappresentato il 2,5% delle esportazioni venete, e lo 0,34% delle esportazioni italiane, situazione che posiziona Rovigo al 64° posto in Italia. La quota più alta delle esportazioni (40,3%) proviene dal settore Metalmeccanico, seguito da Chimica, gomma, plastica (24,6%). Sul piano delle destinazioni dell'export della provincia di Rovigo, prevale l'Europa (77,1%), seguita dall'Asia (14,8%) e dall'America (4,2%). La propensione all'export, ovvero il rapporto tra export e Pil, è stata nel 2013 pari al 22,9% (53° posto tra le province italiane).

23.2.6 L'interporto di Rovigo

L'Interporto di Rovigo, sita a 40 km dal mare, occupa una posizione privilegiata in quanto si affaccia su un canale navigabile che dal mare a Rovigo è accessibile ad imbarcazioni della IV classe europea (navi da circa 2.000 tonnellate di stazza che possono navigare anche in tutto il Mediterraneo); mentre da Rovigo a Mantova possono transitare chiatte e bettoline che hanno comunque una grande capacità di carico. Le chiatte che oggi arrivano a Rovigo hanno una capacità di 1.200/1.600 tonnellate, corrispondenti a circa 50 TIR. La via navigabile nasce da Porto Levante, dove sono stati costruiti i moli foranei e attraverso il canale navigabile Canalbianco, Tartaro e Fissero giunge fino a Mantova con una lunghezza di circa 170 Km. Successivamente, tramite le conche di San Leone entra nel Po per raggiungere il Porto di Cremona. Il corso d'acqua, essendo un canale, mantiene per tutto l'anno una profondità costante di 3,50 mt. al contrario del Po che, risentendo delle condizioni climatiche è navigabile soltanto per alcuni mesi. Capacità di trasporto e raffronto tra i vari mezzi -> Convoglio chiatte (costituito da 2 chiatte e uno spintore) = 72 container pari a circa 36 Tir.

L'Interporto di Rovigo è un nodo logistico che si occupa della movimentazione delle merci attraverso tre tipologie di vettori: acqua, ferrovia e strada e che fa quindi dell'intermodalità, un punto fermo della sua attività. Per quanto riguarda il sistema idroviario, il territorio è compreso tra i due fiumi Adige e Po (terzo e primo per portata, a livello nazionale), ed è percorso dal Canal Bianco, fiume navigabile; particolarmente importante dal punto di vista anche turistico, è il Delta del Po, conosciuto in tutto il mondo. Il sistema stradale comprende numerose strade importanti tra le quali va ricordata la SS434, detta anche Transpolesana; ma è importante dire che numerose sono le opere delle quali è prevista la realizzazione e/o il completamento nel futuro prossimo (la strada Nogara-mare e Valdastico sud, per esempio) che costituiranno agevoli accessi per i corridoi internazionali (mediterraneo e scandinavo-mediterraneo). I sistema ferroviario poi, attraversa tutto il territorio con tratte importanti che garantiscono il transito delle merci verso le grandi aree produttive dislocate a livello internazionale.

23.2.7 Porto Levante Terminal

Lungo la rete idroviaria che percorre il Polesine, in corrispondenza dell'ultima parte navigabile della foce del Po di Levante, ha posto di rilievo un'altra area che consente al traffico di cabotaggio di usufruire dell'intermodalità: **Porto Levante Terminal in località Ca' Cappello**, frazione di Porto Viro. L'attività principale di Porto Levante Terminal è rappresentata dall'offerta di servizi logistico-intermodali per merci che arrivano via mare, via fiume e via terra. La banchina lineare di 450 m. situata in prossimità della foce del Po di Levante è adatta a navi fluvio-marittime da 3.000/5.000 tonnellate di portata. Il Terminal è specializzato nella movimentazione merci quali: inerti, legnami, alimenti non deperibili, containers, concimi, laterizi e prodotti per l'edilizia. Il Terminal è inoltre attrezzato per il deposito e l'assemblaggio di sottogruppi per grandi impianti. L'area del Terminal è di 130.000 mq. di cui ca. 7.000 mq. coperti, completamente urbanizzata e fornita di tutti i servizi primari.

A servizio delle operazioni di carico e scarico vi sono una gru portuale mobile da 75 tonnellate per sbarco di prodotti alla rinfusa con portata di 1.500 tonnellate/turno, 2 scivoli per movimentazione da nave di materiale mobile, rotabile e per impianti, 4 pale, fork lift, pesa di m 3,20 x 18 da 80 tonnellate. Le ricariche delle merci possono avvenire sia direttamente durante lo sbarco delle navi, a mezzo tramoggia, oppure da piazzale e/o magazzino tramite pala, fork lift o qualsiasi altro sistema di ricarica adatto alle varie tipologie di prodotto.

23.3 PROVINCIA DI FERRARA

23.3.1 Popolazione e territorio

I residenti della provincia ammontano a poco più di **352.727 unità**. L'area si presenta come non molto popolata. La densità, infatti, ammonta a **134,7 abitanti per kmq**, nettamente al di sotto della media nazionale (201,2) e di quella del Nord Est (186,9) e piuttosto modesta in relazione soprattutto al fatto che si è in presenza della provincia italiana con la più estesa superficie pianeggiante dopo le province di Foggia e Lecce. I quattro centri con più di 20.000 abitanti (Ferrara, Cento, Comacchio e Argenta) costituiscono un interessante polo di attrazione per la popolazione della provincia. Infatti, il 60,3% dei residenti della provincia ha la propria dimora abituale nei comuni citati. C'è da dire, comunque, che altre realtà in ambito nazionale presentano centri con maggiore concentrazione demografica. La popolazione della provincia, come accade per la maggior parte delle province limitrofe, ha una struttura per età particolarmente anziana, infatti, oltre ad un'incidenza di over 65 decisamente elevata (26,7%), si ha la più modesta concentrazione del Paese di under 15 (appena l'11,1%) se si esclude Oristano e la nuova provincia di Carbonia/Iglesias. La composizione per sesso inoltre presenta un marcato squilibrio in favore delle donne (52,2%) che risulta il sesto più elevato d'Italia. Inoltre Ferrara occupa la diciottesima posizione (su 22) nel Nord-Est (cinquantunesima in Italia) in quanto a presenza di cittadini stranieri sul totale della popolazione (8,3 stranieri ogni 100 abitanti).

23.3.2 Tessuto imprenditoriale

Le imprese registrate nella provincia di Ferrara al fine 2013 ammontano a poco più di **36.851** (37.267 nel 2012). A differenza di quanto si osserva nelle altre province emiliane, esistono due settori predominanti dell'economia locale: **agricoltura e commercio**, che insieme costituiscono oltre il 43,5% delle imprese del Ferrarese. Significativo, in particolare l'apporto delle aziende agricole che con il 22,6% fanno registrare un dato largamente superiore alla media nazionale (12,9%). Dato che deve essere valutato anche alla luce della robusta contrazione fatta registrare dall'incidenza del settore negli ultimi anni, la cui percentuale dal 1997 al 2013 è scesa di oltre sei punti percentuali. Interessante nell'analisi del trend temporale è anche l'andamento dell'industria delle costruzioni che fanno segnare un'incidenza che è passata dal 9,4% del 1997 al 14,6% del 2013. Ciò nonostante l'incidenza di questo tipo di imprese è ancora inferiore alla media del Nord-Est (15,5%). Non è di particolare rilievo la presenza di imprese a connotazione artigiana: l'incidenza del 25,8% di questo tipo di imprese sul totale si colloca praticamente a metà fra il dato del Nord Est e quello nazionale. Leggermente positivo risulta il ritmo di crescita del numero di imprese evidenziato dal tasso di evoluzione: infatti per ogni 100 imprese presenti sul mercato ad inizio del periodo (2013), ve ne sono 0,43 in più (dato che pone Ferrara al 63-esimo posto in Italia). Il valore modesto che assume questo

indicatore viene depresso soprattutto da un alto livello di mortalità il cui valore è di 6,5 (37° posto in Italia) che cannibalizza il discreto livello del tasso di natalità (6,9 contro il 6,7 nazionale).

23.3.3 Mercato del lavoro

Il tasso di disoccupazione della provincia di Ferrara si attesta al 14,4% (in forte aumento rispetto all'11% dell'anno precedente e lontanissimo dall'ottimo 4,8% registrato nel 2008), che risulta superiore a quello nazionale (12,4% - 37-esma posizione fra le 110 province italiane). La scomposizione per sesso della popolazione "attiva" (15-64 anni) non mette in luce significativi divari fra i sessi, ma entrambi i tassi sono superiori a quelli medi nazionali. Il trend temporale mette in luce i continui miglioramenti del mercato del lavoro della provincia nel periodo 1995-2007, la ridiscesa nel triennio successivo, il lento recupero avuto nel 2011 e il forte peggioramento nell'ultimo biennio. Questo andamento si nota sia analizzando il dato complessivo (che all'inizio del periodo era pari al 9,6%), che quelli di tutte le varie fasce di età. Il risultato è avvalorato dal numero di assunzioni previste dalle imprese nel 2014: 10.210 nuove unità; tali imprese fanno sì che il tasso di entrata si attesti al 15% (contro il 10,1% medio nazionale), ma anche il relativo tasso di uscita risulta elevatissimo (16,8% contro l'11,6% in Italia) e da luogo ancora una volta ad un saldo occupazionale negativo. Le imprese concentreranno l'attenzione sui profili "giovani" (fino a 29 anni - 38,3% contro il 30,4% medio nazionale) e con necessità di ulteriore formazione professionale.

23.3.4 Risultati economici

Il contributo dell'economia ferrarese alla formazione del valore aggiunto nazionale è piuttosto modesto è pari allo 0,56% (0,57% l'anno precedente), che colloca la provincia al 55-esimo posto nella relativa graduatoria nazionale. Questa considerazione viene maggiormente avvalorata qualora si esamini quanta parte del valore aggiunto spetta ad ogni abitante. Ebbene i circa **22.227 euro per abitante**, rappresenta una quota inferiore alla media nazionale, e colloca Ferrara al 55-esimo posto tra le province italiane, ben lontana da realtà appartenenti alla medesima macro ripartizione. Poco confortante appare il fatto che negli anni '90 Ferrara ha recuperato solo quattro posizioni nella graduatoria costruita su questo indicatore passando dal 49° al 45°posto nel 2003, per poi ritornare nel 2009 allo stesso punto di partenza, guadagnare solo due posizioni nel 2011 e ridiscendere al 55-esimo nell'ultimo anno. La presenza di un numero piuttosto congruo di **imprese agricole** contribuisce a far lievitare l'importanza che il settore ha nella formazione del Valore aggiunto provinciale, il cui contributo (5,37%) è tra i più elevati del Nord-Est (prima in assoluto e 15-esima in Italia) ed è più del doppio del valore nazionale. Questo risultato viene conseguito nonostante si sia registrata nel periodo menzionato una contrazione dell'incidenza del settore sulla formazione del valore aggiunto (derivante anche dal calo del numero di imprese), che solo a metà degli anni '90 faceva segnare un valore intorno all'8%. Data l'importanza del settore agricolo vale la pena di spendere alcune parole sulle produzioni del settore in provincia. In termini assoluti prevalgono le coltivazioni erbacee e legnose, che riescono a collocarsi entrambi nelle prime trentatré posizioni della graduatoria nazionale e nelle prime nove della graduatoria del Nord-Est. In particolare Ferrara risulta essere al terzo posto in questa ripartizione per produzione di coltivazioni erbacee. Le attività di tipo artigianale riescono a produrre il 15,4% del valore aggiunto, un dato nettamente al di sopra della media nazionale e di quello del Nord Est, ma soprattutto decisamente positivo se confrontato con il numero di imprese del settore.

L'alta incidenza del settore agricolo nella formazione del reddito complessivo è una caratteristica peculiare del sistema economico ferrarese. L'agricoltura ferrarese, infatti, "produce" un valore aggiunto pari al 6% del totale provinciale (un valore pressoché doppio rispetto alla media della regione Emilia Romagna), conta su circa 9.000 imprese registrate, estendendosi su 180 mila ettari di superficie agraria complessiva. Ferrara è attualmente la quarta provincia, in tutto il Nord Italia, dopo Imperia, Cremona e Mantova, per il contributo offerto dal settore agricolo alla formazione del reddito complessivo provinciale.

Storicamente, la lunga "epopea" delle bonifiche, prima, e la riforma fondiaria del delta padano poi, hanno "ridisegnato" il paesaggio delle campagne ferraresi, e quindi la mappa delle specializzazioni produttive, mentre il successivo ricorso alla meccanizzazione ha determinato il diffondersi di colture di tipo estensivo, che hanno profondamente mutato nel tempo anche i protagonisti dell'attività agricola.

L'**industria ferrarese**, che vanta una gloriosa tradizione, risalente agli albori del processo di industrializzazione, ai canapifici, ai mulini sul Po e persino alle antiche arti calzaturiere esercitate per secoli per Pontefici ed Imperatori, ha registrato, negli anni più recenti, profondi e significativi mutamenti, quali in particolare un crescente livello di innovazione tecnologica applicata ai processi produttivi ed una internazionalizzazione più diffusa e diversificata sui mercati globali.

Ciò si è accompagnato ad un processo di riequilibrio insediativo nell'ambito del territorio della provincia: accanto ai **grandi impianti chimici di Ferrara**, dotati di notevole potenziale produttivo e di ricerca applicata, ed al "distretto" centese, fortemente integrato nelle sue componenti aziendali e specializzato in uno spettro molto diversificato di produzioni meccaniche, si è andato sviluppando il nuovo **"polo" industriale del basso ferrarese**, a S.Giovanni di Ostellato. Da area depressa, esso sta trasformandosi in autentico distretto industriale, con buona capacità di attrazione dall'esterno di nuovi insediamenti produttivi. Il territorio ferrarese, infatti, come è previsto anche dalle scelte programmatiche del Piano Territoriale Regionale, rappresenta un'opportunità molto interessante per la ri-localizzazione di attività produttive provenienti dalle zone di insediamento manifatturiero della via Emilia, nonché di molte aree del Nord Est.

Infine, il processo di progressiva terziarizzazione, in atto anche all'interno del sistema economico ferrarese (particolarmente evidente in termini occupazionali: basti pensare che attualmente il 59% della popolazione provinciale in condizione professionale è impegnata nel terziario, contro il 41,7% del 1981 ed il 16,5% del 1951) non è conseguenza di una sua de-industrializzazione, dato che la crescita del reddito prodotto dal terziario è andata di pari passo con quella dell'industria. Piuttosto, esso è la risultante di fenomeni, quali la forte crescita del settore turistico - prima di quello balneare sul litorale comacchiese, e più recentemente di quello di Ferrara "città d'arte" -, nonché un costante sviluppo dei servizi destinati alle imprese ed alle persone.

23.3.5 Apertura mercati

Ammontano ad oltre **2,2 miliardi di euro le esportazioni** di merci in provincia di Ferrara (in diminuzione rispetto ai 2,4 miliardi del 2013). Rapportando le esportazioni al Pil si ottiene una propensione all'esportazione pari a 28,7, un dato lontano dalla media del Nord Est (37,6), ma superiore a quello nazionale (27,9). La debolezza degli scambi con l'estero è ulteriormente suffragata dall'esame del tasso di apertura che si attesta su un valore di 40,1, nettamente al di sotto della media nazionale (53,6) e 56-esimo risultato della graduatoria fra tutte le province. I prodotti che maggiormente vengono esportati sono praticamente quelli caratteristici di altre realtà emiliane, vale a dire parti ed accessori degli autoveicoli (che rappresentano il capitolo merceologico di gran lunga più esportato), le loro componenti, macchine ed apparecchi meccanici e i prodotti legati all'industria chimica. Sul versante delle importazioni spariscono i prodotti legati all'industria dell'automobile che vengono sostituiti dai prodotti chimici di base, da quelli legati all'agricoltura e dalle macchine di impiego generale. I mercati di sbocco delle esportazioni sono dominati dai paesi europei (59,5% - Germania e Francia in primis), tra i quali solamente l'America settentrionale riesce a ritagliarsi un posto importante. L'analisi dei principali paesi da cui Ferrara importa evidenzia un panorama analogo, anche se qui è ancora più marcata l'incidenza degli scambi con l'Europa (82,3%).

23.3.6 L'idrovia ferrarese

L'idrovia ferrarese, che collega il Po a Ferrara con Porto Garibaldi, costituisce l'ingresso meridionale al Sistema Idroviario Padano Veneto dall'Adriatico. L'idrovia, **lunga 70 km**, è divisa in tre tratte: dalla conca di Pontelagoscuro (appena dopo la deviazione dal Po) alla conca di Valpagliaro, da questa alla conca di Valle Lepri e da questa al mare. Nel tratto tra Ferrara e Migliarino (Fiscaglia), essa coincide con il corso del Po di Volano, mentre il suo percorso dopo Migliarino è artificiale. Essa è stata realizzata tra gli anni 50 e 60 per navi sino a 600 t, ma è utilizzata anche da navi della IV classe CEMT. Il progetto del collegamento con Ravenna prevede di utilizzare in parte l'idrovia ferrarese.

Il progetto dell'Idrovia Ferrarese, che fa parte della pianificazione nazionale (PGT e Piano della Logistica) e regionale (PRIT), mette la comunità e la cittadinanza al centro della riqualificazione territoriale, con l'obiettivo di innescare un modello di sviluppo economico e produttivo che sia sostenibile e duraturo. Il tracciato del progetto generale dell'Idrovia Ferrarese, per un totale di opere finanziate pari a circa 145 milioni di euro, attraversa la Pianura ferrarese comprendendo i territori di 8

Comuni, fino al mare, in un ambito di ricche tradizioni culturali e gastronomiche e di grande pregio naturalistico. Il corso dell'asta fluviale interessato dai lavori ha inizio dalla Conca di Pontelagoscuro nei pressi di Ferrara, oltrepassa poi la città estense e si immette, attraverso la pianura e le Valli di Comacchio, nel Mare Adriatico che bagna Porto Garibaldi e Lido degli Estensi.

23.4 PROVINCIA DI REGGIO EMILIA

23.4.1 Popolazione e territorio

Gli abitanti residenti della provincia reggiana a fine 2013 ammontano a circa **532.291 unità**. Ogni kmq di superficie, è popolato mediamente da circa 233 abitanti, un dato notevolmente superiore a quello nazionale (201,2) e di circa il 20% in più a quello del Nord – Est. I tre comuni con dimensione demografica superiore ai 20.000 abitanti (Reggio Emilia, Scandiano e Correggio), non concentrano proporzionalmente a quanto avviene in altre realtà, una quota particolarmente elevata di popolazione. Infatti, solamente il 41,8% degli abitanti della provincia risiede in questi tre centri. Si tratta di un valore di circa 11,5 punti percentuali più basso rispetto a quello che si registra per il complesso del Paese. La ripartizione per età della popolazione, a differenza di quello che accade in moltissime altre province del Nord Italia, evidenzia una presenza della quota di ultrasessantacinquenni (20,4%) più bassa della media nazionale (21,4%) e sicuramente non si raggiungono le punte che si osservano in altri contesti, soprattutto del Nord-Est. A risentire in senso positivo di questo dato sono le classi "giovani" (0-14 anni) a differenza di quello che accade a Piacenza e a Parma, e più in particolare modo gli uomini. Vale la pena segnalare, come Reggio Emilia sia un **polo di attrazione per i cittadini stranieri**, infatti la quota di stranieri per 100 abitanti è pari a circa 13,5, terzo valore più elevato in Italia e secondo nel Nord-Est dopo la provincia di Piacenza.

23.4.2 Tessuto imprenditoriale

Sono poco più di **56.460** (57.217 nel 2012) le imprese registrate nel 2013 operanti sul territorio reggiano. La ripartizione settoriale non fa rilevare un settore particolarmente caratterizzante per l'economia. Infatti, le imprese a carattere commerciale costituiscono solo il 19,9% del totale imprese, dato inferiore alla media nazionale (25,6%). Il settore del commercio peraltro negli ultimi anni, vede diminuire costantemente la sua importanza nel tessuto produttivo reggiano. Basti pensare che negli ultimi tredici anni l'incidenza del settore è passata dal 23,1% al 19,9% (104-esimo posto in Italia). Esistono peraltro settori la cui importanza è di particolare rilievo rispetto alla media nazionale; tra questi citiamo le costruzioni (22,5% contro il 23,7% del 2004 – prima in assoluto fra tutte le province italiane) e l'industria in senso stretto (14,6% 9° posto nazionale e terzo nel Nord-Est). Da questo punto di vista è doveroso sottolineare anche la perdita di importanza del settore agricolo la cui incidenza è passata dal 21,5% al 14,2% tra il 1997 ed il 2009 ed all'11,4% nel 2013. Di notevole significato è la presenza dell'artigianato; oltre un'impresa su tre (per la precisione il 35,9%) presenta questi connotati e ciò contribuisce a rendere la provincia la maggiore realtà artigiana del Nord – Est e in Italia. Molto negativa (come già evidenziato anche nel 2012) risulta essere la dinamica imprenditoriale: il tasso di evoluzione relativo al 2013 evidenzia un dato pari a -0,31 nuove imprese ogni 100 esistenti ad inizio periodo, notevolmente al di sotto della performance italiana (0,86). Questo è il risultato di un buon valore del tasso di natalità (7%), il 45-esimo più alto in Italia (quinto nel Nord-Est), ma che viene "cannibalizzato" da un valore della mortalità imprenditoriale (7,3 contro 6) notevolmente superiore alla media nazionale - quinto più alto in Italia e primo nella macro ripartizione di riferimento).

23.4.3 Mercato del lavoro

Decisamente buona la situazione del mercato del lavoro della provincia, letta attraverso uno dei suoi parametri più importanti: il tasso di disoccupazione. Questa misura si attesta, infatti, al 6% (in aumento rispetto al 4,8% del 2012 ed al 5,4% del 2010), facendo del reggiano la quarta migliore provincia a livello nazionale e la terza nel complesso del Nord – Est (dietro Bolzano e Verona); tale risultato è avvalorato dal diciottesimo posto in assoluto in Italia del tasso di attività (71,1% contro il 63,5% nazionale). Il risultato è ottimo visto anche il numero di assunzioni previste dalle imprese nel 2014 (8.710 nuove unità), tali imprese però fanno registrare un tasso di entrata del 6,4% che risulta piuttosto modesto se lo si raffronta al 10,1% medio nazionale e concentreranno l'attenzione su posizioni lavorative di difficile reperimento e con necessità di ulteriore formazione professionale.

Analizzando il mercato del lavoro della provincia in dettaglio si può notare come sia superiore alla media nazionale il numero di occupati nel settore industriale (quinto posto nel Nord-Est ed ottavo in Italia).

23.4.4 Risultati economici

Il contributo alla formazione del valore aggiunto nazionale da parte dell'economia reggiana è pari all' 1,03% (1,02% nel 2012). In termini pro capite ogni abitante della provincia può contare su circa 27.135 euro, quota sensibilmente superiore a quella della media nazionale e che consente a Reggio Emilia di raggiungere il tredicesimo posto rispetto alle altre province Nord – Orientali (diciannovesimo in Italia). Il netto vantaggio che si registra rispetto al Paese nel suo complesso, è in parte spiegato dalla crescita dell'economia reggiana nel periodo 1995-2008. Il settore che maggiormente contribuisce alla formazione del valore aggiunto è **l'industria**. Ben il 38,8% del valore aggiunto provinciale proviene dal settore secondario, una quota che proietta l'industria reggiana al quinto posto della graduatoria nazionale ed al secondo di quella del Nord-Est dopo la provincia di Vicenza. Dato il livello trascurabile del settore agricolo, sono i servizi a risentire maggiormente dell'impatto dell'industria. Il settore terziario (58,7%), pur essendo quello che fornisce il maggior contributo alla formazione del valore aggiunto ha un impatto decisamente minore rispetto a quello che accade in altre province (106° valore in Italia). Il 17,2% circa del valore aggiunto provinciale deriva dalla produzione artigiana, tale percentuale di incidenza consente alla provincia di attestarsi al 29-esimo posto nella graduatoria nazionale. Il territorio reggiano si distingue anche per una notevole propensione alla produzione agricola ed in particolare verso la **zootecnia** il cui ammontare complessivo è il settimo in Italia e primo nel Nord-Est.

