

## FIUME PANARO (PROVINCIA DI MODENA)

AVVIO ADEGUAMENTO STRUTTURALE E FUNZIONALE DEL SISTEMA ARGINALE ALLA PORTATA PROGETTUALE DI RIFERIMENTO,  
 TRAMITE INTERVENTI DI SISTEMAZIONE MORFOLOGICA DELL'ALVEO,  
 ADEGUAMENTO IN QUOTA E IN SAGOMA, A VALLE DELLA CASSA AL CONFINE PROVINCIALE.  
 INTERVENTO REALIZZABILE PER STRALCI FUNZIONALI.

(Ordinanza n. 8 del 23/06/2015, allegato 1, codice intervento n. 11784,  
 come modificata Ordinanza n. 2 del 23/02/2016)

(MO-E-1346)

## PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

STRALCIO NUOVO RILEVATO ARGINALE IN SINISTRA IDRAULICA

TRA IL PONTE SANT'AMBROGIO E LA CONFLUENZA CON IL T. TIEPIDO IN COMUNE DI MODENA

GIUGNO 2019

ELABORATO:

### RELAZIONE IDRAULICA

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	VERIFICA
00	PRIMA EMISSIONE	GIUGNO 2019	S. Croci	A. Paoletti
01				

RUP *Dott. Ing. FEDERICA PELLEGRINI*

Supporto al RUP

*Dott. Geol. STEFANO PARODI*  
*Dott. Ing. STEFANO BALDINI*

ATI:

MANDATARIA



20133 MILANO - via Bassini, 23 - tel. 0226681264  
 fax 0226681553 - E-Mail: etatec@etatec.it

*Prof. Ing. ALESSANDRO PAOLETTI*  
*Dott. Ing. GIOVANNI BATTISTA PEDUZZI*  
*Dott. Ing. STEFANO CROCI*  
*Dott. Ing. FILIPPO MALINGENGO*

MANDANTI

**STUDIO PAOLETTI**  
 INGEGNERI ASSOCIATI

20133 MILANO - via Bassini, 23 - tel. 0226681264  
 fax 0226681553 - E-Mail: studiopaoletti@etatec.it

*Dott. Ing. CRISTINA GIUSEPPINA PASSONI*

 **Ing. Claudio Marcello S.r.l.**

20122 MILANO - via Visconti di Modrone, 18  
 tel. 0276020695-0276391291, fax 0276023532  
 E-Mail: info@studiomarcello.it

*Dott. Ing. CARLO CLAUDIO MARCELLO*  
*Dott. Ing. PAOLO MEDA*  
*Dott. Ing. MARIA CRISTINA SOMASCHI*

*Studio Associato di Geologia Spada*



24020 RANICA (BG) - via Donizetti, 17