23.4.5 Apertura mercati

La provincia di Reggio Emilia nel 2013 ha esportato merci per un totale di oltre **8,6 miliardi di euro** (in aumento rispetto agli oltre 8,4 dell'anno precedente). La capacità di esportazione dell'economia locale è particolarmente elevata, dal momento che la propensione all'export raggiunge il valore di 59,9 (più del doppio del valore nazionale) consentendo alla provincia di raggiungere il quinto posto nella graduatoria nazionale e la seconda posizione nell'ambito del Nord – Est (dietro Vicenza). Notevolmente rilevante appare anche il peso delle importazioni. Infatti il valore del tasso di apertura si assesta su un valore pari a 82,8, che rimanendo superiore a quello nazionale consente alla provincia di entrare nelle prime quindici posizioni della graduatoria nazionale (12° posto – terzo nella macro ripartizione). Analizzando le produzioni oggetto di scambio commerciale, si osserva che dal punto di vista delle esportazioni, la parte del leone viene recitata dalle **produzioni di macchine di impiego generale**, seguite di misura dagli articoli di abbigliamento e dalle altre macchine di impiego generale e piastrelle in ceramica per pavimenti e rivestimenti. L'analisi delle importazioni mostra una situazione più eterogenea, infatti nelle prime quattro posizioni troviamo gli articoli d'abbigliamento, i prodotti chimici, i prodotti metalliferi (ferro, ghisa e acciaio), e le macchine di impiego generale. Da un punto di vista dei mercati verso cui sono rivolte le esportazioni Reggio Emilia non fa segnare particolari peculiarità. Al primo posto troviamo i paesi europei (Francia e Germania in primis), mentre quelli extra europei sono Stati Uniti (in particolar modo l'America settentrionale), la Russia e l'Asia (Cina). Quasi del tutto simile è la situazione dei paesi da cui provengono le importazioni, cui si evidenzia l'ottima performance della Cina (come accade anche a Parma e Piacenza).

23.4.6 Distretto ceramico di Sassuolo

Il 17% delle piastrelle commercializzate nel mondo sono prodotte in Emilia-Romagna, distretto che punta tutto sulle grandi opere e l'edilizia all'estero, vero canale di sfogo per le aziende del settore che sussurrano una cifra obiettivo: 5 miliardi di export a livello italiano nel volgere di pochi anni. Sulla via Emilia, nel tratto che unisce Reggio Emilia a Bologna - passando, ovviamente, per Modena - si concentra quasi il 90% della produzione nazionale, un sesto delle esportazioni mondiali. Questo vuol dire che proprio le aziende ceramiche presenti sulla via Emilia - un centinaio quelle di grandi dimensioni, molte di più le Pmi dell'indotto - generano ricavi per 4 miliardi di euro l'anno spartendosi i relativi utili, in buona parte reinvestiti nel ciclo industriale per rimanere al passo con la concorrenza. Parte consistente di questa ricchezza viene sfornata nel distretto di Scandiano-Casalgrande-Sassuolo, punta di diamante dell'industria che forma un agglomerato in grado di sfidare la Cina,

primo produttore al mondo di piastrelle con 8,2 milioni di euro di ricavi e una quota del 39%. Così, nei primi sei mesi del 2015 le esportazioni di ceramica nella regione hanno superato il valore di 1,8 miliardi di euro, con un aumento del 6,6 per cento rispetto allo stesso periodo dell'anno precedente. Tante le ceramiche reggiane presenti anche quest'anno a Cersaie. C'è la Ceramica Rondine, storica azienda rubierese, che ha sedi anche a Vetto e Sassuolo, e la Casalgrande Padana.

23.4.7 Porto Turistico Fluviale Regionale di Boretto

Il porto Turistico Fluviale Regionale di Boretto (delibera Consiglio Regionale Emilia Romagna n.° 2688 del 28 luglio 1989) è senz'altro il più attrezzato e caratteristico del tratto del fiume Po, che attraversa la Regione Emilia Romagna da Piacenza a Ferrara.

L'elevata qualità dei servizi offerti risponde alla costante espansione della domanda turistica rivolta alla navigazione fluviale, favorita a Boretto, dalla facilità d'interscambio con la strada statale n.° 62 del Passo della Cisa.

Posto sulla sponda destra del fiume Po, il porto di Boretto è situato a ridosso dell'argine maestro su cui scorre la S.S. 62, che lo divide dal centro storico del paese. Per questa peculiarità e per la sua attrezzata marina, Boretto è oggi punto di attracco e sosta per l'imbarco/sbarco passeggeri delle motonavi in transito sul grande fiume e dal 2007, sede operativa della nuova **Motonave PADUS**, in servizio turistico sui fiumi Po, Mincio e laghi di Mantova.

Negli ultimi anni Infrastrutture Fluviali ha prestato particolare attenzione allo sviluppo dei servizi a disposizione dei turisti e dei diportisti ed all'aumento dei posti barca disponibili. Tutta l'area del Lido Po prospiciente gli attracchi, dove risiedono i servizi a terra, è a disposizione dei turisti e si sviluppa su di un fronte di 400 metri, nello spazio acqueo sono dislocate tre zone d'ormeggio che vedono la presenza dei pontili Giudecca e San Marco, in grado di accogliere motonavi fino a 1.000 ton. di stazza lorda.

Il porto Turistico Fluviale e tutta l'annessa area del Lido Po, i pontili d'ormeggio e gli attracchi sono gestiti dalla società Infrastrutture Fluviali s.r.l.. L'intera area offre al turista servizi diversificati che fanno del porto turistico di Boretto base ideale e di elevata qualità per le offerte turistiche e gastronomiche di tutto il comprensorio della bassa reggiana e delle province limitrofe. Per questo motivo e per la continua e crescente richiesta di crociere fluviali la società Infrastrutture Fluviali ha portato a termine la costruzione della nuova unità navale denominata PADUS. Per queste peculiarità il Porto Turistico Fluviale Regionale di Boretto e la nuova motonave si propongono quale punto di riferimento per il turista e per chi voglia sviluppare attività e progetti di promozione turistica nel territorio della bassa reggiana e nelle province limitrofe legati alla navigazione fluviale sul grande fiume.

23.5 PROVINCIA DI VERONA

23.5.1 Popolazione e territorio

Con **922 mila persone** (2013), la Provincia di Verona rappresenta il 18,7% della popolazione veneta, e l'1,52% della popolazione italiana. In Italia è la 15^ Provincia in termini di residenti. I giovani fino a 14 anni sono il 14,6% della popolazione, mentre gli anziani con più di 64 anni costituiscono il 20,7% degli abitanti. Gli stranieri nel 2013 erano 109mila, di cui il 24,2% minorenni. Il saldo demografico è stato attivo nel 2013 per 14.370 unità, grazie all'immigrazione, visto che sono morte in quell'anno 8.360 persone, un numero superiore rispetto alle 8.200 nascite. La speranza di vita alla nascita per gli uomini è di 80,1 anni, e di 85,1 per le donne. La superficie della Provincia di Verona è di 3.100 kmq, circa il 17% della superficie del Veneto. In Italia questa Provincia è la 36^ per estensione. La Provincia di Verona è articolata in 98 comuni.

23.5.2 Tessuto imprenditoriale

Con **96.840 imprese registrate** (2013) la Provincia di Verona raccoglie il 19,6% delle imprese venete, il 1,60% di tutte le imprese italiane. In Italia è al 12° posto per imprese registrate. La Provincia presenta una elevata quota di **imprese agricole**: 17% del totale. Quelle del commercio sono il 21,1%, quelle delle costruzioni il 15,9%, mentre quelle manifatturiere sono il 10,5%. Le imprese artigiane sono 26.890. Il tasso di natalità delle imprese, 6,6%, è superiore al tasso di mortalità (6,5%). Le unità locali

con 50 o più addetti erano 642 (dati del 2011), ed occupavano 86mila lavoratori, mentre le unità locali complessive erano 82.660, con 319mila addetti. L'anzianità media delle imprese attive è di 13,5 anni (2012). Sono 6.695 le strutture ricettive nella Provincia di Verona, che offrono 139.900 posti letto (2012), circostanza quest'ultima che la pone al 6° posto nella classifica delle province italiane. Queste strutture hanno consentito 14,43 milioni di giornate di presenza di turisti (6° posto tra le province italiane), di cui 11,01 milioni di turisti stranieri (dati del 2012).

23.5.3 Mercato del lavoro

Con **398 mila occupati** (2013) la Provincia di Verona è al 10° posto in Italia per questo parametro. Il 27,7% di questi lavoratori erano impiegati nell'industria, e il 5,8% in agricoltura. I rimanenti nei servizi. 300mila erano i dipendenti, e 98mila gli autonomi. 24.800 erano nel 2013 le persone in cerca di occupazione, ovvero il 6% della forza lavoro (108° posto in Italia per intensità del tasso di disoccupazione). Il tasso di occupazione, pari al rapporto tra occupati e popolazione compresa tra 15 e 64 anni, è del 64,6% (20° posto in Italia).

23.5.4 Risultati economici

La Provincia di Verona ha prodotto nel 2013 **25,19 miliardi di euro di valore aggiunto**, circostanza che la pone al 10° posto tra le province italiane. Il valore aggiunto di Verona rappresenta il 19% di quello del Veneto, e l'1,80% del valore aggiunto italiano. Il valore aggiunto pro capite era nel 2013 di 27.540 euro, circa 4.500 euro in più rispetto al valore italiano medio (23.190). Per questo parametro Verona è al 10° posto tra le province italiane. Il valore aggiunto della Provincia di Verona è stato realizzato nel 2012 per il 21,3% dall'industria, il 6,5% dalle costruzioni, il 2,7% dall'agricoltura, e la parte rimanente dai servizi.

23.5.5 Apertura mercati

Il saldo commerciale della provincia di Verona è stato nel 2013 negativo per 1,26 miliardi di euro, in conseguenza di **esportazioni pari a 9,38 mld e importazioni per 10,64 mld**. Le esportazioni della provincia di Verona hanno rappresentato il 17,8% delle esportazioni venete ed il 2,41% delle esportazioni italiane, situazione che posiziona Verona al 11° posto in Italia. La quota più alta delle esportazioni (38,8%) proviene dal settore Metalmeccanico, seguito dall'Alimentare (20,3%). Sul piano delle destinazioni dell'export della provincia di Verona, prevale l'Europa (73,7%), seguita dall'Asia (11,8%) e dall'America (9,7%). La propensione all'export, ovvero il rapporto tra export e PIL, è stata nel 2013 pari al 37,2% (32° posto tra le province italiane).

23.5.6 Distretto del Mobile Classico della Bassa Veronese

Il Distretto del Mobile Classico della Bassa Veronese si sviluppa nella parte meridionale della Regione Veneto. Territorialmente insiste sulle Province di Verona, Padova e Rovigo e coinvolge 43 comuni (23 di questi fanno parte della provincia di Verona, 14 della provincia di Padova, 6 della provincia di Rovigo).

Le specializzazioni produttive del distretto sono: mobili classici e in stile; cucine in legno; salotti, imbottiti in genere sia di linea moderna che di rifacimento; arredi per bagni; armadi, toilette, letti in ferro battuto ed ottone; arredi moderni in genere; mobili di tipo "arte povera".

Il Distretto si caratterizza per la presenza di un numero molto elevato di piccole e medie imprese, prevalentemente di tipo artigianale, con marcate differenze tra loro per tipologia di prodotto, organizzazione produttiva e commerciale, mercati di destinazione dell'export. Diffusa è la presenza di specialisti di fase o di componenti, produttori di mobili in stile, artigiani di nicchia, piccole imprese industriali in fase di crescita, imprese leader e commerciali. Prevalenti comunque le piccole aziende di tipo artigianale, poco strutturate, che si servono spesso di intermediari ed accentrano all'interno quasi tutte le fasi di produzione, decentrando a specialisti di fase soprattutto la lucidatura dei pezzi o alcune particolari operazioni di finitura (decorazione, verniciatura, intaglio, intarsio). La varietà delle produzioni è tra le ragioni del successo di mercato del distretto, che può rispondere alle variazioni di gusto della clientela trovando nel proprio bagaglio produttivo soluzioni adeguate.

23.5.7 Distretto Veneto della termomeccanica – Veneto Clima

Il distretto Veneto Clima è radicato principalmente in alcuni comuni della provincia di Verona e

in altri di province limitrofe. Il Distretto è specializzato nelle attività del settore termomeccanico, le quali coinvolgono tutti i sistemi legati alla gestione della temperatura e dell'umidità di un ambiente. L'ossatura dei prodotti di termoregolazione riguarda sia la gestione del calore, attraverso termosifoni, caldaie, generatori di calore, bruciatori, scalda-acqua, termoconvettori a gas e generatori di aria calda; sia la gestione del freddo, con refrigeratori, ventilconvettori e condizionatori. Le sperimentazioni sui i primi impianti civili da riscaldamento risalgono al primo dopoguerra, periodo in cui inizia lo sviluppo della grande distribuzione degli impianti e la produzione di acqua calda tramite generatori di calore e scambiatori. Da allora le aziende venete del settore si sono sempre più specializzate, rendendo necessaria la creazione del distretto della termomeccanica.

23.5.8 Distretto Verona Moda

Del Distretto VeronaModa fanno parte imprese ed Enti ed Associazioni appartenenti alle province di Verona, Vicenza, Padova, Belluno e Rovigo. Peraltro, la filiera del VeronaProntoModa, pur trovando il suo epicentro in Verona, si estende a raggio a nord/sud/est/ovest: alcune realtà hanno sede legale nelle province di Mantova, Bergamo, Bologna, Brescia. Costituiscono la filiera del distretto VeronaProntoModa: aziende di produzione abbigliamento (ProntoModa, Fast Fashion, programmato); aziende di produzione tessile (produzione e commercializzazione tessuti, maglierie); aziende conto terzi (laboratori artigianali); fornitori di macchinari e materiali (tessuti, accessori); fornitori di servizi (lavanderie, taglio, laboratori stilistici); grossisti e distributori di prodotto; fornitori di servizi immateriali-creatività (centri stile – ricerca tendenze).

Le aziende del settore dell'abbigliamento, con particolare riferimento alla provincia di Verona, oltre alla concorrenza dei paesi in via di sviluppo, stanno affrontando negli ultimi anni un radicale mutamento della domanda di prodotti dell'abbigliamento; quest'ultima si sta polarizzando, da un lato, verso i prodotti con marchi rinomati e caratterizzati da un forte contenuto di stile e moda, dall'altro lato verso capi dai prezzi molto contenuti. Sul lato dell'offerta, ciò sta comportando un'evoluzione organizzativa che punta al Fast Fashion, cioè un modello affine al pronto moda, adottato da aziende di successo sul mercato quali ad esempio Zara, Liu Jo e Patrizia Pepe, che si fonda su: apertura di catene monomarca, integrazione della produzione col programmato, valorizzazione del brand e affidamento della produzione in outsourcing.

23.6 PROVINCIA DI MANTOVA

23.6.1 Popolazione e territorio

A fine-2013 la popolazione della provincia di Mantova ammonta a circa di 415.100 unità, distribuite sul territorio con una densità media pari a 177,3 abitanti per kmq, inferiore sia al valore medio nazionale (201,2 ab./Kmq), che a quello regionale (417,9 ab./Kmq). Il grado d'urbanizzazione è addirittura il 96-esimo più basso a livello nazionale: solo il 22,3% degli abitanti risiede, infatti, nei tre comuni con popolazione superiore ai 20.000 abitanti. La principale caratteristica della struttura per età della popolazione è la decisa preponderanza rispetto alla media nazionale di ultrasessantacinquenni (22,4% contro il 21,4% nazionale), a scapito della quota di under 14 (13,8% contro 13,9%). Da segnalare infine l'elevata presenza degli stranieri rispetto agli abitanti nella provincia, con il 13,2% colloca Mantova si colloca in sesta posizione nel contesto nazionale. L'indice di ricambio della popolazione, che fornisce un'indicazione della sostituzione generazionale nella popolazione in età attiva, è pari a 139,3 rispetto al valore nazionale pari a 126,8, collocando la provincia 49-esima nel contesto nazionale.

23.6.2 Tessuto imprenditoriale

Il tessuto produttivo della provincia mantovana si compone al 31 dicembre 2013 di un numero di imprese di circa **42.200**, ben 9.048 (il 21,4%) hanno a capo una o più donne, collocandola, nella relativa graduatoria a livello nazionale intorno a metà classifica (49-esima). Il sistema imprenditoriale si impernia per poco meno della metà su **imprese a connotazione prevalente agricola e commerciale**, che insieme raccolgono quasi il 41,7% delle imprese. Più in particolare il settore primario rappresenta una quota pari al 19,8% contro il 5,2% a livello regionale ed il 13% nazionale. Decisamente importante anche il settore industriale nel complesso pari al 29,1% che si compone

per il 12% del manifatturiero e per il 17,1% dalle costruzioni (25-esimo risultato nazionale). Anche a Mantova, così come in altre zone limitrofe il settore dell'artigianato esercita un peso significativo visto che il 30,8% delle iniziative imprenditoriali presenta questi connotati, Mantova si colloca, infatti, al 18-esimo posto nella relativa graduatoria con una differenza rispetto al dato nazionale che è di circa 7,5 punti percentuali. Il tasso di evoluzione permette di osservare una crescita del numero di imprese lievemente inferiore a quello medio nazionale (0,16 imprese in più ogni 100 esistenti ad inizio periodo, contro lo 0,86 che si osserva in ambito nazionale). La spiegazione a tale performance si evince sia dal risultato del tasso di natalità imprenditoriale che con il 6,5 non permette alla provincia di scalare oltre la 71-esima posizione tra le province del Paese, sia dal tasso di mortalità imprenditoriale che attesta Mantova 48-esima. La struttura imprenditoriale per forma giuridica mostra la notevole presenza di imprese individuali, circa 24.492 pari al 57,9% del complesso delle imprese rilevate al 31-12-2013.

23.6.3 Mercato del lavoro

L'analisi tendenziale dell'indicatore occupazionale parte dal 2010 dove si attestava al 6,6%, nel 2011 si è assistito, come per Cremona, ad una flessione del livello di occupazione di circa 1,4 punti percentuali; mentre nella rilevazione relativa al 2012 la disoccupazione provinciale si attesta al 7,5% collocando Mantova al 79-esimo posto nella relativa graduatoria decrescente delle province italiane. Nel 2013 l'indice di disoccupazione tocca quota 9,2% e attesta la provincia solo 69-esima nel ranking nazionale. Il settore che mostra la migliore performance è quello industriale nel complesso, manifatturiero e costruzioni, che assorbe il 39,2% degli occupati attestando la provincia al 10-esimo posto per il primo e solo 93-esimo per il secondo. L'indicatore relativo al saldo occupazionale previsto nel 2014 è pari al -1,50, 36-esimo valore nazionale, che risulta identico al corrispettivo nazionale -1,50.

23.6.4 Risultati economici

L'incidenza del valore aggiunto della provincia sul totale nazionale risulta pari allo 0,82%, garantendo a Mantova la 32-esima posizione che è una performance di tutto rispetto se si tiene conto del fatto che molte delle province che la precedono hanno come capoluoghi delle città di grandi dimensioni. La posizione raggiunta è ancor più positiva qualora si tenesse conto del livello del **valore aggiunto procapite pari a 28.200 euro**, che vede Mantova occupare la 12-esima posizione a livello nazionale. In coerenza con la capacità di assorbimento occupazionale, il settore industriale nel complesso con il 39% rappresenta la quarta realtà nazionale per contribuzione al valore aggiunto provinciale. Elevata è l'incidenza del valore aggiunto dell'artigianato sul totale: 16,8% contro il 11,7% della Lombardia e il 12,6% dell'Italia, occupando la 34-esima posizione in linea con l'elevato peso del settore in termini imprenditoriali. Come per Cremona anche per Mantova risulta importante la produzione zootecnica che nell'ambito nazionale permette alla provincia di attestarsi al ottavo posto.

23.6.5 Apertura mercati

Relativamente agli scambi con l'estero la provincia di Mantova, nell'anno 2013, ha esportato merci per un valore prossimo ai **5,56 miliardi di euro**, collocandosi in 20-esima posizione nella relativa graduatoria; la propensione all'esportazione risulta decisamente elevata (48 contro il 36 ed il 27,9 rispettivamente della Lombardia e dell'Italia), collocando la provincia in 13-esima posizione. La non eccessiva dipendenza dalle importazioni (che fa si che il saldo commerciale della provincia sia di segno positivo per un ammontare di 904 milioni di euro) contribuisce a mantenere elevato il livello del tasso di apertura (88,2 decima posizione nel ranking nazionale). La distribuzione delle merci maggiormente esportate vedono prevalere in modo piuttosto netto i prodotti legati al settore metalmeccanico che assorbe circa il 48,8% dell'export provinciale (40-esima provincia nel ranking nazionale), anche il settore della chimica rappresenta una fetta cospicua dell'export di Mantova, con il 19% rappresenta la 37-esima realtà nazionale; i Paesi interessati dalle esportazioni provinciali sono soprattutto l'Europa con il 83,8%, l'America con il 5,3%, e l'Asia con il 7%. Il panorama delle importazioni si presenta simile a quello delle importazioni, dove troviamo il settore metalmeccanico che insieme a quello altro industria raccolgono il 57,8% e quello chimico con il 18,5% per i quali la provincia si colloca rispettivamente 40-esima, 72-esima, e 37-esima nel contesto nazionale, di provenienza soprattutto europea per il 53,1%, africana per il 6,2% e asiatica per il 39,3%.

23.6.6 Porto di Mantova

Il Porto di Mantova Valdaro è il più importante centro intermodale della Lombardia Orientale. Valdaro costituisce, infatti, il terminal naturale dell'idrovia Mantova Adriatico (136 km). Le banchine del porto di Valdaro sono raccordate alla ferrovia, il porto dispone di capannoni con carri ponte per il carico e scarico di merci che temono l'umidità. I piazzali del porto sono coordinati a fornitori di servizi portuali attrezzati per il movimento di granaglie, coils, container e sfusi. La posizione strategica del porto di Valdaro, intersecato dall'Autostrada A22 del Brennero, lo pone a completamento degli stessi traffici diretti sul Quadrante Europa di Verona. Nell'ambito di questo sistema il porto di Valdaro, attrezzato con raccordo ferroviario che si innesta sulla linea nazionale, si eleva a piattaforma trimodale di rango internazionale. Sono disponibili sul retro porto aree per insediamenti produttivi di tipo artigianale e industriale.

Il Porto di Valdaro è collegato all'autostrada A22 del Brennero grazie al casello di Mantova Nord (distante 5 Km). Dal porto è possibile innestarsi immediatamente nella ex S.S. 482 "Alto Polesana". Lo scalo, inoltre, è dotata di un proprio raccordo ferroviario. Il raccordo collega direttamente il porto di Valdaro alla linea delle Ferrovie dello Stato Mantova-Monselice. Il raccordo è costituito da un fascio di presa e consegna sulla linea ferroviaria nazionale, un fascio di binari di riordino posti a metà del tracciato parallelamente alla linea dell'autostrada A22, in corrispondenza del quale è previsto lo sviluppo di un centro intermodale, un fascio di binari di manovra a ridosso della darsena del porto e, infine, i binari di banchina all'interno della darsena stessa.

23.6.7 Sistema Portuale Mantovano

Il Sistema Portuale Mantovano è collegato al Canale Mantova - Adriatico, (IV e V classe CEMT) e ai fiumi Po e Mincio ed è costituito da più ponti attrezzati - sia pubblici che privati - organizzati per elevare il livello di prestazione dei servizi di trasporto per le imprese e per l'intero territorio provinciale.

Lo sviluppo dei distretti industriali nelle adiacenze del sistema navigabile e delle rete ferroviaria ha imposto la necessità di spostare merci dalla strada alla ferrovia e all'acqua a causa dei sempre più alti livelli di congestione e inquinamento prodotti. Tale obiettivo generale è uno degli elementi caratterizzanti la programmazione della Provincia ed è attuato, tra l'altro, con la realizzazione di opere infrastrutturali come il raccordo ferroviario di Gazoldo degli Ippoliti - Castellucchio o quello di Casalmaggiore - Viadana di prossima realizzazione, con lo scopo di ridurre le rotture di carico e interconnettere i ponti fluviali con il sistema ferroviario.

L'allargamento del canale alla V classe CEMT, altra opera della Provincia, si allinea con le iniziative intraprese nell'ambito delle "Autostrade del mare" e il "Corridoio adriatico", previste dall'Unione Europea, e per meglio utilizzare le opportunità di interscambio offerte dal potenziamento di Porto Levante con i suoi attracchi in mare per navi marittime, coerentemente con l'utilizzo di fondi comunitari per i territori in aree Obiettivo 2.

Nel complesso, quindi, il modello di sistema portuale proposto garantisce maggiore flessibilità di servizio per migliorare le capacità di risposta alle esigenze funzionali delle imprese.

Il Sistema Portuale Mantovano pubblico e privato, tenendo conto che alcuni progetti infrastrutturali sono in corso di completamento, presenta le seguenti caratteristiche generali:

- sei porti pubblici e sei privati per un totale di 2,2 Km di banchine di accosto con circa 360.000 mq di aree portuali esistenti e altrettante già previste;
- circa 4,6 milioni di mq di nuove aree industriali da insediare a ridosso dei porti;
- attrezzature portuali qualificate e allacciamenti ferroviari in diverse aree portuali
- un volume di traffico che si era attestato alla fine degli anni '90 intorno alle 600.000 tonn.; negli ultimi anni aveva subìto una flessione a causa di crisi congiunturali aziendali, ma da recenti incontri con le imprese è emersa una domanda di trasporto fluviale a breve termine di ulteriori 500.000 tonnellate.

23.7 PROVINCIA DI CREMONA

23.7.1 Popolazione e territorio

La provincia di Cremona presenta una popolazione pari a poco più di **362.100 unità** ed una densità demografica di 204,5 abitanti per kmq che se da un lato è appena superiore a quello nazionale (201,2) dall'altro risulta essere quasi la metà di quella lombarda (417,9). Il grado d'urbanizzazione risulta ad un livello medio-basso tra le province italiane: il 29,1% degli abitanti risiede infatti nei due comuni con popolazione superiore ai 20.000 abitanti, circostanza che colloca Cremona in 85-esima posizione a livello nazionale. La struttura per età della popolazione mostra una maggior incidenza, rispetto ai valori medi regionali ed italiani, della popolazione anziana ovvero di coloro che appartengono alla fascia d'età superiore ai 64 anni, 22,7%, a scapito dei giovanissimi sotto i 14 anni di età, 13,3%, (come si evince anche dal tasso di dipendenza degli anziani), 35,4% rappresentando la 44-esima realtà del Paese. L'indice di ricambio della popolazione, che fornisce un'indicazione della sostituzione generazionale nella popolazione in età attiva, è pari a 144,6 rispetto al valore nazionale pari a 126,8, collocando la provincia 39-esima nel contesto nazionale.

23.7.2 Tessuto imprenditoriale

Il tessuto produttivo di Cremona si compone di poco più di **30.400 imprese** presenti sul territorio, ben 6.323 (il 20,8%) hanno a capo una o più donne, che fanno dell'area la 75-esima provincia per numero di imprese presenti. I settori in cui le imprese del cremonese sono maggiormente impegnate sono senza dubbio commercio ed agricoltura che da soli riescono ad assorbire circa il 36,7% di tutte le iniziative imprenditoriali. In particolare è da evidenziare il comparto agricolo, (che pur non essendo quello maggiormente presente) assorbe il 14,1% di tutto il tessuto produttivo contro il 5,2% della Lombardia ed il 13% dell'Italia. Anche a Cremona, così come in altre realtà lombarde, risulta essere di notevole spessore l'impatto dell'artigianato (il 31% del totale delle imprese), superiore sia al dato lombardo (27,2%) che a quello italiano (23,2%). Il settore del turismo fa da contraltare a questi impegnando solo il 6,9% delle imprese e pone Cremona 47-esima, con una perdita di tre posizioni rispetto alla rilevazione precedente, per il numero complessivo di esercizi turistici. Il tasso di evoluzione permette di osservare una crescita del numero di imprese inferiore a quello medio nazionale (-0,60 imprese in più ogni 100 esistenti ad inizio periodo, contro lo 0,86 che si osserva in ambito nazionale). Per l'indicatore la provincia si colloca al 104-esimo posto nella graduatoria nazionale, l'analisi della performance dell'indicatore permette di trovare la spiegazione tanto nel risultato del tasso di natalità imprenditoriale, quanto nel tasso di mortalità le cause, di fatto Cremona si attesta rispettivamente in 89-esima e 21-esima posizione tra le province del Paese. La struttura imprenditoriale per forma giuridica mostra la notevole presenza di imprese di società di persona, circa 7.400 pari al 24,5% del complesso delle imprese rilevate al 31-12-2013.

23.7.3 Mercato del lavoro

Nell'ambito dell'analisi tendenziale del tasso di disoccupazione di Cremona si può ripetere lo stesso discorso già valido per altre realtà lombarde, infatti, nella rilevazione relativa al 2010 l'indice si collocava al 6,6%, mentre nel 2011 l'indice subiva una discreta contrazione attestandosi al 5,4%. Nella rilevazione relativa al 2012 l'indicatore occupazionale registrava il 6,8% collocando Cremona al 97-esimo posto nella graduatoria decrescente delle province del Paese, al di sotto sia della realtà regionale (7,5%), sia della realtà nazionale (10,7%), mentre nel 2013 Cremona tocca quota 9,1% facendo salire la provincia fino all'attuale 72-esima posizione nel ranking nazionale. Soddisfacente comunque è la situazione per coloro che cercano lavoro, in termini assoluti, pari a circa 14.700 unità. L'indicatore relativo al saldo occupazionale previsto nel 2014 è pari al -1,30, 25-esimo valore nazionale, che risulta inferiore al corrispettivo nazionale -1,50.

23.7.4 Risultati economici

La provincia di Cremona presenta un'incidenza del proprio valore aggiunto sul totale nazionale pari allo 0,59% (in flessione rispetto alla precedente rilevazione pari allo 0,65%), piazzandosi in 52-esima posizione nella relativa graduatoria. Per quanto concerne il valore pro-capite si rileva un dato (**23.000 euro**) che non si distacca molto dalla media italiana (23.500), ma che rimane comunque largamente inferiore a quello regionale (30.700). Risulta il settore dell'industria nel complesso

(manifatturiero e costruzioni) il settore trainante nella provincia di Cremona, infatti con il 35,5% si colloca al 13-esimo posto nazionale. Nonostante l'incidenza del valore aggiunto dell'artigianato sul totale (17,4%), risulti superiore sia al dato medio regionale (11,7%) che a quello italiano (12,6%), Cremona occupa la 24-esima posizione nella relativa graduatoria nazionale in una posizione quindi complessivamente confacente al peso esercitato dal settore in termini di numero di imprese. Da segnalare infine l'importanza della zootecnia sul totale della produzione agricola che colloca la provincia al quarto posto nazionale.

23.7.5 Apertura mercati

Per quel che concerne gli scambi internazionali la provincia di Cremona, nell'anno 2013, ha esportato merci per un valore pari a circa **3,46 miliardi di euro**, con una propensione all'esportazione (41,8) sensibilmente superiore sia se il riferimento è quello del Paese (27,9), sia rispetto al sistema regionale e macro ripartizionale (36 – 34,5). La debole dipendenza dalle esportazioni, pari a 2,66 miliardi di euro, si traduce in un saldo commerciale positivo pari a circa 807 milioni di euro, fa si che il tasso di apertura si collochi su un valore pari a 73,9, con un differenziale di circa 20 punti in più rispetto al dato nazionale. La distribuzione delle merci maggiormente esportate vedono prevalere in modo piuttosto netto i prodotti legati al settore metalmeccanico che assorbe circa il 60,7% dell'export provinciale (22-esima provincia nel ranking nazionale), anche il settore della chimica rappresenta una fetta cospicua dell'export di Cremona, con il 14,6% rappresenta la 49-esima realtà nazionale; i Paesi interessati dalle esportazioni provinciali sono soprattutto l'Europa con il 82,8%, l'America con il 6,4%, e l'Asia con il 7,8%. Il panorama delle importazioni si presenta simile a quello delle importazioni, dove troviamo il settore metalmeccanico con il 36,9% e quello chimico con il 25,9,9% per i quali la provincia si colloca rispettivamente 38-esima e 31-esima nel contesto nazionale, di provenienza soprattutto europea per il 85,1%, americana per il 4,8% e asiatica per il 9,2%.

23.7.6 Porto di Cremona

Il Porto di Cremona, che dista dal mare Adriatico circa 280 km, è lo scalo portuale più a ovest della Pianura Padana, dove si registrano le più alte concentrazioni di popolazione, di industrie e di imprese dell'Italia settentrionale. Il porto dista da 83 km Milano, 55 km da Brescia, 100 km da Bergamo, 40 km da Piacenza, 90 km da Pavia e 75 km da Parma.

Il porto di Cremona è dotato di capannoni ed attrezzature per la movimentazione delle merci. E' servito da un raccordo ferroviario, che dalla stazione di Cava Tigozzi scende al porto ed alla zona industriale in fregio al canale navigabile Milano/Cremona.

Il porto di Cremona rappresenta un importante centro intermodale, grazie alla peculiarità di poter disporre delle tre modalità di trasporto: acqua, ferro e gomma. Inoltre, favorendo l'integrazione tra navigazione interna e navigazione marittima a corto raggio, il porto di Cremona si candida a rappresentare il punto di maggior penetrazione del Corridoio Adriatico ed essere luogo di connessione per gli scambi tra Europa settentrionale e meridionale.

Dista 280 km dallo sbocco a mare di Porto Levante e 135 km dalla idrovia Mantova-Mare, che, in quanto artificiale, è navigabile tutto l'anno con fondali certi. È situato all'inizio del tratto esistente del canale navigabile Milano/Cremona, che raggiunge, con una lunghezza di 13 km, l'area portuale di Pizzighettone. Nel porto si trovano la Dogana di Cremona, che è dotata di uffici, piazzali e magazzino raccordato, e la sede degli uffici portuali dell'Amministrazione Provinciale di Cremona, in grado di ospitare anche servizi per gli utenti e attività commerciali e direzionali collegate al porto. Va inoltre menzionato uno studio di fattibilità in via di perfezionamento che riguarda la realizzazione di una ulteriore area industriale e logistica in località Tencara che dista 750 metri dal porto esistente, della dimensione di 100 ettari che andrebbe ad aggiungersi alle già importanti dotazione attuali. Il porto infatti dispone di ampi piazzali, capannoni per lo stoccaggio di differenti tipi di merci, inclusi i carichi eccezionali e/o pericolosi, e per il carico e lo scarico di natanti di coperto, banchine pubbliche ed efficienti mezzi di sollevamento. Due darsene, di cui una a servizio degli insediamenti del Consorzio Agrario Provinciale (granaglie, mangimi, fertilizzanti ecc.) e Acciaieria Tubificio Arvedi (semilavorati, coils rottame ferroso ecc.) con sviluppo complessivo di 200 m ed una di proprietà di ABIBES s.p.a., con sviluppo di 100 m, per l'attracco di bettoline contenenti gas propano liquido per il rifornimento del proprio deposito costiero

La Dogana di Cremona è dotata di uffici, piazzali e magazzino raccordato, e la sede degli uffici portuali dell'Amministrazione Provinciale di Cremona, in grado di ospitare anche servizi per gli utenti, attività commerciali e direzionali collegate al porto. Nel 2009 è stata inaugurata una linea di collegamento via fiume per il trasporto delle merci fra Venezia e Cremona.

1.100.000 tonnellate di merci movimentate nel 2007. In netto aumento rispetto all'anno precedente (766.000 ton.). Il porto dista pochi km dal centro di Cremona. E' connesso alla rete viaria esterna attraverso la SS 234 "Codognese". Collegamenti autostradali nelle vicinanze: A21 "Torino-Piacenza-Brescia", utilizzando lo svincolo di Cremona Nord (distante 8 km) o di Castelvetro Piacentino (distante 9 km); - A1 "Milano-Napoli" (svincolo Fiorenzuola), utilizzando la diramazione dell'A21 (lunga 12 km) distante solo 5 km dallo svincolo di Castelvetro Piacentino.

23.7.7 Comparto turistico

La rete idroviaria, oltre che essere utilizzata per il trasporto delle merci, accoglie una vasta gamma di attività legate alla fruizione turistica del Po, della laguna veneta e delle città d'arte di Mantova, Ferrara, Chioggia e Venezia. In particolare il contesto ha richiamato, nel passato, un turismo crocieristico su itinerari di lungo raggio dalle città dell'entroterra padano a Venezia. Si focalizza l'analisi su quest'ultimo comparto, prossimo per affinità ad un ipotetico turismo fluvio-marittimo. Il turismo crocieristico sul fiume Po ha subito negli ultimi anni una consistente ed evidente flessione.

Paese di residenza dei clienti	arrivi		presenze		totale	
	Paesi esteri	Italia	Paesi esteri	Italia	arrivi	presenze
Italia	50.263.236	53.599.294	184.793.382	191.992.233	103.862.530	376.785.615
Totale province	2.903.336	2.194.399	13.223.399	6.159.389	5.097.735	19.382.788
Cremona	41.157	134.768	97.152	228.214	175.925	325.366
Mantova	66.212	160.782	168.396	339.807	226.994	508.203
Verona	2.438.444	1.256.592	11.016.322	3.078.812	3.695.036	14.095.134
Rovigo	128.437	141.582	776.296	705.112	270.019	1.481.408
Reggio nell'Emilia	74.727	191.693	158.245	412.906	266.420	571.151
Ferrara	154.359	308.982	1.006.988	1.394.538	463.341	2.401.526

Fonte: elab. Unioncamere Veneto su dati Istat

Tabella 182 - Arrivi e presenze nel complesso degli esercizi ricettivi per provincia e residenza della clientela. Anno 2013

Il Po, date le grandi dimensioni e la notevole lunghezza, è l'unico fiume italiano lungo il quale sia possibile organizzare itinerari per le crociere fluviali. Nonostante il fiume sia oggi navigabile in quinta classe CEMT fino a Cremona, le compagnie crocieristiche lo risalgono solo parzialmente. Le imprese che organizzano crociere fluviali sono Uniworld (dal 2014) e CroisiEurope ed entrambe svolgono un itinerario molto simile che prevede una sosta di più giorni a Venezia e la risalita del Po solamente fino a Polesella, in provincia di Rovigo.

Durante la crociera sono previste escursioni a terra, presso le città di Ferrara, Bologna, Verona e Padova. Negli anni passati, CroisiEurope ha organizzato crociere di sola andata tra Cremona e Venezia, ma successivamente ha deciso modificare l'itinerario favorendo la crociere di andata e ritorno da Venezia. Una barge di European Waterways e due barges dell'operator locale Girolibero, che organizza crociere di cicloturismo, operano lungo l'itinerario Mantova-Venezia.

I porti di Cremona e Mantova sono i due più importanti porti interni del Po: in entrambe le località esistono sporadiche attività di escursionismo nautico. Più numerose sono le escursioni in barca nel Delta del Po, che è un'area rinomata a livello nazionale per il contesto ambientale incontaminato. Anche attività commerciali, come villaggi e tenute, organizzano gite su piccole imbarcazioni o pontoonboat ampliando l'offerta di servizi al cliente. Molte escursioni sviluppano il tema del pescaturismo, svolgendo itinerari mirati alla scoperta dei luoghi e delle tradizioni dei pescatori della zona. Il noleggio di houseboat nel Delta del Po è drasticamente diminuito da quando l'unica azienda presente sul territorio, Houseboat Holidays Italia (partner Le Boat), ha chiuso la base di

partenza della zona per incrementare l'attività nella rete navigabile del Veneto e del Friuli Venezia Giulia: i problemi riscontrati nella zona sono la mancanza di ormeggi pubblici e porti, le condizioni di navigazione maggiormente restrittive, in quanto il Po è una via navigabile soggetta a corrente e a piene, e un'inferiore attrattività turistica dei paesi situati lungo le vie navigabili. Alcune houseboat raggiungono ancora il Po dalla laguna di Venezia, ma il loro numero è esiguo.

Uno dei grandi limiti per lo sviluppo del turismo fluviale lungo il Po è la scarsità di ormeggi pubblici e porti: il turismo fluviale richiede ormeggi diffusi ed attrezzati con facilities. I soli porti che si trovano lungo la tratta Cremona-Adriatico sono situati a Cremona, Boretto, Mantova, Rovigo e Porto Levante.

L'asse fluviale del Po nel 2014 hanno totalizzato **2,8 milioni di arrivi e 11 milioni di presenze** (stime del Centro Studi Turistici su dati regionali e provinciali), con il 74,9% di arrivi e il 73,7% di presenze nazionali (25,1% di arrivi e 26,3% di presenze straniere). L'incidenza dei flussi turistici in questi comuni dell'Area Po sul totale delle province interessate è stata, nel 2014, rispettivamente del 46,6% per gli arrivi e del 57,4% delle presenze. La capacità ricettiva dell'intera area del fiume Po consta di 4.030 tra esercizi alberghieri ed extralberghieri, per complessivi 107.417 posti letto. Nell'area Po emiliano romagnola (608 esercizi tra alberghieri ed extralberghieri, per 38.887 posti letto complessivi) l'anno scorso si sono totalizzati 5.352.634 presenze e 817.052 arrivi. I 22 operatori accreditati alla Borsa provengono da Austria (2), Belgio (2), Brasile (1), Danimarca (2), Francia (2), Germania (2), Italia (4), Olanda (2), Regno Unito (1), Irlanda (1), Spagna (1), Svizzera (1) e Stati Uniti (1).

23.7.8 Progetto Interregionale di Valorizzazione del fiume Po

Il progetto prende avvio dalla volontà di attivare sinergie tra territori di confine accomunati da un forte elemento di attrazione ambientale e culturale per sviluppare una forma di turismo "alternativo", basata su principi di sostenibilità e di integrazione delle risorse naturali e antropiche presenti.

Il paesaggio, l'agricoltura con i suoi prodotti tipici, le bellezze architettoniche che contraddistinguono i territori della fascia fluviale del PO, dalla sorgete al delta, testimoniano la storia di queste terre e possono validamente costituire una valida integrazione alla tradizionale offerta turistica delle quattro regioni.

Il progetto, articolato in interventi di tipo strutturale, infrastrutturale, formativo e promozionale, prevede lo sviluppo di un turismo di qualità, ad altro valore aggiunto, che aumenti l'indotto economico di tutto il settore terziario e destagionalizzi i flussi turistici con importanti e positivi risvolti sul territorio sulla sua riqualificazione ambientale e urbana.

24 IDENTIFICAZIONE DEL PROGETTO E DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI

Obiettivo del progetto è il potenziamento della navigabilità del Po nei tratti in cui non è attualmente navigabile nell'arco di tutto l'anno.

Il progetto globale di lungo termine prevede quindi lo sviluppo del sistema idroviario dell'Italia del Nord nel suo insieme tramite il miglioramento dei collegamenti e delle interconnessioni multimodali con gli assi stradali, ferroviari e delle autostrade del mare di rilevanza europea così come espresso da Libro Bianco sui Trasporti ed in conformità ai contenuti della 53° sessione del gruppo di lavoro sulle navigabilità ed il trasporto delle Acque interne (ECE/TRANS/SC.3/183).

Il progetto è finalizzato alla individuazione di soluzioni che sia nel breve che nel lungo termine, portino alla navigabilità del fiume per almeno 300-365 gg anno.

Il progetto ha individuato la possibilità di mantenimento delle condizioni di navigabilità a corrente libera attraverso un inserimento oculato di " pennelli" fino al delta e quindi della possibilità nel medio lungo termine di arrivare ad una regimazione del fiume Po attraverso l'utilizzo di conche e quindi ad una soluzione mista in cui sono previsti sia conche che pennelli tali da estendere il più possibile le giornate di navigazione fino ad allinearsi alle previsioni di aumento del traffico da solo fluviale a fluvio-marittimo.

Il progetto preliminare elaborato nel 2009 prevedeva l'installazione nelle 5 conche allora individuate di turbine per la produzione di energia idroelettrica considerando ampi contributi da parte dello stato per ogni Kilowattora prodotto. L'eliminazione di tali contributi ha portato il proponente a rivedere tale opzione, considerata come facoltativa in questa versione del documento.

24.1 PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

Il progetto preliminare elaborato nel 2009 prevedeva l'installazione nelle 5 conche allora individuate di turbine per la produzione di energia idroelettrica considerando ampi contributi da parte dello stato per ogni Kilowattora prodotto. L'eliminazione di tali contributi ha portato il proponente a riconsiderare in un primo tempo tale opzione. Purtuttavia le soluzioni tecniche individuate per la costruzione delle traverse potrebbero permettere l'installazione di turbine in un secondo momento. Anche se non si prevede nel breve e medio periodo una reintroduzione di benefici tariffari alla produzione di energia idroelettrica, le seguenti ABC per ogni ipotesi ove son previste le traverse ne considera sia la presenza che assenza perché le turbine ipotizzate, di nuova generazione, essendo formate da set di package modulari ne potrebbero consentire l'installazione in virtu' di possibili future favorevoli circostanze.

Dal punto di vista dell'analisi finanziaria i costi e i benefici dovuti alla produzione di energia elettrica possono essere considerati sotto diversi punti di vista. AIPO al momento non è autorizzata a produrre energia elettrica né tantomeno ad incassare direttamente il pagamento di un contributo di concessione da un eventuale operatore privato, quindi le ipotesi legate alla produzione di energia elettrica sottendono un cambiamento di status la cui verifica di fattibilità non rientra negli scopi del presente rapporto. In ogni caso, nell'analisi finanziaria si è scelto l'approccio di una AIPO in grado legalmente di produrre energia elettrica e di rivenderla, scenario che al momento è puramente teorico e finalizzato solo alla verifica della fattibilità complessiva dell'ipotesi.

Per quanto riguarda l'analisi economica, si è scelto di considerare come unico beneficio derivante dalla produzione elettrica quello legato alla componente ambientale relativa alla non produzione di GHC ed in particolare della CO2 in relazione ad una medesima quantità di produzione di energia elettrica rapportata ad una centrale termoelettrica a gas. L'assunto è che mentre gli investimenti e

i costi di manutenzione dovuti alla parte idroelettrica sono comunque un onere sociale (seppure mitigati dalla produzione di lavoro, espressi tramite prezzi/ombra), i flussi di cassa dovuti alla vendita di energia elettrica rappresentino solo una partita di giro nell'ottica di uno scenario dove la produzione di energia stessa rappresenta un bene marginale, il cui valore principale viene invece rappresentato – come già detto sopra – dalla mancata emissione di sostanze nocive che si avrebbero con altri sistemi di produzione.

24.2 ANALISI DELLA DOMANDA DI TRAFFICO

La domanda di traffico è stata stimata per un orizzonte temporale di 20 anni a partire dalla data di completamento e di inizio operatività delle opere previste in sintonia con la "*Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects*" [1] del dicembre 2014 (di seguito indicata genericamente anche come "*Guida*"). Tale domanda di traffico è stata stimata tenendo in considerazione l'attuale bassissimo livello di traffico che si è venuto a determinare dal 2009 e dalla contemporanea opportunità di considerare il sistema di trasporto "fluvio-marittimo" e non solo quello fluviale. Tale cambiamento di paradigma , non solo ampia evidentemente il "bacino" di riferimento" dell'idrovia, ma conferma la visione " Nazionale ed Europea" del sistema idroviario non più relegandolo ad una questione " regionale" e quindi considerando questo progetto come uno degli elementi della competitività del paese in confronto ai porti del Nord Europa, in merito alle questioni ambientali, delle esternalità da prendere in considerazione per una corretta valutazione della complessità del trasporto e della logistica che coinvolge i porti del Nord Adriatico, buona parte della pianura padana, del centro Europa, della Germania, dell'Austria e dell'Ungheria. Da qui la presa visione di diverse valutazioni di traffico che fanno riferimento a:

- le analisi effettuate per conto di AIPO da Class nel febbraio 2015[2] in merito al progetto "Implementazione del Sistema Idroviario del Nord Italia al fine dell'adeguamento del trasporto agli standard di Classe V CEMT" nell'ambito degli interventi di ricostruzione della Conca Serafini, di adeguamento dei ponti di Canozio e di Rosolina, di costruzione di un bacino di evoluzione a Porto Levante e di realizzazione del canale Boicelli;
- le analisi svolte nel 2009 dal Progetto denominato "Attività e Studi Propedeutici Relativi Alla Regimazione Del Po nel Tratto tra Cremona e Foce Mincio Ipotesi, Analisi e Verifiche Preliminari";
- le analisi e previsione di traffico relative ad uno studio di mercato commissionato da NAPA (North Adriatic Port Authority) a MDS Transmodal per le previsioni di sviluppo nel settore container per il sistema dei porti adriatici del nord (dicembre 2013)[3];
- le recentissime indicazioni del Piano nazionale della portualità e della Logistica
- il parere autorevole dell'Associazione delle società di logistica e terminaliste che afferma che "In Italia bastano solo quattro porti strategici per i container", di cui tre scali gateway - Taranto per il sud, La Spezia per il nord e Trieste per l'Europa orientale – e Gioia Tauro come transhipment;
- l'analisi del traffico OD sulla Autostrada A 14 –A1 nel tratto Ravenna – Imola -Bologna- Milano;
- l'analisi del traffico OD sulla Autostrada A4 nei tratti Trieste –Venezia –Brescia Milano.

Questa analisi b/c tiene inoltre in considerazione ai fini della valutazione del traffico potenziale sino al 2049, le potenzialità ancora oggi inespresse relative a mezzi di Classe Va fluvio-marittima in

[1] Un importante riferimento per questo studio è quello della "Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects - Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020", preparata dalla Commissione europea, Direzione generale della Politica regionale e urbana REGIO DG 02. Questo documento è più volte citato in questo testo, ed è reperibile on-line all'indirizzo: http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/studies/pdf/cba_guide.pdf

[2] "L'implementazione del Sistema Idroviario del Nord Italia al fine dell'adeguamento del trasporto agli standard di Classe V – Analisi costi benefici". Studio sviluppato da Gruppo CLAS per conto di AIPO, 23 febbraio 2015

[3] "Update of market study on the potential cargo capacity of the North Adriatic ports system in the container sector", preparato da MDS Transmodal nel dicembre 2013 per il consorzio NAPA

grado navigare sia sul fiume che in mare entro 6 miglia dalla costa con riferimento prevalente ai Porti di Trieste/ Capodistria, ma anche di altri porti del Mar Adriatico. Questa quota è stata valutata in termini di potenziale incremento della domanda, sia attraverso analisi di sensitività, sia attraverso una specifica correzione delle elaborazioni di CLAS come di seguito descritto.

La stima della domanda di traffico tiene inoltre in considerazione gli obiettivi di quote di traffico derivata da altra modalità di trasporto (strada) secondo le direttive del Libro Bianco su trasporti del 2011.

E' stata inoltre considerata l'opzione "senza progetto" essendo l'alternativa di base sulla quale vengono poi confrontate altre alternative e scenari.

Il traffico stimato nello studio CLAS/AIPO del febbraio 2015 prevede le quote di spostamento modale presentate nella tabella successiva.

Anno	Variazione della domanda di traffico		
	Mod. idroviaria	Mod. stradale	Mod. ferroviaria
	Tonn x km		
2016			
2017			
2018	144.272.156	-120.505.056	-15.105.451
2019	234.503.984	-213.485.282	-30.206.309
2020	340.060.219	-318.462.594	-46.510.507
2021	445.590.478	-423.414.326	-62.809.974
2022	551.094.370	-528.340.093	-79.104.639
2023	574.020.036	-547.746.482	-81.444.849
2024	597.059.336	-567.263.632	-83.802.041
2025	606.015.226	-575.772.586	-85.059.072
2026	615.105.454	-584.409.175	-86.334.958
2027	624.332.036	-593.175.313	-87.629.982
2028	633.697.017	-602.072.943	-88.944.432
2029	643.202.472	-611.104.037	-90.278.598
2030	652.850.509	-620.270.597	-91.632.777
2031	662.643.267	-629.574.656	-93.007.269
2032	672.582.916	-639.018.276	-94.402.378
2033	682.671.659	-648.603.550	-95.818.414
2034	692.911.734	-658.332.603	-97.255.690
2035	703.305.410	-668.207.593	-98.714.525
2036	713.854.992	-678.230.706	-100.195.243
2037	724.562.816	-688.404.167	-101.698.172
2038	735.431.259	-698.730.230	-103.223.644
2039	*746.462.728*	*-709.211.183*	*-104.771.999*
2040	*757.659.668*	*-719.849.351*	*-106.343.579*
2041	*769.024.564*	*-730.647.091*	*-107.938.733*
2042	*780.559.932*	*-741.606.797*	*-109.557.814*
2043	*792.268.331*	*-752.730.899*	*-111.201.181*
2044	*804.152.356*	*-764.021.863*	*-112.869.198*

Tabella 183 - Variazione della domanda di traffico sui diversi modi di trasporto – scenari di progetto (ipotesi di base da studio AIPO/CLAS senza correzioni)

Fonte: Studio AIPO/CLAS febbraio 2015 (dati da 2029 estrapolati sulla base di un fattore di crescita costante pari a 1,5% annuo)

I dati della precedente tabella sono stati poi presi come base conservativa per l'analisi b/c, e come già detto, utilizzati anche per un successivo sviluppo che tiene in conto il possibile sviluppo del fluvio-marittimo.

L'approccio di base rimane di tipo conservativo, considerando i seguenti fattori:

- lo studio di CLAS si basa su di un progetto infrastrutturale più semplice e meno articolato rispetto a quelle che si hanno in questo studio;
- CLAS, giustamente, non ha tenuto conto nel suo studio di alcune possibilità aggiuntive aperte da un investimento di portata maggiore, e ha adottato un tasso di annuo di crescita del traffico pari a 1,5%, costante fino al 2038 (questo valore è poi stato esteso in questo studio fino al 2044).

A tal fine , può essere utile confrontare i dati dello studio AIPO/CLAS con le analisi e previsioni di traffico preparate dal consorzio NAPA per i porti del Nord Adriatico.

Porto	**Traffico anno 2012 (TEU x 106 / anno)**	**Traffico anno 2030 (TEU x 106 / anno)**	**Variazione % 2012-2030**
Capodistria	0,54	2,08	+285%
Ravenna	0,19	0,72	+279%
Fiume	0,2	0,42	+110%
Trieste	0,28	1,78	+536%
Venezia	0,44	0,9	+105%
Totale	**1,65**	**5,9**	**+227%**

Tabella 184 – Previsioni di crescita del traffico intermodale nei porti del Nord Adriatico (anni 2012 – 2030)

Fonte: Studio "Update of market study on the potential cargo capacity of the North Adriatic ports system in the container sector", vedi nota precedente

Secondo lo studio NAPA/MDST. I porti del Nord Adriatico nel loro complesso passerebbero da 1,65 milioni di TEU annui nel 2012 a 5,9 milioni di TEU annui nel 2030, con un incremento pari al 7,3% annuo.

Deve essere osservato che lo studio NAPA/MDST prevedeva per Trieste una crescita dai 0,28 milioni di TEU del 2012 a 1,78 nel 2030, con un incremento medio annuo del 10,8%. Questo avrebbe dovuto corrispondere ad un traffico di 0,38 milioni di TEU nel 2015, quando invece il traffico nell'anno appena concluso è stato di 0,5 milioni di TEU[4], pertanto gli stessi dati NAPA/MDST si stanno confermando, al momento, leggermente sottostimati.

A fronte di questa crescita, l'impatto sulle regioni padane (intese in questo caso come Veneto, Emilia Romagna e Lombardia) sarebbe quello delle due aree illustrate nelle figure seguenti, anch'esse tratte dallo studio NAPA/MDST.

[4] Fonte: Autorità Portuale di Trieste, http://www.porto.trieste.it/wp-content/uploads/2016/01/CS-APT-11.01.16-TRAFFICI-2015-TRIESTE-PRIMO-PORTO-ITALIANO-PER-VOLUMI-TOTALI.pdf

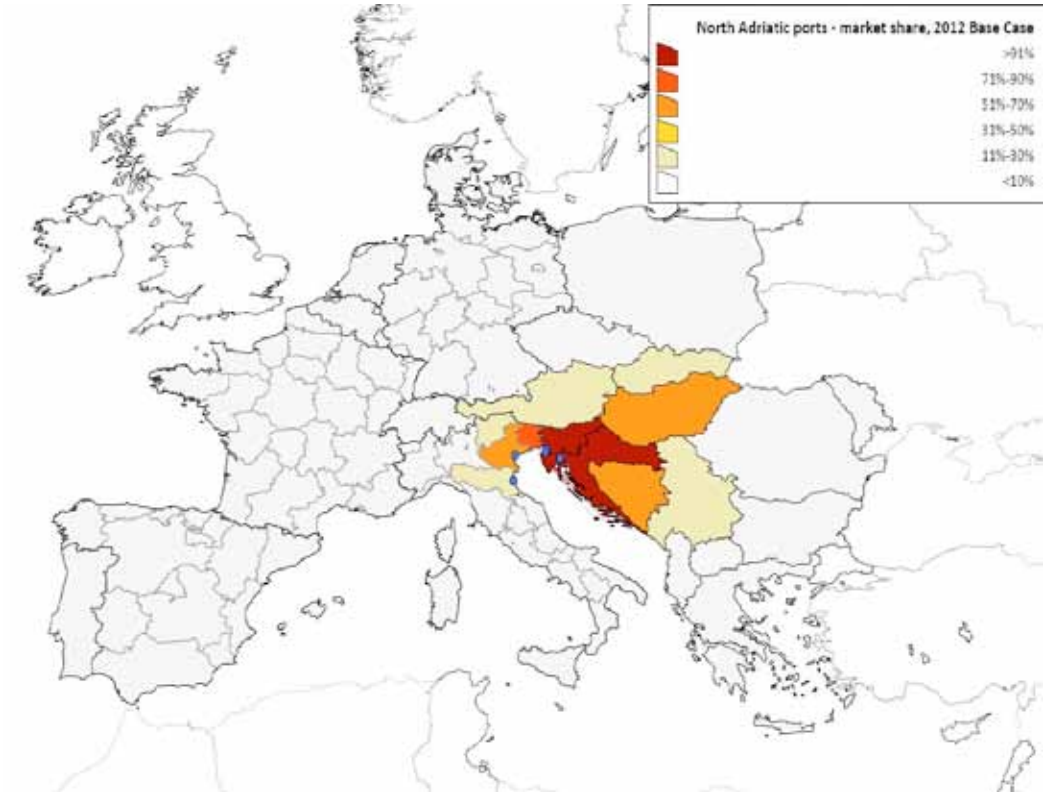


Figura 528 – Quote di mercato intermodale riferite ai porti del Nord Adriatico per ciascuna regione europea: situazione anno 2012. Fonte: studio "Update of market study on the potential cargo capacity of the North Adriatic ports system in the container sector", vedi nota precedente

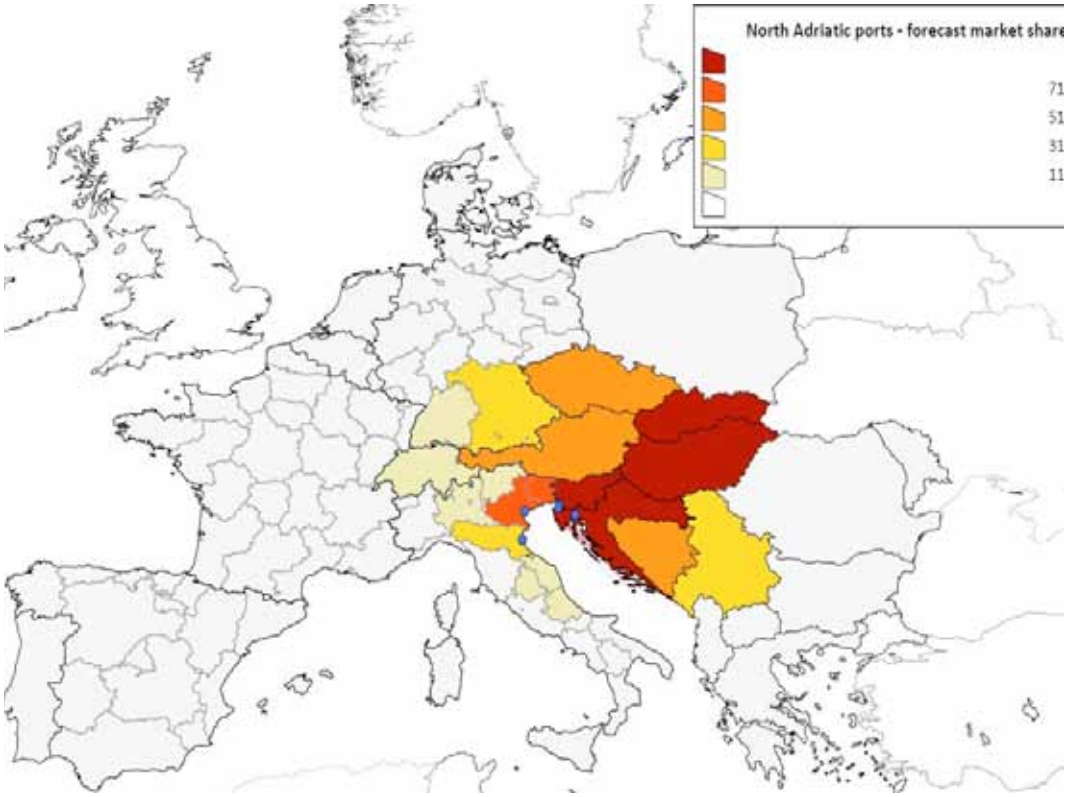


Figura 529 – Quote di mercato intermodale riferite ai porti del Nord Adriatico per ciascuna regione europea: previsione anno 2030. Fonte: studio "Update of market study on the potential cargo capacity of the North Adriatic ports system in the container sector", vedi nota precedente

Come è possibile vedere dalle due figure precedenti, la quota di mercato intermodale delle regioni Veneto, Emilia Romagna e Lombardia riferita ai porti del Nord Adriatico è destinata a crescere passando, per la Lombardia, da una quota trascurabile a valori fino al 30%, e per l'Emilia Romagna da valori inferiori al 30% fino a valori fino al 50%. Questo rafforzerebbe il legame tra le regioni padane, il sistema Po e i porti del Nord Adriatico (in particolare Trieste e Capodistria, ovvero i due porti a maggior traffico intermodale) e con i loro forti trend di crescita. È possibile, anzi probabile, che tali tendenze di crescita non siano destinate a perdurare per un tempo indefinito, ma rimane comunque evidente come a fronte di certi valori l'ipotesi di una crescita annua del 1,5% dei traffici sull'asse Est/Ovest (e viceversa) della Pianura Padana sia, come già detto, da ritenersi prudenziale.

E' questo il motivo per il quale in questa analisi è stata ipotizzata una stima di traffico meno conservativa, sempre basata sui dati CLAS, ma con un riferimento alle possibilità di crescita espresse dallo studio NAPA/MDST. Chiaramente questa seconda ipotesi è fortemente vincolata alla possibilità espresse dalla navigazione fluvio-marittima.

La stima di traffico meno conservativa si basa sull'identificazione delle direttrici origine/destinazione tra quelle già analizzate da CLAS che potrebbero essere più interessate ad essere "prolungate" verso Trieste / Capodistria, con un doppio effetto:

- un incremento delle distanze percorse, quindi una maggiore appetibilità in termini di diversione modale e una maggiore produttività in termini trasportistici (ovvero, in termini di tonnellate x km)
- una connessione diretta ai forti tassi di crescita della domanda previsti per Trieste e Capodistria
- Le direttrici soggette al "prolungamento" sono quindi le seguenti:
- Cremona – Mare Adriatico, che diventa Cremona – Trieste/Capodistria
- Terminal Emilia Centrale – Boretto – Mare Adriatico, che diventa Terminal Emilia Centrale – Boretto – Trieste/Capodistria
- Piacenza – Mare Adriatico, che diventa Piacenza Trieste/Capodistria

L'implementazione di un servizio fluvio-marittimo può inoltre offrire connessioni dirette tra Trieste/Capodistria e le origini/destinazioni a valle dell'intervento infrastrutturale proposto (Mantova, Rovigo, Ferrara, ecc…), ma questo ulteriore effetto non è stato considerato in queste proiezioni di traffico aggiuntive.

L'ipotesi fatta, una volta identificate le direttrici "prolungate", è che l'80% del traffico stimato da CLAS per queste direttrici raggiunga direttamente Trieste/Capodistria, e che il trend di crescita di questa quota di traffico si agganci a quella prevista nello studio NAPA/MDST per il porto di Trieste. La scelta di una quota pari all'80% è arbitraria, ma si deve tenere conto che l'obiettivo in questo caso è quello di testare il modello, dando per scontato che studi di traffico più dettagliati saranno necessari nelle ulteriori fasi di sviluppo. Da qui , la proposta di una versione aggiornata della precedente Tabella 183 di pagina 270,di cui alla successiva Tabella 185.

Anno	Variazione della domanda di traffico		
	Mod. idroviaria	Mod. stradale	Mod. ferroviaria
	Tonn x km		
2016			
2017			
2018	160.256.125	-133.855.858	-16.778.990
2019	266.283.003	-237.137.400	-33.552.878
2020	392.430.524	-353.745.189	-51.663.424
2021	518.548.249	-470.324.565	-69.768.716
2022	644.635.727	-586.875.098	-87.868.673
2023	696.454.184	-634.050.520	-94.931.916
2024	751.221.482	-683.910.560	-102.397.109
2025	798.552.472	-727.000.601	-108.848.677
2026	850.488.195	-774.282.781	-115.927.905
2027	907.518.359	-826.202.930	-123.701.543
2028	970.185.442	-883.254.919	-132.243.535
2029	1.039.090.394	-945.985.852	-141.635.795
2030	1.114.898.957	-1.015.001.819	-151.969.070
2031	1.159.604.397	-1.055.701.564	-158.062.756
2032	1.206.491.445	-1.098.387.440	-164.453.811
2033	1.255.674.420	-1.143.163.524	-171.157.819
2034	1.307.273.763	-1.190.139.464	-178.191.195
2035	1.361.416.363	-1.239.430.781	-185.571.237
2036	1.418.235.912	-1.291.159.187	-193.316.166
2037	1.477.873.263	-1.345.452.913	-201.445.184
2038	1.540.476.817	-1.402.447.066	-209.978.516
2039	1.563.583.970	-1.423.483.772	-213.128.194
2040	1.587.037.729	-1.444.836.029	-216.325.117
2041	1.610.843.295	-1.466.508.570	-219.569.994
2042	1.635.005.945	-1.488.506.198	-222.863.544
2043	1.659.531.034	-1.510.833.791	-226.206.497
2044	1.684.423.999	-1.533.496.298	-229.599.594

Tabella 185 - Variazione della domanda di traffico sui diversi modi di trasporto – scenari di progetto (ipotesi corretta da studio AIPO/CLAS, con incremento dei trend di crescita e delle distanze percorse)

Fonte: elaborazione da Studio AIPO/CLAS febbraio 2015 su ipotesi presentate nel testo

I valori presentati nella tabella precedente sono quindi basati su un trend di crescita della sola componente fluvio-marittima pari al 10,8% annuo fino al 2030, che si dimezza nel periodo 2031 – 2038 e che infine si stabilizza su un valore pari a 1,5% a partire dal 2039. La tabella tiene anche in conto di una corrispondente diminuzione, in termini di tonnellate x km, delle componenti stradale e ferroviaria.

Come illustrato nel capitolo 28, (Risultati delle elaborazioni, pag. 280 e seguenti) i valori della Tabella 185 sono stati applicati solo alle ipotesi infrastrutturali che prevedono la costruzione di sbarramenti, nell'ipotesi che siano questi gli scenari più favorevoli alla navigazione di imbarcazioni con caratteristiche fluvio-marittime (vedi paragrafo successivo).

24.3 NAVIGLIO

Come sopra accennato questo progetto fa riferimento alle potenzialità che possono derivare dal trasporto fluvio-marittimo, considerando che il trasporto fluviale potrebbe nelle condizioni attuali solo sopravvivere essendo oramai limitato al trasporto di materiali inerti (sempre meno in virtù di un ciclo edilizio /infrastrutturale oramai in declino), ad alcuni carichi di merce pericolosa, prodotti petroliferi e chimici anch'essi in diminuzione. Di fatto sono spariti i carichi relativi agli sfarinati, quello relativo ai coils sino alla saltuarietà e con molte difficoltà di qualche trasporto di carichi eccezionali (solo sino a quando una delle più importanti compagnie di trasporto per carichi ingombranti avrà voglia di continuare a sostenerne le perdite). La conseguenza è il fermo quasi totale del naviglio esistente sia di Classe IV e delle poche imbarcazioni di classe V ormeggiate lungo il fiume e nei principali approdi quali Porto Levante, Chioggia, Marghera ed altri attracchi. Di fatto essendosi il mercato rarefatto non ci sono stati diffusi interventi di ammodernamento della flotta esistente, sì che nella maggioranza dei casi i natanti risultano obsoleti e solo a costi altissimi potranno essere ricombinati verso il fluvio-marittimo.

Tenendo inoltre in considerazione che deve essere il naviglio ad adattarsi al fiume e non viceversa, questo studio ha preso in considerazione per il futuro della navigazione fluvio- marittima due fra i riferimenti più importanti di imbarcazioni studiate apposta sia per il fiume che per la navigazione marittima entro le 6 miglia dalla costa. Ipotesi che prevede di captare le potenzialità favorevoli derivanti dagli scenari della navigazione detta "deep sea", ovvero delle rotte che collegano l'Estremo Oriente con l'Europa. Tale scenario confermato dalla decisione dei due più grandi carrier marittimi del mondo, GMA e MSC è quello di mettere in comune le loro grandi navi porta container (da oltre 8.000 sino a 20.000 container) su tali rotte e per quanto attiene il presente progetto, di aver identificato il Porto di Trieste e Capodistria (avendo acque di ingresso profonde ed atte ad ospitare mega navi), come destinazioni finali per le merci destinate al Sud del Nord Europa ed alla Pianura Padana. Complessivamente, il solo porto di Trieste ha movimentato lo scorso anno 57,1 milioni di tonnellate (+0,1%) di cui 501.276 TEU, con un calo dello 0,9% rispetto all'anno precedente ma con una tendenza ad un forte recupero nella seconda metà dell'anno.)

Tali motonavi fluvio-marittime ancora non sono presenti lungo l'idrovia considerata e dovrebbero essere gioco forza costruite ex novo, in un numero sufficiente per affrontare il mercato potenziale dei container (oltre che delle rinfuse ed altri quali liquidi e pericolosi) ed in concomitanza con la piena operatività dell'idrovia in una ipotesi con una regimazione mista approfittando del consolidamento del mercato deep sea. Successivamente e contemporaneamente anche altre destinazioni finali di origine/destinazione sia lungo la costa italiana che quella croata ed anche più a sud del Mare Adriatico potranno diventare mercati interessanti, ma in questo studio al momento non sono presi in considerazione.

Di fatto l'adozione di nuovi mezzi navali fluvio-marittimi non solo aprirebbe un mercato eccezionalmente interessante per la cantieristica navale delle regioni interessate ma raddoppierebbe di fatto la distanza commerciale superando così i fatidici 300 km di convenienza che la letteratura economica-navale-trasportistica assegna al fluviale per essere considerata competitiva rispetto al modo stradale. Inoltre darebbe opportunità a vecchi e nuovi imprenditori del trasporto (anche in maniera associata e consortile) di abbordare ed innovare un settore estremamente innovativo nel nostro paese quale può essere considerato il fluvio-marittimo rispetto al "solo fluviale".

Il fluvio-marittimo può influenzare di conseguenza nel rinnovo della flotta di cabotaggio, l'aumento delle condizioni di sicurezza per il personale e delle merci trasportate nonché la certezza delle prese e delle consegne, il tipo di merce potenzialmente trasportabile oltre al costo concorrenziale con il modo stradale di trasporto che sono i veri driver e valori del trasporto merci.

Le imbarcazioni ai fini del presente studio prese in considerazioni sono rappresentate da due tipi di navi, entrambe innovative qui di seguito sinteticamente descritte.

La prima è una nave denominata Fluvio-Marittima Padana progettata dallo studio "Marine Consultant" dell'ing. Francesco Prinzivalli aventi le caratteristiche riportate nella tabella seguente.

Lunghezza Massima Fuori Tutto	**110 mt**
Larghezza Massima Fuori Ossatura	**12,10**
Altezza di Costruzione	**6,50**
Capacità di carico	**72 contenitori 20 x 8 x 8** **10 contenitori 10 x 8 x 8**
Dislocamento corrispondente all'immersione di 2,5 metri	**2800 Tonnellate**
Carico utile corrispondente all'immersione di 2,5 metri	**1500 Tonnellate**

Tabella 186 – Caratteristiche motonave Fluvio-marittima Padana

Tale nave fluvio-marittima è stata progettata tenendo conto dei risultati del gruppo di lavoro "WG 16 – Standardization of ships and waterways for coastal navigation". Le dimensioni della nave fluvio-marittima padana sono state progettate in funzione della lunghezza, profondità, larghezza e altezza libera dell'idrovia padana, sia attuale che futura e dalle limitazioni imposte dal Registro Navale Italiano in termini di rapporti dimensionali caratteristici per le navi marittime abilitate alla navigazione illimitata.

Per quanto attiene la tipologia di carico questa è riferita ad una nave porta container che rende comunque possibile il trasporto contemporaneo di carichi di tipologie differenti, mentre gli equipaggiamenti e standard di sicurezza sono analoghi a quelli richieste per le navi marittime.

Questa motonave è dotata di una elevata capacità di contenimento della zavorra e di ponti di comando e sovrastrutture sollevabili o adattabili che le consentono di poter variare nel corso della navigazione la propria immersione e l'altezza libera fuori d'acqua. In sintesi un mezzo adatto anche al carico e scarico delle merci anche su banchine non attrezzate. Ovviamente l'equipaggio dovrà essere addestrato sia per la navigazione marittima che per quella fluviale.

La seconda è frutto invece del Programma Straordinario di Ricerca e Sviluppo del Cabotaggio Marittimo e Fluviale, Area 4, Tema 4 Linea 2, di cui alla Legge 30 novembre 1998 n° 413 volto a mettere a punto tecniche di ottimizzazione per la definizione progettuale di mezzi fluvio-marittimi, che ha sviluppato CETENA S.p.A. del gruppo FINCANTIERI al fine di trovare una soluzione atta a ridurre il peso nave per non penalizzare la portata netta della nave pur garantendo un buon livello di qualità marine.

È stata pertanto definita una nave porta contenitori fluvio-marittima di V classe C.E.M.T. in grado di trasportare 200 TEU e avente una portata lorda di 2300 t.

La nave ha propulsione diesel elettrica ed è dotata di due propulsori POD della potenza di 1000 kW ciascuno in grado di consentire una velocità di esercizio a pieno carico di 13,5 kn. L'adozione di tale apparato propulsivo consente un notevole risparmio di peso grazie all'eliminazione della linea d'assi, dei motori di propulsione, del riduttore e dei timoni.

La nave proposta, grazie alle soluzioni adottate, avrebbe un dislocamento nella condizione scarica e asciutta inferiore di circa il 38% rispetto alla nave tradizionale di pari dimensioni. Questo porta ad un aumento della portata lorda di circa il 17% rispetto a navi convenzionali.

L'analisi statistica delle altezze significative di onda nelle zone interessate alla navigazione hanno dimostrato che nel Nord Adriatico per quasi il 99% dell'anno non si verificano onde con altezza significativa maggiore di 2,25 m. Questo dato ha permesso una riduzione del modulo di resistenza della sezione maestra limitando la navigazione della nave in queste acque e in presenza di condizioni meteo marine favorevoli.

La scelta di ridurre al massimo il peso della nave e di limitare l'immersione in mare ad un valore impiegabile anche durante la navigazione fluviale ha portato a definire le caratteristiche riportate nella tabella seguente.

Lunghezza fuori tutta	96.80 m
Lunghezza poppa/prua	92.15 m
Larghezza	11.40 m
Altezza	5.93 m
Tpc	3.50 m
CB	0.841
Dpc	3170 t
DWT	2300 t
TEU	in stiva 96 in coperta 104 totali 200

Tabella 187 – Caratteristiche motonave CETENA S.p.A

24.4 ALTRE CONSIDERAZIONI

Oltre alle ipotesi di mercato che il "deep sea" può rappresentare, a condizione di disporre di mezzi marittimi idonei al Po ed alla navigazione fluvio- marittima, altre condizioni devono però essere ricercate e perseguite nell'arco dei prossimi 10 anni, ovvero in tempo per l'operatività delle opere previste al fine di poter competere con il trasporto su gomma che sono:

la esenzione dal pagamento delle tasse portuali dei mezzi fluvio-marittimi alla pari dei mezzi stradali;

l'estensione al personale fluvio- marittimo delle stesse agevolazioni previdenziali del personale di mare;

la compatibilità dell'abilitazione alla guida del personale fluvio-marittimo sia nel fiume che entro le 6 miglia marittime;

un maggior controllo sui sovraccarichi stradali che ne limiti l'estensione e gli abusi

l'assegnazione di priorità per quanto attiene i trasporti pericolosi, al fiume, al ferro e solo per ultimo alla strada;

alle previsioni di ecobonus per il fluvio-marittimo al pari di quello previsto per le autostrade del mare;

alla previsione di una sola autorità portuale per l'Alto Adriatico al fine di permettere prima di tutto la programmazione degli investimenti e quindi la concentrazione del traffico deep sea container in un solo porto, ed alla cooperazione su altri tipi di trasporto tali da favorire un mercato sostenibile del fluvio-marittimo;

ad una più attenta pianificazione territoriale e spaziale dei collegamenti infrastrutturali stradali e ferroviari verso i punti di approdo del sistema fluvio-marittimo.

25 ANALISI MULTI-CRITERIA PER LA INDIVIDUAZIONE DI SOLUZIONI ALTERNATIVE ALLO STATO DI FATTO

Durante il periodo di studio e mano a mano che valori, parametri ed indicatori sempre più precisi circa l'analisi dello stato di fatto si rendevano disponibili al team di progetto si è deciso di utilizzare l'analisi Multicriteria al fine di corroborare le diverse alternative con criteri sociali, tecnici, ambientali economici e di natura trasportistica. Ciò al fine di meglio calibrare la progettazione delle diverse ipotesi di intervento. Attraverso questa tecnica i consulenti sono stati sollecitati sia come gruppo che singolarmente rispetto alle competenze, a condividere le conoscenze via via acquisite e quindi ad esprimere tutta una serie di valutazioni in grado di affinare le ipotesi di lavoro. Valutazioni e relativi giudizi volutamente non conclusivi, ancora di carattere aperto, da sottoporre poi al committente e ai decisori finali.

25.1 LA METODOLOGIA

E sempre utile ricordare che la MCA è in ogni caso una metodologia che pur con i suoi limiti cerca di dare coerenza ad un mix di Informazioni sia quantitative che qualitative che non sono sempre, anzi quasi mai omogenee sia in termini di consistenza che di dimensioni spaziali, dimensionali, valori economici, temporali etc.

Il risultato di ogni MCA sconta un certo grado di soggettività, che però hanno basi ed approcci razionali e logici e che sottendono ragionamenti complessi in grado di dimostrare, tracciare e dar conto anche di singoli aspetti più o meno importanti che altrimenti nel lungo percorso progettuale potrebbero andare smarriti. Aspetti, valutazioni e valori che possono anche mutare di segno quando incrociati ed interpretati con occhi diversi da quelli del consulente.

La lista base dei criteri e sub criteri che sono state prese in considerazione sono sostanzialmente quattro:

Criteri di conformità

- con le politiche comunitarie
- con le strategie nazionali
- con le strategie regionali e locali

Criteri socio-economici

- rapporti costi/efficacia trasportistica
- energia elettrica potenziale da fonte rinnovabile
- occupazione durante la fase di costruzione
- impatto sui sistemi di scolo di acque superficiali-bonifiche e drenaggio (sia in relazione al livello idrico del Po che al livello di falda)
- impatto sui sistemi di presa da acque superficiali e sotterranee (irrigazione, acquedotti e pozzi)

Criteri tecnici, di maturità tecnologica e di temporalità

- complessità tecnologica, amministrativa e approvativa
- flessibilità nella realizzazione degli interventi in relazione ai finanziamenti disponibili
- tempo stimato per lo sviluppo del progetto
- tempo stimato per la realizzazione dell'investimento (costruzione)

Criteri ambientali

- impatto s a di adattamento ai cambiamenti climatici

Ogni parametro è caratterizzato dalla ampiezza dei valori. Questi valori sono poi espressi in differenti

unità alcune delle quali possono anche essere semplicemente qualitative (come ad esempio la semplicità tecnologica o la conformità alle direttive comunitarie). Questa è la ragione per cui questi parametri sono rappresentati come "unità di valore" che sono dati da ciascuna unità all'interno di un campo di una ampiezza considerata (considerando il massimo ed il minimo per ogni valore). Conseguentemente ogni criterio/parametro i del criterio *k* può essere espresso per una data ipotesi progettuale p con una "utilità di valore" $U_{i,k,p}$ che convenzionalmente si colloca tra 0 e 1 :

$$0 \leq U_{i,k,p} \leq 1$$

Le "utilità di valore" sono calcolate semplicemente normalizzando i punteggi in una scala compresa tra 0 and 1, assegnando 1 al più favorevole dei punteggi e 0 a quello meno favorevole.

La multicriteria assegna differenti pesi ai principali criteri considerati nelle diverse ipotesi progettuali. I pesi dovrebbero rappresentare l'importanza per i differenti stakeholders (che riflettono quindi gli interessi rappresentati da AIPO e da altri punti di vista rispetto ad uno specifico indicatore) e sono espressi dal "peso" A_k che rappresenta il livello di importanza che il decisore finale assegna al criterio scelto in relazione a tutti gli altri criteri.

Il singolo punteggio è il risultato del prodotto tra I valori ed I pesi attribuiti dall'indicatore e dal totale dei punteggi che rappresentano quindi il giudizio finale per ogni alternativa.

Ogni progetto *p* è caratterizzato dai punteggi parziali per ogni criterio k (conformità, criteri socio economici, ambientali, tecnici) definiti da un numero *n* di parametri i ottenuti dalla somma:

$$U_{k,p} = \sum_{i=1}^{n} U_{i,k,p}$$

Alla fine il valore dell'utilità funzionale U_p potrà essere associata ad ogni alternativa progettuale p, essendo:

$$U_p = \sum_{k=1}^{m} A_k U_{k,p}$$

Il valore U_p sarà poi utilizzato al fine di adottare una scala, una graduatoria di preferenza rispetto alle alternative progettuali.

In questa fase di progetto i consulenti hanno preferito assegnare lo stesso peso ad ogni criterio base, lasciando così al decisore finale la valutazione della scelta definitiva dei singoli parametri sui quali poi costruire una lista scalare di opzioni.

25.2 PESI ED OUTPUTS

In effetti cosi come indicato nella tabella successiva, i pesi utilizzati per ognuno dei quattro criteri base utilizzati sono stati al momento definiti pari al 25% per ognuno. Successivamente ed in accordo con il cliente questi potranno essere modificati rispetto alla volontà ed opportunità del decisore finale di assegnare differenti ordini di importanza rispetto a valutazioni di competenza squisitamente di carattere politico/istituzionale.

I consulenti in definitiva nell'accogliere appieno le indicazioni della summenzionata (vedi nota 672) "*Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects - Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020*" ed in particolare "dell'Annesso IX" hanno comunque poi proceduto alla Analisi Costi/Benefici di cui ai capitoli successivi.

Selezione degli indicatori

La selezione degli indicatori è stata effettuata tenendo in considerazione un set di necessari indicatori in grado di essere compresi, trasparenti, facili da misurare e giudicare, applicabili, tracciabili, coerenti con una accettabile pratica internazionale.

Si sono prese in considerazione le informazioni disponibili sino al momento stesso di redazione di questo rapporto ai fini della valutazione delle alternative.

La struttura dell'analisi multi criteria, implementata tramite un foglio Excel facilmente accessibile, è presentata nelle tabelle seguenti.

Parametri					->	Valori di input per ciascuna alternativa...		
Criteri	**Parametri**	**Indicatori**	**Unità**	**Valori di calcolo**		**Soluzione con conche**	**Soluzione mista**	**Soluzione con pennelli**
						Alt1	Alt2	Alt3
Criteri di conformità	**Conformità con le politiche comunitarie**	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= basso, 2 = medio, 3 = alto*		*3*	*3*	*3*
	Conformità con le strategie nazionali	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= basso, 2 = medio, 3 = alto*		*3*	*3*	*3*
	Conformità con le strategie regionali e locali	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= basso, 2 = medio, 3 = alto*		*2*	*2*	*2*
Impatto socio-economico	**Rapporto costi/efficacia trasportistica**	**rapporto costo di investimento / numeri di gg. navigabili**	*M€ / giorni*	*valore*		*6,85*	*4,41*	*1,81*
	Energia elettrica da fonte rinnovabile	**potenza elettrica**	*MWh/anno*	*valore*		*636.000*	*280.000*	*0*
	Occupazione in fase di costruzione	**numero addetti x anno**	*addetti x anno*	*valore*		*1.500*	*1.000*	*250*
	Impatto sui sistemi di scolo di acque superficiali - bonifiche e drenaggio (sia in relazione al livello idrico del Po che al livello della falda)	**costo realizzazione nuove opere e gestione opere esistenti**	*M€*	*valore*		*50*	*20*	*0*
	Impatto sui sistemi di presa da acque superficiali e sotterranee (irrigazione, acquedotti, pozzi)	**costo realizzazione nuove opere e gestione opere esistenti**	*M€*	*valore*		*5*	*15*	*30*
Indicatori di maturità	**Complessità tecnologica, amministrativa e approvativa**	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= basso, 2 = medio, 3 = alto*		*3*	*2*	*1*
	Flessibilità nella realizzazione degli interventi in relazione ai finanziamenti disponibili	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= basso, 2 = medio, 3 = alto*		*1*	*2*	*3*
	Tempo stimato per lo sviluppo del progetto	**tempo**	*mesi*	*valore*		*36*	*32*	*24*
	Tempo stimato per la realizzazione dell'investimento (costruzione)	**tempo**	*mesi*	*valore*		*84*	*48*	*36*
Impatto ambientale	**Impatto sui livelli della falda**	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= favorevole, 2 = nullo, 3 = sfavorevole*		*1*	*1*	*2*
	Impatto sulla qualità delle acque	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= favorevole, 2 = nullo, 3 = sfavorevole*		*2*	*2*	*2*
	Impatto sul paesaggio e luoghi di valore storico, architettonico e turistico dovuto alla presenza delle opere strutturali	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= favorevole, 2 = nullo, 3 = sfavorevole*		*3*	*3*	*2*
	Impatto sul paesaggio e luoghi di valore storico, architettonico e turistico dovuto al livello idrico	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= favorevole, 2 = nullo, 3 = sfavorevole*		*1*	*1*	*2*
	Impatto sulla funzionalità idraulico - morfologica	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= favorevole, 2 = nullo, 3 = sfavorevole*		*1*	*2*	*3*
	Impatto su flora e fauna	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= favorevole, 2 = nullo, 3 = sfavorevole*		*2*	*2*	*2*
	Flessibilità e resilienza di adattamento ai cambiamenti climatici	**qualitativi**	**qualitativi**	*1= basso, 2 = medio, 3 = alto*		*3*	*2*	*1*

Tabella 187 – Tabella di input per l'analisi multi-criteria (i valori presentati sono solo grandezze di test e non hanno nessun valore di merito)

Calcolo dei punteggi (valori fra 0 e 100)					->	Calcolo sulla base dei pesi predeterminati		
calcolo dei punteggi					Peso			
		Alt1	Alt2	Alt3		Alt1	Alt2	Alt3
Criteri di conformità		50	50	50				
		50	50	50				
		50	50	50				
TOTALE:		150	150	150				
TOTALE %		✓ 100	✓ 100	✓ 100	10%	10,0	10,0	10,0
Impatto socio-economico		0	48	100				
		100	44	0				
		100	60	0				
		0	60	100				
		100	60	0				
TOTALE:		300	272	200				
TOTALE %		✓ 100	✓ 91	✗ 67	40%	40,0	36,3	26,7
Indicatori di maturità		0	50	100				
		0	50	100				
		0	33	100				
		0	75	100				
TOTALE:		0	208	400				
TOTALE %		✗ 0	! 52	✓ 100	10%	0,0	5,2	10,0
Impatto ambientale		100	100	0				
		50	50	50				
		0	0	100				
		100	100	0				
		100	50	0				
		50	50	50				
		100	50	0				
TOTALE:		500	400	200				
TOTALE %		✓ 100	! 80	✗ 40	40%	40,0	32,0	16,0
					100%			

26 IL QUADRO GENERALE DEGLI INVESTIMENTI E LE COMBINAZIONI CON GLI SCENARI DI DOMANDA

Il quadro generale degli investimenti ipotizzati prevedono alternativamente le seguenti ipotesi di intervento:

1. Regimazione Totale con opere di sistemazione a corrente libera a valle del 5° sbarramento e sistemazione curve in erosione tra il 4° e 5° sbarramento oltre barriera antisale per un valore di

€ 2.808.580.000;

2. Regimazione a 3 conche e con opere di sistemazione a corrente libera sull'intero tratto tra foce Adda e Po di Goro oltre barriera antisale per un valore di € 2.179.730.000;
3. Regimazione a 2 conche e con opere di sistemazione a corrente libera sull'intero tratto tra foce Adda e Po di Goro oltre a barriera antisale per un valore di € 1.654.530.000;
4. Sistemazione a corrente libera lungo l'intero tratto tra foce Adda e Po di Goro oltre a barriera antisale per un valore di € 680.840.000.

Per le ipotesi con regimazione, si sono ipotizzate delle varianti che tengano in conto la possibilità di produzione di energia idroelettrica, con le seguenti variazioni di costo:

5. Regimazione Totale come punto sotto, con produzione di energia idroelettrica, per un valore di € 3.515.493.000;
6. Regimazione a 3 conche come punto 2 sotto, con produzione di energia idroelettrica, per un valore € 2.601.872.000;
7. Regimazione a 2 conche come punto 3 sotto, con produzione di energia idroelettrica, per un valore di € 1.936.439.000;

Come esposto nel paragrafo 24.2 (Analisi della domanda di traffico, pag. 97 e seguenti), sono state fatte due ipotesi di crescita di traffico, una conservativa e una con incremento dei trend di crescita e delle distanze percorse (si faccia riferimento rispettivamente alla Tabella 183 di pagina 97 e alla Tabella 185 di pagina 98). L'ipotesi conservativa è stata applicata a tutti gli scenari infrastrutturali, mentre l'ipotesi con incremento di domanda è stata applicata solo agli scenari infrastrutturali corrispondenti ai punti 1, 2 e 3. La seguente tabella dà un quadro complessivo delle combinazioni tra scenari infrastrutturali e gli scenari di domanda che sono state considerate dall'analisi benefici/costi.

Scenario di traffico	Regimazione completa	Regimazione a 3 conche	Regimazione a 2 conche	Corrente libera	Regimazione completa	Regimazione a 3 conche	Regimazione a 2 conche
	senza produzione di energia elettrica				*con produzione di energia elettrica*		
Traffico base	si	si	si	si	si	si	si
Traffico incrementato	si	si	si	no	no	no	no

Tabella 189 – Combinazioni tra scenari infrastrutturali e scenari di domanda di traffico considerati nell'analisi benefici/costi

Qui di seguito sono descritti i principali elementi di valutazione e metodologia presi in considerazione.

27 APPROCCIO METODOLOGICO

L'obiettivo dell'analisi finanziaria e economica è quella di descrivere e dimostrare la fattibilità economica di un investimento, sia in termini strettamente finanziari che in termini sociali. La metodologia adottata in questo studio riflette gli standard communente accettati per investimenti di qualunque dimensione e campo di applicazione.

Gli obiettivi, come già detto, sono due:

- primo, valutare la fattibilità finanziaria dell'investimenti in termini di puro cash flow e dal punto di visto del "proprietario" e gestore dell'infrastruttura, che in questo caso è di difficile definizione (trattandosi di un fiume, ovvero di un bene comune di origine naturale che ricade sotto la responsabilità di diversi soggetti), ma che è stato identificato nel nostro caso con AIPO, in quanto ente di gestione del reticolo idrografico afferente al fiume Po, e quindi responsabile di sicurezza idraulica, di demanio idrico e soprattutto di navigazione fluviale
- secondo, valutare la fattibilità economica del progetto in termini di costi e benefici da un punto di vista generale (il cosiddetto punto di vista "sociale")

Come qualunque altra analisi b/c, anche questa è costituita dal confronto tra diversi scenari:

- una serie di scenari "con progetto", corrispondenti alle diverse soluzioni fin qui studiate (corrente libera, soluzione intermedia con 2 traverse, soluzione intermedia con 3 traverse, regimazione completa – con e senza produzione di energia elettrica)
- uno scenario di base "senza progetto", che ipotizza il mantenimento delle condizioni esistenti

Le analisi b/c di ciascuna soluzione sono sempre rappresentate da un confronto tra lo scenario "senza progetto" e, di volta in volta, una delle quattro soluzioni studiate.

Esiste una vastissima letteratura sulle analisi b/c, alla quale si rimanda per approfondimenti metodologici. Anche se non è questa la sede per una discussione dettagliata sull'approccio adottato, si ritiene comunque importante sottolineare alcuni aspetti importanti per qualunque analisi b/c:

- una delle caratteristiche principali di qualunque analisi b/c è l'applicazione del tasso di sconto. Questo è un aspetto dovuto al fatto che benefici e costi non si registrano temporalmente nello stesso periodo, per cui il principio generale è che un determinato valore monetario al presente non corrisponde allo stesso valore monetario proiettato al futuro: non è la stessa cosa ipotizzare di spendere una cifra di (per esempio) 100 € oggi o di spenderla tra un determinato numero di anni, perché nel frattempo la stessa cifra può essere impiegata per altri investimenti e generare una rendita;
- i tassi di sconto adottati in questa analisi b/c sono, rispettivamente, 3% e 4% per le analisi economica e finanziaria, così come suggerito dalla "Guida".

I risultati di questa analisi b/c sono espressi per mezzo di una serie di indicatori standard, che sono usati per qualunque analisi b/c. Si tratta di (sia per l'analisi finanziaria che economica):

- il Valore Attuale Netto (VAN), ovvero la differenza tra la somma dei benefici e la somma dei costi, entrambi con l'applicazione del fattore di sconto anno dopo anno. Il VAN riflette, come gli altri indicatori, la profittabilità dell'investimento in termini finanziari o economici. Se il VAN è negativo allora i costi prevalgono sui benefici e l'investimento non è fattibile
- il Tasso di Rendimento Interno (TRI) è il tasso per mezzo del quale i costi scontati pareggiano i benefici, anche questi scontati. Qualora si applicasse un tasso di sconto pari al TRI il VAN si azzererebbe. Il TRI può quindi essere paragonato con un tasso di riferimento (lo stesso tasso di sconto, per esempio), e quanto più il TRI è più alto del tasso di riferimento tanto più l'investimento

diventa favorevole

- il rapporto benefici/costi (b/c) è in un certo senso simile al VAN: laddove quest'ultimo è la differenza tra tutti i benefici e i costi scontati, il b/c è il rapporto tra questi due. In questo caso un investimento diventa favorevole quando questo rapporto è maggiore di 1.

Le ipotesi specifiche e i risultati ottenuti sono descritti passo dopo passo nei paragrafi successivi e nel capitolo 28 (da pagina 115 in avanti).

27.1 ANALISI B/C FINANZIARIA: DATI DI INPUT

L'analisi finanziaria è stata sviluppata tenendo conto del punto di vista del "proprietario e gestore" dell'infrastrutture che in questo caso, come già accennato, è stato identificato in AIPO.

I costi di costruzione, gestione (operativi) e manutenzione ed il valore residuo sono da considerarsi un output dell'intero progetto. Le analisi del costo di costruzione hanno consentito di valutare i costi di investimento, mentre i costi di gestione e manutenzione (stimati dal Cliente) sull'intera durata di vita del progetto sono stati effettuati sulla tipologia e caratteristiche sia delle nuove che delle infrastrutture esistenti.

La "*Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects - Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020*" (già più volte citata) del dicembre 2014 è stata utilizzata anche al fine di identificare/ stabilire ulteriori parametri di base (come il tasso di sconto) e criteri generali largamente utilizzati per progetti infrastrutturali in ambito europeo. Ciononostante va anticipato che questo progetto, tenuto conto del tipo di gestore e del fatto che non siano previste entrate di natura finanziaria di nessun tipo abbia necessariamente risultati finanziari negativi, il che determina un disavanzo finanziario tale da richiedere un intervento nazionale e/o comunitario in grado contribuire alla sostenibilità del progetto.

Non sono previste entrate derivanti da diritti di transito sul fiume e dall'uso delle conche.

Le entrate derivanti dalla produzione e vendita di energia elettrica per gli scenari che prevedono questa opzione, così come le spese addizionali per la costruzione e la manutenzione degli impianti idroelettrici sono stati pure attribuiti ad AIPO, come già spiegato nel paragrafo 24.1 a pagina 97. Si ribadisce che questa scelta è stata fatta nella piena consapevolezza del fatto che AIPO, allo stato attuale, non può porsi come soggetto produttore di energia elettrica, neanche in termini di concessionario. L'ipotesi è stata fatta solo per valutare la fattibilità complessiva della possibile produzione di energia, e quindi come semplice esercizio di calcolo. Questo, ovviamente non implica nessuna volontà da parte di AIPO di operare o meno in tal senso.

Tali entrate sono state stimate senza tener conto di nessuna agevolazione, sulla base di un prezzo di vendita di mercato di 34,48 EUR/MWh[5], che porta ai seguenti introiti annui:

Introiti da produzione di energia (246,2 GWh/anno)

- per l'ipotesi mista (2 traverse): 8,49 EUR x 10^6 / anno
- Introiti da produzione di energia (359,6 GWh/anno)
- per l'ipotesi mista (3 traverse): 12,40 EUR x 10^6 / anno
- Introiti da produzione di energia (555,1 GWh/anno)
- per l'ipotesi regimazione: 19,14 EUR x 10^6 / anno

[4] Prezzo stimato da http://www.mercatoelettrico.org/It/WebServerDataStore/MGP_ReportGiornaliero/20160303MGPReportGiornaliero.pdf, valore medio per il Nord Italia

I principali punti di rifermento nella analisi b/c finanziaria sono quindi i seguenti:

- Il tasso di sconto
- la durata del periodo di analisi
- il valore iniziale dell'investimento: progettazione, costruzione e costi accessori
- i costi di manutenzione
- il valore residuo dell'investimento

Il tasso di sconto è stato assunto pari al 4%, sulla base delle indicazioni della "Guida"

La durata del periodo di analisi è stata stabilita come segue:

- anno di inizio dell'analisi: 2016
- durata della fase progettuale: 3 anni, dal 2016 a 2018 inclusi
- durata della fase amministrativa precedente all'inizio della fase di costruzione: 1 anno (2019)
- durata della fase di costruzione: 5 anni, dal 2020 al 2024 inclusi
- inizio della fase di esercizio: 2025
- durata del periodo di analisi del cash flow operativo: 20 anni, dal 2025 al 2044
- vita utile (tecnica) dell'investimento: 50 anni

La tempistica indicata è puramente teorica, e corrisponde ai tempi tecnici minimi di implementazione, ben sapendo che i reali tempi di sviluppo di un investimento simile in Italia sono molto più lunghi. Ma l'obiettivo al momento è quello di verificare la fattibilità "in sé" dell'infrastruttura, e soprattutto quello di fare un confronto tra le diverse soluzioni. Per questo motivo si è adottato un approccio tecnicistico, senza introdurre considerazioni ulteriori.

Per quanto riguarda il valore iniziale dell'investimento (valori già riassunti e anticipati nel capitolo 26, da pagina 103 in poi), si può fare riferimento alle tabelle seguenti (da Tabella 190 a Tabella 196), che rappresentano i valori assunti per ciascuno dei quattro scenari. I prezzi presentati nelle tabelle successive includono l'IVA, che non può essere detratta da AIPO, che è un soggetto pubblico che non opera in regime d'impresa (in realtà l'IVA non è un costo ammissibile al cofinanziamento europeo, ma l'analisi finanziaria deve comunque rispecchiare il flusso di cassa dell'ente promotore).

		Tratto foce Adda - foce Mincio	Tratto foce Mincio - incile Po di Goro	Barriera antisale	Totali
		EUR x 10^6	EUR x 10^6	EUR x 10^6	
1	**Lavori di sistemazione a corrente libera**	100	340	49	489
2	**Totale opere**	100	340	49	489
3	**Imprevisti (5% di 2)**	5	17		22
4	**Totale opere + imprevisti**	105	357	49	511
5	**Totale opere + imprevisti + IVA 22%**	128	436	60	624
6	**Costi addizionali**				
6.1	Espropri, indennizzi (3% di 2)	3	10		13
6.2	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 2)	10	34		44
	Costo totale (5+6+barriera antisale)	**141**	**480**		**681**

Tabella 190 – Costi di investimento per l'ipotesi corrente libera

		Sbarramento n.1		Sbarramento n.2		Sbarramento n.3		Sbarramento n.4		Sbarramento n.5		Costi aggiuntivi	Barriera antisale	Regimaz. corrente libera	Totali
		Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali				
		EUR x 10^6													
1	**Cantiere**		95						111						**206**
1.1	Cantiere traversa	80						96							176
1.2	Cantiere conca	15						15							30
2	**Traversa**		82						92						**174**
2.1	Opere civili	49						56							105
2.2	Opere elettromeccaniche	18						21							39
2.3	Diaframmi	15						15							30
3	**Conca navigazione e scala pesci**		58						58						**116**
3.1	Opere civili	17						17							34
3.2	Opere elettromeccaniche	6						6							12
3.3	Mandracchi	34						34							68
3.4	Scala risalita pesci	1						1							2
4	**Viadotto**		**30**						**5**						**35**
5	***Totale opere***		***265***		**-**		**-**		***265***		**-**	***109***		***440***	***1.079***
6	***Imprevisti***		***13***		**-**		**-**		***13***		**-**	***5***			***32***
7	***Totale opere + imprevisti***		***278***		**-**		**-**		***278***		**-**	***115***		***440***	***1.111***
8	***Totale opere + imprevisti + IVA 22%***		***339***		**-**		**-**		***340***		**-**	***140***	***60***	***537***	***1.416***
9	**Costi addizionali**		**40**		**-**		**-**		**40**		**-**	**80**		**79**	**239**
9.1	Espropri, indennizzi (5% di 5)	13		-		-		13		-		27		26	80
9.2	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 5)	27		-		-		27		-		53		53	159
	Costo totale (8+9)		**379**		**-**		**-**		**379**		**-**	**220**	**60**	**616**	**1.655**

Tabella 191 - Costi di investimento per l'ipotesi mista (2 traverse), senza produzione di energia elettrica

		Sbarramento n.1		Sbarramento n.2		Sbarramento n.3		Sbarramento n.4		Sbarramento n.5		Costi aggiuntivi	Barriera antisale	Regimaz. corrente libera	Totali
		Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali				
		EUR x 10^6													
1	**Cantiere**		**112**						**129**						**241**
1.1	Cantiere traversa	80						96							176
1.2	Cantiere conca	15						15							30
1,3	Cantiere centrale	17						18							35
2	**Traversa**		**82**						**92**						**174**
2.1	Opere civili	49						56							105
2.2	Opere elettromeccaniche	18						21							39
2.3	Diaframmi	15						15							30
3	**Conca navigazione e scala pesci**		**58**						**58**						**116**
3.1	Opere civili	17						17							34
3.2	Opere elettromeccaniche	6						6							12
3.3	Mandracchi	34						34							68
3.4	Scala risalita pesci	1						1							2
4	**Viadotto**		**30**						**5**						**35**
5	**Centrale**		**81**						**81**						**162**
5,1	***Opere civili***	11						11							22
5,2	Opere elettromeccaniche	70						70							140
5	***Totale opere***		***265***		**-**		**-**		***265***		**-**	***109***		***440***	***1.079***
6	***Totale opere***		***363***		**-**		**-**		***364***		**-**	***109***		***440***	***1.276***
7	***Imprevisti***		***18***		**-**		**-**		***18***		**-**	***5***			***42***
8	***Totale opere + imprevisti***		***381***		**-**		**-**		***382***		**-**	***115***		***440***	***1.318***
10	**Costi addizionali**		**54**		**-**		**-**		**55**		**-**	**80**		**79**	**268**
10.1	Espropri, indennizzi (5% di 6)	18		-		-		18		-		27		26	89
10.2	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 6)	36		-		-		36		-		53		53	179
	Costo totale (9 + 10)		**519**		**-**		**-**		**521**		**-**	**220**	**60**	**616**	**1.936**

Tabella 192 - Costi di investimento per l'ipotesi mista (2 traverse), con produzione di energia elettrica

		Sbarramento n.1		Sbarramento n.2		Sbarramento n.3		Sbarramento n.4		Sbarramento n.5		Costi aggiuntivi	Barriera antisale	Regimaz. corrente libera	Totali
		Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali				
		EUR x 10^6													
1	**Cantiere**		95		119				111						**325**
1.1	Cantiere traversa	80		104				96							280
1.2	Cantiere conca	15		15				15							45
2	**Traversa**		82		101				92						**275**
2.1	Opere civili	49		63				56							168
2.2	Opere elettromeccaniche	18		23				21							62
2.3	Diaframmi	15		15				15							45
3	**Conca navigazione e scala pesci**		58		58				58						**174**
3.1	Opere civili	17		17				17							51
3.2	Opere elettromeccaniche	6		6				6							18
3.3	Mandracchi	34		34				34							102
3.4	Scala risalita pesci	1		1				1							3
4	**Viadotto**		**30**		**12**				**5**						**47**
5	***Totale opere***		***265***		***290***		**-**		***265***		**-**	***164***		***440***	***1.424***
6	***Imprevisti***		***13***		***15***		**-**		***13***		**-**	***8***			***49***
7	***Totale opere + imprevisti***		***278***		***305***		**-**		***278***		**-**	***172***		***440***	***1.473***
8	***Totale opere + imprevisti + IVA 22%***		***339***		***372***		**-**		***340***		**-**	***210***	***60***	***537***	***1.857***
9	**Costi addizionali**		**40**		**44**		**-**		**40**		**-**	**120**		**79**	**322**
9.2	Espropri, indennizzi (5% di 5)	13		15		-		13		-		40		26	107
9.3	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 5)	27		29		-		27		-		80		53	215
	Costo totale (8+9)		**379**		**415**		**-**		**379**		**-**	**330**	**60**	**616**	**2.180**

Tabella 193 - Costi di investimento per l'ipotesi mista (3 traverse), senza produzione di energia elettrica

		Sbarramento n.1		Sbarramento n.2		Sbarramento n.3		Sbarramento n.4		Sbarramento n.5		Costi aggiuntivi	Barriera antisale	Regimaz. corrente libera	Totali
		Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali				
		EUR x 10^6													
1	**Cantiere**		**112**		136				**129**						**377**
1.1	Cantiere traversa	80		104				96							280
1.2	Cantiere conca	15		15				15							45
1.3	Cantiere centrale	17		17				18							52
2	**Traversa**		**82**		101				**92**						**275**
2.1	Opere civili	49		63				56							168
2.2	Opere elettromeccaniche	18		23				21							62
2.3	Diaframmi	15		15				15							45
3	**Conca navigazione e scala pesci**		**58**		58				**58**						**174**
3.1	Opere civili	17		17				17							51
3.2	Opere elettromeccaniche	6		6				6							18
3.3	Mandracchi	34		34				34							102
3.4	Scala risalita pesci	1		1				1							3
4	**Viadotto**		**30**		**12**				**5**						**47**
5	**Centrale**		**81**		**81**				**81**						**243**
5,1	Opere civili	11		11				11							33
5,2	Opere elettromeccaniche	70		70				70							210
6	***Totale opere***		***363***		***388***		**-**		***364***		**-**	***164***		***440***	***1.719***
7	***Imprevisti***		***18***		***19***		**-**		***18***		**-**	***8***			***64***
8	***Totale opere + imprevisti***		***381***		***408***		**-**		***382***		**-**	***172***		***440***	***1.783***
9	***Totale opere + imprevisti + IVA 22%***		***465***		***497***				***466***			***210***	***60***	***537***	***2.235***
10	**Costi addizionali**		**54**		**58**		**-**		**55**		**-**	**80**		**79**	**366**
10.1	Espropri, indennizzi (5% di 6)	18		19		-		18		-		27		26	122
10.2	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 6)	36		39		-		36		-		53		53	244
	Costo totale (9 + 10)		**519**		**555**		**-**		**521**		**-**	**330**	**60**	**616**	**2.602**

Tabella 194 - Costi di investimento per l'ipotesi mista (3 traverse), con produzione di energia elettrica

		Sbarramento n.1		Sbarramento n.2		Sbarramento n.3		Sbarramento n.4		Sbarramento n.5		Costi aggiuntivi	Barriera antisale	Totali
		Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali			
		EUR x 10^6												
1	**Cantiere**		95		119		103		111		159			**587**
1.1	Cantiere traversa	80		104		88		96		144				512
1.2	Cantiere conca	15		15		15		15		15				75
2	**Traversa**		82		101		82		92		117			**474**
2.1	Opere civili	49		63		49		56		84				301
2.2	Opere elettromeccaniche	18		23		18		21		31				111
2.3	Diaframmi	15		15		15		15		2				62
3	**Conca navigazione e scala pesci**		58		58		58		58		58			**290**
3.1	Opere civili	17		17		17		17		17				85
3.2	Opere elettromeccaniche	6		6		6		6		6				30
3.3	Mandracchi	34		34		34		34		34				170
3.4	Scala risalita pesci	1		1		1		1		1				5
4	**Viadotto**		30		12		30		5		5			**81**
5	***Totale opere***		***265***		***290***		***273***		***265***		***338***	***273***	***172***	***1.877***
6	***Imprevisti***		***13***		***15***		***14***		***13***		***17***	***14***		***85***
7	***Totale opere + imprevisti***		***278***		***305***		***287***		***278***		***355***	***287***	***172***	***1.962***
8	***Totale opere + imprevisti + IVA 22%***		***339***		***372***		***350***		***340***		***433***	***350***	***210***	***2.394***
9	**Costi addizionali**		**40**		**44**		**41**		**40**		**51**	**200**		**415**
9.2	Espropri, indennizzi (5% di 5)	13		15		14		13		17		67		138
9.3	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 5)	27		29		27		27		34		133		276
	Costo totale (8+9)		**379**		**415**		**391**		**379**		**484**	**550**	**210**	**2.809**

Tabella 195 - Costi di investimento per l'ipotesi regimazione, senza produzione di energia elettrica

		Sbarramento n.1		Sbarramento n.2		Sbarramento n.3		Sbarramento n.4		Sbarramento n.5		Costi aggiuntivi	Barriera antisale	Totali
		Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali	Parziali	Totali			
		EUR x 10^6												
1	**Cantiere**		**112**		136		122		**129**		177			**676**
1.1	Cantiere traversa	80		104		88		96		144				512
1.2	Cantiere conca	15		15		15		15		15				75
1.3	Cantiere centrale	17		17		19		18		18				89
2	**Traversa**		**82**		101		82		**92**		117			**474**
2.1	Opere civili	49		63		49		56		84				301
2.2	Opere elettromeccaniche	18		23		18		21		31				111
2.3	Diaframmi	15		15		15		15		2				62
3	**Conca navigazione e scala pesci**		**58**		58		58		**58**		58			**290**
3.1	Opere civili	17		17		17		17		17				85
3.2	Opere elettromeccaniche	6		6		6		6		6				30
3.3	Mandracchi	34		34		34		34		34				170
3.4	Scala risalita pesci	1		1		1		1		1				5
4	**Viadotto**		**30**		**12**		**30**		**5**		**5**			**81**
5	**Centrale**		**81**		**81**		**81**		**81**		**81**			**405**
5,1	Opere civili	11		11		11		11		11				55
5,2	Opere elettromeccaniche	70		70		70		70		70				350
6	***Totale opere***		***363***		***388***		***373***		***364***		***437***	***273***	***172***	***2.371***
7	***Imprevisti***		***18***		***19***		***19***		***18***		***22***	***14***		***110***
8	***Totale opere + imprevisti***		***381***		***408***		***392***		***382***		***459***	***287***	***172***	***2.481***
9	***Totale opere + imprevisti + IVA 22%***		***465***		***497***		***478***		***466***		***560***	***350***	***210***	***3.027***
10	**Costi addizionali**		**54**		**58**		**56**		**55**		**66**	**200**		**489**
10.1	Espropri, indennizzi (5% di 6)	18		19		19		18		22		67		163
10.2	Spese indagini (sondaggi, rilievi, modelli fisici, caratterizzazione suoli, ecc.) ed ingegneria (progetti, DL, collaudi, ecc.) (10% di 6)	36		39		37		36		44		133		326
	Costo totale (9 + 10)		**519**		**555**		**534**		**521**		**626**	**550**	**210**	**3.515**

Tabella 196 - Costi di investimento per l'ipotesi regimazione, con produzione di energia elettrica

Per quanto riguarda i costi di manutenzione, sono stati considerati i seguenti valori, da indicazioni AIPO e dei progettisti:

- Costi di manutenzione ordinaria, senza progetto: 1,21 EUR x 10^6 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi corrente libera: 5,46 EUR x 10^6 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi mista (2 traverse) senza produzione di energia: 7,85 EUR x 10^6 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi mista (3 traverse) senza produzione di energia 10,79 EUR x 10^6 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi regimazione senza produzione di energia: 16,93 EUR x 10^6 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi mista (2 traverse) con produzione di energia: 9,98 EUR x 10^6 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi mista (3 traverse) con produzione di energia: 13,98 EUR x 10^6 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi regimazione con produzione di energia: 22,26 EUR x 10^6 / anno

Infine, il valore residuo dell'investimento è stato stabilito pari a 3/5 del valore iniziale dell'investimento, in base all'ipotesi che se la vita tecnica si estende fino a 50 anni, dopo 20 anni di cash flow operativo l'investimento potrà avere una vita pienamente produttiva per almeno altri 30 anni.

27.2 ANALISI B/C ECONOMICA: DATI DI INPUT

L'analisi b/c economica segue lo stesso approccio analitico dell'analisi finanziaria, ma, poiché il punto di vista è quello non più del "proprietario" o gestore che sia dell'infrastruttura ma quello dell'intera società, si ha un cash-flow strutturato su costi e benefici di natura diversa.

In particolare, si deve tenere conto dei seguenti aspetti:

- nell'analisi economica entrano in gioco i cosiddetti "prezzi ombra": il valore di un investimento deve essere considerato al netto dei trasferimenti (IVA, altre tasse, ecc…) e dei benefici indiretti che si ottengono tramite la creazione di posti di lavoro
- dal punto di vista sociale si possono avere costi e benefici dovuti ad esternalità che non sono considerate dal punto di vista finanziario

Nel nostro caso, per quanto riguarda l'IVA si è naturalmente adottato il valore del 22% vigente al momento in Italia. I benefici indiretti dovuti alla creazione di posti di lavoro sono stati considerati nel seguente modo:

- per la parte di progettazione, si è adottato un fattore di conversione unitario, ovvero, fatto salvo il valore dell'IVA (applicato come fattore riduttivo), si è ipotizzato che avendo a che fare con manodopera di tipo specialistico non si abbia una creazione effettiva di ulteriori posti di lavoro
- per la parte amministrativa, si è proceduto alla depurazione di questi dal valore degli espropri, che rappresentano comunque in trasferimento di capitale
- per la parte relativa alla costruzione, si è adottato un fattore di conversione pari a 0,7, similmente a quanto proposto nella precedente edizione della "*Guida*"[6], e si è poi proceduto all'eliminazione dell'IVA

[6] Si fa riferimento in questo caso alla precedente edizione della "Guida", disponibile on-line al seguente indirizzo: http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/guides/cost/guide2008_en.pdf, e in particolare alla tabella 4.28 di pag. 159, voce "Building erection (constructions)"

In questa maniera i valori di investimento diventano quelli presentati nella colonna di destra della successiva Tabella 197, dove a titolo di confronto sono presentati in forma riassuntiva anche i valori finanziari già esposti nel paragrafo precedente.

Scenario di investimento	Valore finanziario	Valore economico
	(EUR x 10^6)	
Ipotesi corrente libera	680,84	394,55
Ipotesi intermedia (2 traverse), senza produzione di energia	1.654,53	946,78
Ipotesi intermedia (3 traverse), senza produzione di energia	2.179,73	1.247,23
Ipotesi regimazione completa (5 traverse), senza produzione di energia	2.808,58	1.607,06
Ipotesi intermedia (2 traverse), con produzione di energia	1.936,44	1.108,21
Ipotesi intermedia (3 traverse), con produzione di energia	2.601,87	1.488,97
Ipotesi regimazione completa (5 traverse), con produzione di energia	3.515,49	2.011,88

Tabella 197 – Valori di investimento finanziari ed economici per tutte le ipotesi considerate

Per quanto riguarda i costi di manutenzione, sono stati applicati ai costi già indicati nel precedente paragrafo gli stessi criteri applicati per i costi di costruzione, ottenendo:

- Costi di manutenzione ordinaria, senza progetto: 0,69 EUR x 106 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi corrente libera: 3,13 EUR x 106 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi mista (2 traverse) senza produzione di energia: 4,51 EUR x 106 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi mista (3 traverse) senza produzione di energia: 6,19 EUR x 106 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi regimazione senza produzione di energia: 9,71 EUR x 106 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi mista (2 traverse) con produzione di energia: 5,73 EUR x 106 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi mista (3 traverse) con produzione di energia: 8,02 EUR x 106 / anno
- Costi di manutenzione per l'ipotesi regimazione con produzione di energia: 12,77 EUR x 106 / anno

Il tasso di sconto economico è stato assunto pari al 3%, sulla base delle indicazioni della "Guida".

Tra i dati di input devono essere considerati i benefici dovuti alla diversione da altri modi di trasporto verso la via fluviale. Nel paragrafo 24.2, Analisi della domanda di traffico (pagina 349 e segg.), sono state già presentate le fonti analizzate per stimare il traffico attratto dai nuovi investimenti. Come si è detto, è stato prudenzialmente assunto come input principale il traffico dello studio AIPO/CLAS del febbraio 2015, la cui entità (in termini di variazione in tonnellate x Km per ogni modo di trasporto) è stata presentata nella Tabella 183 a pagina 350. Per adattare tali ipotesi al presente studio si è provveduto ad azzerare tutte le variazioni di traffico fino all'anno 2024. Dal 2025 in poi si ha un incremento

di traffico lineare sul modo fluviale che arriva a pareggiare le ipotesi AIPO/CLAS nel 2029 (si ipotizza che il sistema entri a regime nel giro di 5 anni, da 2025 a 2029 incluso). Da quel momento in poi si segue il trend già prospettato nello studio precedente, con una crescita del 1,5%.

Criteri simili sono stati applicati per lo scenario di crescita incrementato già presentato nella Tabella 185 di pagina 355 (riferito alla possibilità di un traffico fluvio-marittimo), laddove però si ha una crescita più marcata che inizia a partire dal 2025, si allinea alle ipotesi generali nel 2029 (sistema a regime) e si suppone possa attenuarsi solo a partire dal 2039, anno in cui si applica una crescita annua pari a 1,5%.

I dati di traffico corretti (in tonnellate x km) sono presentati nelle seguenti Tabella 198 e Tabella 199.

Anno	Variazione della domanda di traffico		
	Mod. idroviaria	Mod. stradale	Mod. ferroviaria
	Tonn x km		
2016	0	0	0
2017	0	0	0
2018	0	0	0
2019	0	0	0
2020	0	0	0
2021	0	0	0
2022	0	0	0
2023	0	0	0
2024	0	0	0
2025	121.203.045	-115.154.517	-17.011.814
2026	246.042.182	-233.763.670	-34.533.983
2027	374.599.222	-355.905.188	-52.577.989
2028	506.957.613	-481.658.354	-71.155.545
2029	643.202.472	-611.104.037	-90.278.598
2030	652.850.509	-620.270.597	-91.632.777
2031	662.643.267	-629.574.656	-93.007.269
2032	672.582.916	-639.018.276	-94.402.378
2033	682.671.659	-648.603.550	-95.818.414
2034	692.911.734	-658.332.603	-97.255.690
2035	703.305.410	-668.207.593	-98.714.525
2036	713.854.992	-678.230.706	-100.195.243
2037	724.562.816	-688.404.167	-101.698.172
2038	735.431.259	-698.730.230	-103.223.644
2039	746.462.728	-709.211.183	-104.771.999
2040	757.659.668	-719.849.351	-106.343.579
2041	769.024.564	-730.647.091	-107.938.733
2042	780.559.932	-741.606.797	-109.557.814
2043	792.268.331	-752.730.899	-111.201.181
2044	804.152.356	-764.021.863	-112.869.198

Fonte: Elaborazione da studio AIPO/CLAS febbraio 2015 (dati da 2029 estrapolati sulla base di un fattore di crescita costante pari a 1,5% annuo)

Tabella 198 - Variazione della domanda di traffico sui diversi modi di trasporto – scenari di progetto (ipotesi di base da studio AIPO/CLAS con modifiche)

Anno	Variazione della domanda di traffico		
	Mod. idroviaria	Mod. stradale	Mod. ferroviaria
	Tonn x km		
2016	0	0	0
2017	0	0	0
2018	0	0	0
2019	0	0	0
2020	0	0	0
2021	0	0	0
2022	0	0	0
2023	0	0	0
2024	0	0	0
2025	159.710.494	-145.400.120	-21.769.735
2026	340.195.278	-309.713.113	-46.371.162
2027	544.511.015	-495.721.758	-74.220.926
2028	776.148.354	-706.603.935	-105.794.828
2029	1.039.090.394	-945.985.852	-141.635.795
2030	1.114.898.957	-1.015.001.819	-151.969.070
2031	1.159.604.397	-1.055.701.564	-158.062.756
2032	1.206.491.445	-1.098.387.440	-164.453.811
2033	1.255.674.420	-1.143.163.524	-171.157.819
2034	1.307.273.763	-1.190.139.464	-178.191.195
2035	1.361.416.363	-1.239.430.781	-185.571.237
2036	1.418.235.912	-1.291.159.187	-193.316.166
2037	1.477.873.263	-1.345.452.913	-201.445.184
2038	1.540.476.817	-1.402.447.066	-209.978.516
2039	1.563.583.970	-1.423.483.772	-213.128.194
2040	1.587.037.729	-1.444.836.029	-216.325.117
2041	1.610.843.295	-1.466.508.570	-219.569.994
2042	1.635.005.945	-1.488.506.198	-222.863.544
2043	1.659.531.034	-1.510.833.791	-226.206.497
2044	1.684.423.999	-1.533.496.298	-229.599.594

Fonte: Elaborazione da studio AIPO/CLAS febbraio 2015 (dati da 2040 estrapolati sulla base di un fattore di crescita costante pari a 1,5% annuo)

Tabella 199 - Variazione della domanda di traffico sui diversi modi di trasporto – scenari di progetto (ipotesi corretta da studio AIPO/CLAS, con incremento dei trend di crescita e delle distanze percorse e ulteriori modifiche)

Dai dati della tabella precedente si sono calcolate tutta una serie di esternalità, così come descritto nei punti seguenti. Per coerenza con studi precedenti, anche in questo caso si sono adottati (con alcune eccezioni) i costi economici già adottati da AIPO/CLAS, a loro volta basati su fonti ben verificate. Si hanno pertanto i valori di seguito descritti.

- Costi operativi[7]: sono stati adottati i seguenti costi operativi (o di esercizio) per ciascun modo:
  - Navigazione idroviaria 0,007 EUR/t x km
  - Strada 0,039 EUR/t x km
  - Ferrovia 0,031 EUR/t x km

[7] Valori stimati da CLAS sulla base di proprie ricerche

- Costi ambientali (emissioni)[8]:
  - Navigazione idroviaria 0,0025 EUR/t x km
  - Strada 0,004 EUR/t x km
- Costi ambientali (inquinamento acustico)[9]:
  - Navigazione idroviaria 0 EUR/t x km
  - Strada 0,004 EUR/t x km
  - Ferrovia 0,0009 EUR/t x km
- Costi incidentalità[10]:
  - Navigazione idroviaria 0 EUR/t x km
  - Strada 0,0013 EUR/t x km
  - Ferrovia 0,0002 EUR/t x km
- Costi congestione stradale[11]:
  - Navigazione idroviaria 0 EUR/t x km
  - Strada 0,0233 EUR/t x km
  - Ferrovia 0 EUR/t x km
- Altre esternalità[12]:
  - Navigazione idroviaria 0 EUR/t x km
  - Strada 0,0039 EUR/t x km
  - Ferrovia 0,0006 EUR/t x km
- Impatto climatico[13]:
  - Navigazione idroviaria 0 EUR/t x km
  - Strada 0,0039 EUR/t x km
  - Ferrovia 0,0006 EUR/t x km

I valori esposti nei punti precedenti sono diventati moltiplicatori delle variazioni di traffico (in tonnellate x km) già esposte nella Tabella 198 presentata sopra, e quindi trasformate in costi componenti il cash-flow economico (a cui è stato applicato il tasso di sconto del 3%).

Tra i costi di investimento scaglionati nel tempo è stata considerata anche l'acquisizione di un numero opportuno di imbarcazioni di imbarcazioni di Classe V. Il ritmo di acquisizione delle imbarcazioni segue più o meno il trend di crescita del traffico, per cui si hanno due scenari separati di acquisizione.

[8] Valori basati su "Update of the handbook on external costs of transport", Ricardo-AEA,Commissione Europea DG Move, 2014

[9] Stessa fonte della nota precedente

[10] Stessa fonte della nota precedente

[11] Stessa fonte della nota precedente

[12] Stessa fonte della nota precedente. Si fa riferimento in questo caso all'impatto sulla natura e sul panorama, alla perdita di biodiversità, all'inquinamento del suolo e dell'acqua, e ai costi addizionali nelle aree urbane generati dalle diverse modalità di trasporto.

[13] Fonte: "External Costs of Transport in Europe, CE Delft - INFRAS - Fraunhofer ISI, Settembre 2011". In questo caso si tratta di una fonte non utilizzata nel precedente studio AIPO/CLAS

Per lo scenario di base (Tabella 198) si è ipotizzato l'acquisto di 16 imbarcazioni, con il seguente calendario:

- anno 2024: 3 imbarcazioni aggiuntive
- anno 2025 2 " "
- anno 2026 3 " "
- anno 2027 2 " "
- anno 2028 3 " "
- anno 2033 1 " "
- anno 2038 1 " "
- anno 2042 1 " "

Per lo scenario con traffico incrementato (Tabella 199) si è ipotizzato l'acquisto di 33 imbarcazioni, con il seguente calendario:

- anno 2024: 4 imbarcazioni aggiuntive
- anno 2025: 3 " "
- anno 2026: 4 " "
- anno 2027: 4 " "
- anno 2028: 5 " "
- anno 2029: 2 " "
- anno 2030: 1 " "
- anno 2032: 1 " "
- anno 2033: 1 " "
- anno 2034: 1 " "
- anno 2035: 1 " "
- anno 2036: 2 " "
- anno 2037: 1 " "
- anno 2039: 1 " "
- anno 2041: 1 " "
- anno 2043: 1 " "

Il costo economico di queste imbarcazioni è stato stimato in 3,15 EUR x 10^6, partendo da un costo di acquisizione effettivo di 4,5 EUR x 10^6.

- Deve essere infine menzionato il criterio con il quale sono stati valutati i benefici economici da produzione di energia elettrica. Come già detto nel paragrafo 24.1 (Produzione di Energia Elettrica, pagina 348), si è scelto di considerare come unico beneficio derivante dalla produzione elettrica quello legato alla componente ambientale relativa alla non produzione di GHC ed in particolare della CO_2 in relazione ad una medesima quantità di produzione di energia elettrica rapportata ad una centrale termoelettrica a gas. Il valore stimato di produzione di CO_2 termoelettrico è stato fissato in 0,4332 kg/kWh[14], con un valore delle emissioni di CO_2 pari a 8,53 EUR/t[15]. Sulla base di questi valori di base si hanno, nei tre scenari che prevedono la produzione di energia i seguenti benefici annui:

[14] Da indicazioni metodologiche per l'applicazione dei fattori di conversione al metodo di calcolo di cui alla DGR 967/2015 e alla DGR 1275/2015

[15] Fonte: European Emission Allowances (https://www.eex.com), consultato in data 4 dicembre 2015

- Benefici da produzione di energia (246,2 GWh/anno)
- per l'ipotesi mista (2 traverse): 0,91 EUR x 106 / anno
- Benefici da produzione di energia (359,6 GWh/anno)
- per l'ipotesi mista (3 traverse): 1,33 EUR x 106 / anno
- Benefici da produzione di energia (555,1 GWh/anno)
- per l'ipotesi regimazione: 2,05 EUR x 106 / anno

28 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

28.1 ANALISI BENEFICI/COSTI FINANZIARIA

I risultati dell'analisi b/c finanziaria hanno portato a risultati negativi per tutti gli scenari analizzati. Tale negatività era comunque attesa, dato che un investimento che non presenta entrate di cassa nel corso della sua vita economica non può – per ovvie ragioni– presentare un'attrattività finanziaria. I risultati dell'analisi b/c finanziaria sono quelli presentati nella tabella seguente per tutti gli scenari considerati.

Scenario infrastrutturale		Produzione di energia elettrica	Scenario di traffico	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
1	Ipotesi corrente libera	no	Traffico base	-2,71%	-475,89	0,24
2	Ipotesi mista (2 traverse)			-2,94%	-1095,35	0,22
3	Ipotesi mista (3 traverse)			-2,99%	-1588,68	0,22
4	Ipotesi regimazione			-3,14%	-2080,43	0,22
5	Ipotesi mista (2 traverse)	si		-2,46%	-1205,20	0,27
6	Ipotesi mista (3 traverse)			-2,46%	-1782,25	0,27
7	Ipotesi regimazione			-2,51%	-2420,54	0,28
8	Ipotesi mista (2 traverse)	no	Traffico incrementato	-2,94%	-1095,35	0,22
9	Ipotesi mista (3 traverse)			-2,99%	-1588,68	0,22
10	Ipotesi regimazione			-3,14%	-2080,43	0,22

Tabella 200 – Risultati dell'analisi benefici/costi finanziaria

L'analisi della Tabella 200 porta alle seguenti considerazioni:

- in generale, a parità di combinazione tra produzione di energia e scenario di traffico, si hanno valori peggiorativi per le ipotesi con i costi di investimento maggiori, eccetto per il rapporto benefici/costi (B/C); questo avviene perché il rapporto B/C, specialmente in mancanza di entrate nel flusso di cassa, è nel nostro caso fortemente condizionato dal rapporto tra il valore residuo netto (direttamente proporzionale al valore iniziale di investimento) e la somma di tutta le spese (investimenti iniziali + manutenzione);
- in assenza di produzione di energia e con scenari di traffico differenti , i risultati finanziari sono esattamente gli stessi: questo perché si è ipotizzato che l'ente gestore non ha entrate dai flussi di traffico idroviario;
- l'inserimento della produzione di energia idroelettrica produce un miglioramento nel flusso di cassa, con risultati che però sono ben lontani dall'essere positivi.

Il tasso di sconto utilizzato è, come già detto, 4%, conformemente a quanto suggerito dalla "*Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects (2014-2020)*" .

I risultati dell'analisi benefici / costi sono comunque utili per focalizzare i seguenti punti:

- non è possibile ipotizzare l'investimento proposto senza un investimento pubblico: nessun investitore privato potrebbe essere interessato ad un investimento che, limitatamente al suo punto di vista, sarebbe in perdita secca
- dal punto di vista numerico, i risultati dell'analisi b/c sono comunque utili per valutare in seguito l'entità dell'intervento pubblico (sia esso di fonte nazionale, comunitaria, o una combinazione

delle due cose) che potrà portare alla fattibilità dell'opera

In ogni caso, la vera fattibilità dell'investimento non è dettata dai risultati finanziari, ma dai risultati economici esposti nel paragrafo successivo che rispecchiano l'utilità sociale di quanto si propone in questo studio.

28.2 ANALISI BENEFICI/COSTI ECONOMICA

Dal punto di vista economico, ovvero dal punto di vista dell'intera collettività, i risultati si presentano molto più articolati e complessi rispetto al punto di vista meramente finanziario. La seguente Tabella 201 presenta i risultati dell'analisi economica nelle varie ipotesi. Si ricorda che in questo caso il tasso di sconto finanziario adottato è del 3%, come suggerito dalla "Guida".

Scenario infrastrutturale		Produzione di energia elettrica	Scenario di traffico	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
1	Ipotesi corrente libera	no	Traffico base	6,10%	196,03	1,51
2	Ipotesi mista (2 traverse)			1,70%	-165,36	0,81
3	Ipotesi mista (3 traverse)			0,74%	-364,73	0,69
4	Ipotesi regimazione			-0,08%	-620,60	0,59
5	Ipotesi mista (2 traverse)	si		1,18%	-264,31	0,75
6	Ipotesi mista (3 traverse)			0,27%	-513,34	0,63
7	Ipotesi regimazione			-0,54%	-871,38	0,54
8	Ipotesi mista (2 traverse)	no	Traffico incrementato	4,21%	177,97	1,19
9	Ipotesi mista (3 traverse)			2,88%	-21,41	0,98
10	Ipotesi regimazione			1,75%	-277,28	0,82

Tabella 201 – Risultati dell'analisi benefici/costi economica

L'analisi della Tabella 201 porta alle seguenti considerazioni:

- La soluzione più fattibile dal punto di vista economico sembrerebbe essere quella che prevede la costruzione di soli pennelli. L'incremento di traffico che si è voluto stimare con l'introduzione del fluvio-marittimo porta però ad un rapporto B/C maggiore di 1 anche per la soluzione mista con 2 traverse, mentre le altre soluzioni, pur registrando un incremento del rapporto B/C presentano ancora valori negativi, con la soluzione con 3 traverse che raggiunge un "quasi pareggio" (rapporto B/C pari a 0,98). A questo punto, però, si deve far riferimento anche alle analisi di sensitività che sono presentate di seguito. Lo scenario fluvio-marittimo è stato infatti analizzato tramite l'assunzione di ipotesi iniziali che dovranno essere suffragate in una fase successiva da specifiche indagini origine/destinazione e supportate da un modello di traffico "ad hoc", per cui rimangono dei margini sui quali si dovrà poi intervenire in una fase successiva.
- L'introduzione della produzione di energia elettrica abbassa il rendimento economico degli investimenti. Questo perché, come già detto in precedenza, non è il valore intrinseco dell'energia prodotta a determinare un beneficio sociale, ma solo l'impatto ambientale positivo dovuto alla non produzione da fonte non rinnovabile. A fronte di ciò, però, si ha un incremento dei costi di costruzione e manutenzione, che rappresentano comunque un onere nel loro complesso (al netto dei benefici sociali, quali produzione di lavoro ed altro, rappresentati dai prezzi ombra)

Riguardo il primo dei due punti sopra descritti, è utile presentare le analisi di sensitività che sono state condotte a fronte di due ipotesi:

- una variazione dei costi di investimento di ±30% rispetto ai valori iniziali
- una variazione della domanda di traffico compresa tra -20% a +200% rispetto ai valori iniziali

I risultati sono presentati nelle tabelle successive per le diverse ipotesi di investimento.

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-30%	8,38%	265,71	1,93
-20%	7,49%	242,48	1,76
-10%	6,74%	219,26	1,62
valore base	6,10%	196,03	1,51
+10%	5,55%	172,80	1,41
+20%	5,07%	149,58	1,33
+30%	4,65%	126,35	1,26

Tabella 202 - Ipotesi corrente libera, senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione dei costi di investimento

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-20%	4,80%	107,01	1,28
-10%	5,47%	152,09	1,40
valore base	6,10%	196,03	1,51
10%	6,71%	241,27	1,62
20%	7,27%	285,10	1,73
30%	7,82%	330,32	1,84
40%	8,33%	374,13	1,94
60%	9,30%	463,19	2,14
80%	10,18%	552,21	2,34
100%	11,02%	641,38	2,53
120%	11,78%	730,37	2,71
150%	12,86%	863,41	2,97
200%	14,45%	1.086,79	3,40

Tabella 203 - Ipotesi corrente libera, senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione del traffico deviato

traffico / costi	-20%	-10%	valore base	10%	20%	30%	40%	60%	80%	100%	120%	150%	200%
-30%	1.63	1.79	1.93	2.08	2.21	2.36	2.48	2.74	2.99	3.23	3.45	3.77	4.28
-20%	1.49	1.63	1.76	1.89	2.02	2.15	2.26	2.50	2.73	2.95	3.16	3.46	3.93
-10%	1.38	1.50	1.62	1.74	1.86	1.98	2.09	2.30	2.52	2.72	2.92	3.20	3.64
valore base	1.28	1.40	1.51	1.62	1.73	1.84	1.94	2.14	2.34	2.53	2.71	2.97	3.40
+10%	1.20	1.31	1.41	1.52	1.61	1.72	1.81	2.00	2.18	2.36	2.54	2.78	3.18
+20%	1.14	1.24	1.33	1.43	1.52	1.61	1.70	1.88	2.05	2.22	2.39	2.62	3.00
+30%	1.08	1.17	1.26	1.35	1.44	1.53	1.61	1.78	1.94	2.10	2.25	2.48	2.84

Tabella 204 - Ipotesi corrente libera, senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività incrociata su variazione del traffico deviato e variazione dei costi di investimento (solo rapporto b/c – in verde i valori ≥1,00)

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-30%	3,04%	3,84	1,01
-20%	2,50%	-52,56	0,93
-10%	2,07%	-108,96	0,87
valore base	1,70%	-165,36	0,81
+10%	1,40%	-221,76	0,77
+20%	1,13%	-278,16	0,74
+30%	0,91%	-334,56	0,71

Tabella 205 - Ipotesi mista (2 traverse), senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione dei costi di investimento

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-20%	0,94%	-254,38	0,71
-10%	1,33%	-209,30	0,76
valore base	1,70%	-165,36	0,81
10%	2,07%	-120,12	0,87
20%	2,42%	-76,29	0,92
30%	2,77%	-31,07	0,97
40%	3,09%	12,74	1,01
60%	3,73%	101,80	1,11
80%	4,33%	190,82	1,21
100%	4,90%	279,99	1,30
120%	5,44%	368,98	1,40
150%	6,20%	502,02	1,53
200%	7,37%	725,40	1,76

Tabella 206 - Ipotesi mista (2 traverse), senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione del traffico deviato

traffico / costi	-20%	-10%	valore base	10%	20%	30%	40%	60%	80%	100%	120%	150%	200%
-30%	0,87	0,94	**1,01**	1,08	1,14	1,21	1,27	1,41	1,53	1,66	1,78	1,96	2,25
-20%	0,80	0,87	**0,93**	0,99	1,05	1,11	1,17	1,29	1,40	1,51	1,63	1,79	2,05
-10%	0,75	0,81	**0,87**	0,92	0,98	1,03	1,08	1,19	1,30	1,40	1,50	1,65	1,89
valore base	**0,71**	**0,76**	**0,81**	**0,87**	**0,92**	**0,97**	**1,01**	**1,11**	**1,21**	**1,30**	**1,40**	**1,53**	**1,76**
+10%	0,68	0,73	**0,77**	0,82	0,86	0,91	0,96	1,05	1,13	1,22	1,31	1,44	1,64
+20%	0,65	0,69	**0,74**	0,78	0,82	0,86	0,91	0,99	1,07	1,15	1,23	1,35	1,55
+30%	0,62	0,67	**0,71**	0,75	0,78	0,82	0,86	0,94	1,02	1,09	1,17	1,28	1,46

Tabella 207 - Ipotesi mista (2 traverse), senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività incrociata su variazione del traffico deviato e variazione dei costi di investimento (solo rapporto b/c – in verde i valori ≥1,00)

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-30%	1,81%	-141,65	0,83
-20%	1,37%	-216,01	0,77
-10%	1,03%	-290,37	0,73
valore base	0,74%	-364,73	0,69
+10%	0,50%	-439,09	0,66
+20%	0,29%	-513,45	0,63
+30%	0,12%	-587,81	0,61

Tabella 208 - Ipotesi mista (3 traverse), senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione dei costi di investimento

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-20%	0,11%	-453,76	0,61
-10%	0,44%	-408,67	0,65
valore base	0,74%	-364,73	0,69
10%	1,05%	-319,49	0,73
20%	1,33%	-275,67	0,77
30%	1,63%	-230,44	0,80
40%	1,90%	-186,63	0,84
60%	2,44%	-97,58	0,92
80%	2,95%	-8,55	0,99
100%	3,44%	80,61	1,07
120%	3,91%	169,60	1,14
150%	4,58%	302,64	1,25
200%	5,61%	526,02	1,43

Tabella 209 - Ipotesi mista (3 traverse), senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione del traffico deviato

traffico / costi	-20%	-10%	valore base	10%	20%	30%	40%	60%	80%	100%	120%	150%	200%
-30%	0,73	0,78	**0,83**	0,89	0,94	0,99	1,04	1,14	1,25	1,34	1,44	1,58	1,82
-20%	0,68	0,73	**0,77**	0,82	0,87	0,92	0,96	1,05	1,14	1,23	1,32	1,45	1,66
-10%	0,64	0,68	**0,73**	0,77	0,81	0,85	0,90	0,98	1,06	1,14	1,22	1,34	1,53
valore base	**0,61**	**0,65**	**0,69**	**0,73**	**0,77**	**0,80**	**0,84**	**0,92**	**0,99**	**1,07**	**1,14**	**1,25**	**1,43**
+10%	0,58	0,62	**0,66**	0,69	0,73	0,76	0,80	0,87	0,94	1,00	1,07	1,17	1,34
+20%	0,56	0,60	**0,63**	0,66	0,69	0,73	0,76	0,82	0,89	0,95	1,01	1,11	1,26
+30%	0,54	0,57	**0,61**	0,64	0,67	0,70	0,73	0,79	0,85	0,91	0,97	1,05	1,19

Tabella 210 - Ipotesi mista (3 traverse), senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività incrociata su variazione del traffico deviato e variazione dei costi di investimento (solo rapporto b/c – in verde i valori ≥1,00)

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-30%	0,72%	-333,18	0,70
-20%	0,39%	-428,99	0,66
-10%	0,13%	-524,79	0,62
valore base	-0,08%	-620,60	0,59
+10%	-0,26%	-716,41	0,57
+20%	-0,42%	-812,22	0,55
+30%	-0,55%	-908,03	0,53

Tabella 211 – Ipotesi regimazione, senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione dei costi di investimento

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-20%	-0,60%	-709,63	0,53
-10%	-0,34%	-664,54	0,56
valore base	-0,08%	-620,60	0,59
10%	0,17%	-575,36	0,62
20%	0,41%	-531,54	0,65
30%	0,66%	-486,31	0,68
40%	0,89%	-442,50	0,71
60%	1,35%	-353,45	0,77
80%	1,79%	-264,42	0,83
100%	2,21%	-175,26	0,89
120%	2,62%	-86,27	0,94
150%	3,20%	46,77	1,03
200%	4,12%	270,15	1,17

Tabella 212 – Ipotesi regimazione, senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione del traffico deviato

traffico / costi	-20%	-10%	valore base	10%	20%	30%	40%	60%	80%	100%	120%	150%	200%
-30%	0.62	0.66	**0.70**	0.74	0.78	0.82	0.86	0.94	1.02	1.10	1.18	1.29	1.48
-20%	0.58	0.62	**0.66**	0.69	0.73	0.76	0.80	0.87	0.94	1.01	1.08	1.18	1.35
-10%	0.55	0.59	**0.62**	0.65	0.69	0.72	0.75	0.82	0.88	0.94	1.01	1.10	1.25
valore base	**0.53**	**0.56**	**0.59**	**0.62**	**0.65**	**0.68**	**0.71**	**0.77**	**0.83**	**0.89**	**0.94**	**1.03**	**1.17**
+10%	0.51	0.54	**0.57**	0.60	0.62	0.65	0.68	0.73	0.79	0.84	0.89	0.97	1.10
+20%	0.50	0.52	**0.55**	0.57	0.60	0.62	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.92	1.04
+30%	0.48	0.51	**0.53**	0.55	0.58	0.60	0.62	0.67	0.72	0.76	0.81	0.88	0.99

Tabella 213 - Ipotesi regimazione, senza produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività incrociata su variazione del traffico deviato e variazione dei costi di investimento (solo rapporto b/c – in verde i valori ≥1,00)

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-30%	2,38%	-66,52	0,91
-20%	1,90%	-132,45	0,84
-10%	1,51%	-198,38	0,79
valore base	1,18%	-264,31	0,75
+10%	0,91%	-330,24	0,71
+20%	0,68%	-396,17	0,68
+30%	0,48%	-462,10	0,65

Tabella 214 - Ipotesi mista (2 traverse), con produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione dei costi di investimento

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-20%	0,50%	-353,33	0,66
-10%	0,85%	-308,25	0,70
valore base	1,18%	-264,31	0,75
10%	1,52%	-219,07	0,79
20%	1,83%	-175,24	0,83
30%	2,14%	-130,02	0,88
40%	2,44%	-86,21	0,92
60%	3,02%	2,85	1,00
80%	3,57%	91,87	1,09
100%	4,09%	181,04	1,17
120%	4,59%	270,03	1,25
150%	5,30%	403,07	1,37
200%	6,39%	626,45	1,56

Tabella 215 - Ipotesi mista (2 traverse), con produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione del traffico deviato

traffico / costi	-20%	-10%	valore base	10%	20%	30%	40%	60%	80%	100%	120%	150%	200%
-30%	0,79	0,85	**0,91**	0,97	1,03	1,09	1,14	1,26	1,37	1,48	1,59	1,74	2,00
-20%	0,74	0,79	**0,84**	0,90	0,95	1,00	1,05	1,15	1,25	1,35	1,45	1,59	1,82
-10%	0,69	0,74	**0,79**	0,84	0,89	0,93	0,98	1,07	1,16	1,25	1,34	1,47	1,68
valore base	**0,66**	**0,70**	**0,75**	**0,79**	**0,83**	**0,88**	**0,92**	**1,00**	**1,09**	**1,17**	**1,25**	**1,37**	**1,56**
+10%	0,63	0,67	**0,71**	0,75	0,79	0,83	0,87	0,95	1,02	1,10	1,17	1,28	1,47
+20%	0,60	0,64	**0,68**	0,72	0,75	0,79	0,83	0,90	0,97	1,04	1,11	1,21	1,38
+30%	0,58	0,62	**0,65**	0,69	0,72	0,75	0,79	0,86	0,92	0,99	1,05	1,15	1,31

Tabella 216 - Ipotesi mista (2 traverse), con produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività incrociata su variazione del traffico deviato e variazione dei costi di investimento (solo rapporto b/c – in verde i valori ≥1,00)

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-30%	1,20%	-247,45	0,76
-20%	0,82%	-336,08	0,71
-10%	0,52%	-424,71	0,67
valore base	0,27%	-513,34	0,63
+10%	0,07%	-601,97	0,61
+20%	-0,11%	-690,60	0,58
+30%	-0,26%	-779,23	0,56

Tabella 217 - Ipotesi mista (3 traverse), con produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione dei costi di investimento

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-20%	-0,27%	-602,36	0,57
-10%	0,01%	-557,28	0,60
valore base	0,27%	-513,34	0,63
10%	0,54%	-468,10	0,67
20%	0,80%	-424,27	0,70
30%	1,05%	-379,05	0,73
40%	1,30%	-335,24	0,76
60%	1,77%	-246,18	0,83
80%	2,23%	-157,16	0,89
100%	2,67%	-67,99	0,95
120%	3,10%	21,00	1,01
150%	3,70%	154,04	1,11
200%	4,65%	377,42	1,26

Tabella 218 - Ipotesi mista (3 traverse), con produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione del traffico deviato

TRAFFICO / COSTI	-20%	-10%	valore base	10%	20%	30%	40%	60%	80%	100%	120%	150%	200%
-30%	0,67	0,71	**0,76**	0,80	0,84	0,89	0,93	1,02	1,10	1,19	1,27	1,39	1,59
-20%	0,63	0,67	**0,71**	0,75	0,78	0,82	0,86	0,94	1,02	1,09	1,17	1,28	1,46
-10%	0,59	0,63	**0,67**	0,70	0,74	0,77	0,81	0,88	0,95	1,02	1,08	1,18	1,35
valore base	**0,57**	**0,60**	**0,63**	**0,67**	**0,70**	**0,73**	**0,76**	**0,83**	**0,89**	**0,95**	**1,01**	**1,11**	**1,26**
+10%	0,54	0,58	**0,61**	0,64	0,66	0,70	0,72	0,78	0,84	0,90	0,96	1,04	1,18
+20%	0,53	0,55	**0,58**	0,61	0,64	0,67	0,69	0,75	0,80	0,85	0,91	0,99	1,12
+30%	0,51	0,54	**0,56**	0,59	0,61	0,64	0,66	0,72	0,77	0,82	0,87	0,94	1,06

Tabella 219 - Ipotesi mista (3 traverse), con produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività incrociata su variazione del traffico deviato e variazione dei costi di investimento (solo rapporto b/c – in verde i valori ≥1,00)

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-30%	0,12%	-512,26	0,63
-20%	-0,15%	-631,97	0,59
-10%	-0,36%	-751,68	0,56
valore base	-0,54%	-871,38	0,54
+10%	-0,68%	-991,09	0,52
+20%	-0,81%	-1.110,79	0,51
+30%	-0,91%	-1.230,50	0,49

Tabella 220 – Ipotesi regimazione, con produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione dei costi di investimento

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-20%	-0,97%	-960,40	0,49
-10%	-0,75%	-915,32	0,52
valore base	-0,54%	-871,38	0,54
10%	-0,33%	-826,14	0,57
20%	-0,12%	-782,31	0,59
30%	0,08%	-737,09	0,61
40%	0,28%	-693,28	0,64
60%	0,67%	-604,22	0,69
80%	1,04%	-515,20	0,73
100%	1,41%	-426,03	0,78
120%	1,76%	-337,04	0,83
150%	3,20%	46,77	1,03
200%	4,12%	270,15	1,17

Tabella 221 – Ipotesi regimazione, con produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione del traffico deviato

traffico / costi	-20%	-10%	valore base	10%	20%	30%	40%	60%	80%	100%	120%	150%	200%
-30%	0,56	0,60	**0,63**	0,66	0,70	0,73	0,76	0,83	0,89	0,95	1,02	1,11	1,26
-20%	0,53	0,56	**0,59**	0,62	0,65	0,68	0,71	0,77	0,83	0,88	0,94	1,02	1,16
-10%	0,51	0,54	**0,56**	0,59	0,62	0,64	0,67	0,72	0,77	0,83	0,88	0,95	1,08
valore base	**0,49**	**0,52**	**0,54**	**0,57**	**0,59**	**0,61**	**0,64**	**0,69**	**0,73**	**0,78**	**0,83**	**0,90**	**1,01**
+10%	0,48	0,50	**0,52**	0,54	0,57	0,59	0,61	0,65	0,70	0,74	0,78	0,85	0,95
+20%	0,46	0,48	**0,51**	0,53	0,55	0,57	0,59	0,63	0,67	0,71	0,75	0,81	0,90
+30%	0,45	0,47	**0,49**	0,51	0,53	0,55	0,57	0,60	0,64	0,68	0,72	0,77	0,86

Tabella 222 - Ipotesi regimazione, con produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività incrociata su variazione del traffico deviato e variazione dei costi di investimento (solo rapporto b/c – in verde i valori ≥1,00)

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-30%	6,05%	347,17	1,51
-20%	5,32%	290,77	1,38
-10%	4,72%	234,37	1,28
valore base	4,21%	177,97	1,19
+10%	3,77%	121,57	1,12
+20%	3,38%	65,17	1,06
+30%	3,05%	8,77	1,01

Tabella 223 - Ipotesi mista (2 traverse), senza produzione di energia e scenario di traffico incrementato: analisi di sensitività su variazione dei costi di investimento

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-20%	3,15%	21,11	1,02
-10%	3,70%	100,23	1,11
valore base	4,21%	177,97	1,19
10%	4,70%	257,01	1,28
20%	5,17%	336,31	1,36
30%	5,62%	415,38	1,44
40%	6,05%	494,53	1,52
60%	6,85%	651,51	1,67
80%	7,59%	809,78	1,83
100%	8,28%	966,65	1,97
120%	8,93%	1.124,98	2,12
150%	6,20%	502,02	1,53
200%	7,37%	725,40	1,76

Tabella 224 - Ipotesi mista (2 traverse), senza produzione di energia e scenario di traffico incrementato: analisi di sensitività su variazione del traffico deviato

traffico / costi	-20%	-10%	valore base	10%	20%	30%	40%	60%	80%	100%	120%	150%	200%
-30%	1,28	1,40	**1,51**	1,62	1,73	1,83	1,94	2,13	2,33	2,51	2,69	2,95	3,35
-20%	1,18	1,28	**1,38**	1,48	1,58	1,67	1,77	1,95	2,13	2,30	2,46	2,70	3,07
-10%	1,09	1,19	**1,28**	1,37	1,46	1,55	1,63	1,80	1,96	2,12	2,27	2,50	2,84
valore base	**1,02**	**1,11**	**1,19**	**1,28**	**1,36**	**1,44**	**1,52**	**1,67**	**1,83**	**1,97**	**2,12**	**2,32**	**2,65**
+10%	0,96	1,04	**1,12**	1,20	1,27	1,35	1,42	1,57	1,71	1,85	1,98	2,18	2,48
+20%	0,91	0,99	**1,06**	1,13	1,20	1,27	1,34	1,48	1,61	1,74	1,87	2,05	2,34
+30%	0,87	0,94	**1,01**	1,07	1,14	1,21	1,27	1,40	1,52	1,64	1,76	1,94	2,21

Tabella 225 - Ipotesi mista (2 traverse), senza produzione di energia e scenario di traffico incrementato: analisi di sensitività incrociata su variazione del traffico deviato e variazione dei costi di investimento (solo rapporto b/c – in verde i valori ≥1,00)

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-30%	4,46%	201,67	1,23
-20%	3,83%	127,31	1,13
-10%	3,32%	52,95	1,05
valore base	2,88%	-21,41	0,98
+10%	2,51%	-95,77	0,93
+20%	2,19%	-170,13	0,88
+30%	1,91%	-244,49	0,84

Tabella 226 - Ipotesi mista (3 traverse), senza produzione di energia e scenario di traffico incrementato: analisi di sensitività su variazione dei costi di investimento

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-20%	-0,97%	-960,40	0,49
-10%	-0,75%	-915,32	0,52
valore base	-0,54%	-871,38	0,54
10%	-0,33%	-826,14	0,57
20%	-0,12%	-782,31	0,59
30%	0,08%	-737,09	0,61
40%	0,28%	-693,28	0,64
60%	0,67%	-604,22	0,69
80%	1,04%	-515,20	0,73
100%	1,41%	-426,03	0,78
120%	1,76%	-337,04	0,83
150%	3,20%	46,77	1,03
200%	4,12%	270,15	1,17

Tabella 221 – Ipotesi regimazione, con produzione di energia e scenario di traffico base: analisi di sensitività su variazione del traffico deviato

traffico / costi	-20%	-10%	valore base	10%	20%	30%	40%	60%	80%	100%	120%	150%	200%
-30%	1,05	1,14	**1,23**	1,32	1,40	1,49	1,57	1,73	1,89	2,04	2,19	2,40	2,74
-20%	0,97	1,05	**1,13**	1,21	1,28	1,36	1,44	1,58	1,73	1,87	2,00	2,20	2,51
-10%	0,90	0,98	**1,05**	1,12	1,19	1,26	1,33	1,46	1,59	1,72	1,85	2,03	2,32
valore base	**0,85**	**0,92**	**0,98**	**1,05**	**1,11**	**1,18**	**1,24**	**1,36**	**1,49**	**1,60**	**1,72**	**1,89**	**2,16**
+10%	0,81	0,87	**0,93**	0,99	1,05	1,11	1,17	1,28	1,39	1,50	1,61	1,77	2,02
+20%	0,77	0,82	**0,88**	0,94	0,99	1,05	1,10	1,21	1,31	1,42	1,52	1,67	1,91
+30%	0,73	0,79	**0,84**	0,89	0,94	1,00	1,05	1,15	1,25	1,34	1,44	1,58	1,80

Tabella 228 - Ipotesi mista (3 traverse), senza produzione di energia e scenario di traffico incrementato: analisi di sensitività incrociata su variazione del traffico deviato e variazione dei costi di investimento (solo rapporto b/c – in verde i valori ≥1,00)

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C

-30%	3,06%	10,15	1,01
-20%	2,54%	-85,66	0,93
-10%	2,11%	-181,47	0,87
valore base	1,75%	-277,28	0,82
+10%	1,45%	-373,09	0,78
+20%	1,19%	-468,89	0,74
+30%	0,96%	-564,70	0,71

Tabella 229 – Ipotesi regimazione, senza produzione di energia e scenario di traffico incrementato: analisi di sensitività su variazione dei costi di investimento

Fattore di corr. costi investimento	TIR	VAN (EUR x 10^6)	B/C
-20%	0,97%	-434,13	0,72
-10%	1,37%	-355,02	0,77
valore base	1,75%	-277,28	0,82
10%	2,12%	-198,23	0,87
20%	2,48%	-118,93	0,92
30%	2,83%	-39,87	0,97
40%	3,16%	39,28	1,02
60%	3,80%	196,27	1,12
80%	4,40%	354,53	1,22
100%	4,96%	511,41	1,32
120%	5,49%	669,74	1,41
150%	3,20%	46,77	1,03
200%	4,12%	270,15	1,17

Tabella 230 – Ipotesi regimazione, senza produzione di energia e scenario di traffico incrementato: analisi di sensitività su variazione del traffico deviato

	-20%	-10%	valore base	10%	20%	30%	40%	60%	80%	100%	120%	150%	200%
-30%	0,87	0,94	**1,01**	1,08	1,15	1,21	1,28	1,41	1,54	1,66	1,78	1,96	2,24
-20%	0,81	0,87	**0,93**	0,99	1,06	1,12	1,18	1,29	1,41	1,52	1,63	1,79	2,05
-10%	0,76	0,82	**0,87**	0,93	0,98	1,04	1,09	1,20	1,31	1,41	1,51	1,66	1,90
valore base	**0,72**	**0,77**	**0,82**	**0,87**	**0,92**	**0,97**	**1,02**	**1,12**	**1,22**	**1,32**	**1,41**	**1,55**	**1,77**
+10%	0,68	0,73	**0,78**	0,83	0,87	0,92	0,97	1,06	1,15	1,24	1,32	1,45	1,66
+20%	0,66	0,70	**0,74**	0,79	0,83	0,87	0,92	1,00	1,09	1,17	1,25	1,37	1,56
+30%	0,63	0,67	**0,71**	0,75	0,79	0,84	0,88	0,95	1,03	1,11	1,19	1,30	1,48

Tabella 231 - Ipotesi regimazione, senza produzione di energia e scenario di traffico incrementato: analisi di sensitività incrociata su variazione del traffico deviato e variazione dei costi di investimento (solo rapporto b/c – in verde i valori ≥1,00)

Le tabelle delle pagine precedenti mostrano come al realizzarsi di alcune condizioni favorevoli anche le soluzioni più costose possano raggiungere valori del rapporto b/c positivi. E' chiaro che all'aumentare dei costi di investimento il numero di combinazioni positive si riduce: si passa da una situazione con rapporti b/c sempre maggiori di 1 (Tabella 204, pagina 704, relativa alla soluzione a corrente libera) a diverse soluzioni situazioni dove il numero di scenari positivi è rappresentato da un "triangolo" in alto a destra della tabelle.

È possibile quindi fare, per punti, alcune considerazioni su questi risultati:

- Le analisi sino ad ora effettuate hanno considerato solo gli impatti di natura trasportistica e, per alcune soluzioni, quelli dovuti alla produzione di energia da fonte idroelettrica: questo vuol dire che non tutti i costi o benefici ambientali sono stati monetizzati (per esempio, i benefici ambientali derivati dalla diversione modale da strada/fiume sono stati considerati, ma i benefici ambientali legati intrinsecamente a ciascuna soluzione per ora non sono stati presi in considerazione);
- Come si è ripetutamente sostenuto, rimane da verificare se la soluzione più economica (corrente libera) sia in grado di garantire gli incrementi di traffico più significativi, che potrebbero essere ottenuti grazie all'introduzione di traffico fluvio-marittimo. A fronte di incrementi di traffico fino a +200% rispetto al traffico base si ottengono valori positivi anche per le soluzioni più costose (vedere, per esempio, la Tabella 213). Posto pari a 100 il traffico base in termini di tonnellate x km, questo significa arrivare ad un valore pari a 300, ovvero triplicare il traffico base: si tratta di un

obiettivo che può essere ragionevolmente raggiunto solo grazie ad un aumento combinato del tonnellaggio e delle distanze percorse;

- Rimangono infine da verificare eventuali benefici non trasportistici (ambiente, territorio, turismo, ecc…) che potrebbero contribuire a far pendere l'ago della bilancia verso l'una o l'altra soluzione.

L'aspetto della navigazione fluvio-marittima è stato già discusso nel paragrafo 24.3 (Naviglio) da pagina 678 in poi, e ad esso si rimanda riguardo le questioni legate alla sua fattibilità tecnica.

29 CONCLUSIONI

Non c'è dubbio che questa studio di pre-fattibilità affronti uno dei temi infrastrutturali più dibattuto nell'arco degli ultimi trenta anni dell'area padana. Diverse sono le ragioni che non ne hanno permesso un ulteriore sviluppo, di certo oggi però due sono le questioni nuove che impongono nuove e più approfondite riflessioni che di fatto modificano e di molto il paradigma del trasporto merci:

le condizioni di mercato potenziale della navigazione fluvio-marittima rispetto a quella solo fluviale non si sono mai verificate, ma ora con l'avvento delle grandi navi portacontainer e la scelta dei courier di utilizzare come porto gateway quello di Trieste, tali condizioni possono essere certamente più concrete;

l'inquinamento ambientale prolungato, dannoso e persistente di tutta la Pianura Padana per effetto dei cambiamenti climatici occorso negli ultimi mesi del 2015, con valori mai verificatisi prima d'ora che nonostante lo sviluppo tecnologico applicato alla motorizzazione ancora è troppo sbilanciato sulla modalità strada.

Tali due ragioni da sole portano alla necessità di affrontare definitivamente uno studio completo di fattibilità che consenta alla luce di tali cambiamenti di verificarne fino in fondo la effettiva praticabilità essendo questo progetto, vista la dimensione territoriale, i costi, le implicazioni trasportistiche sovranazionali ed ambientali, un progetto di livello nazionale e non certamente solo locale o regionale anche se comunque di "area vasta".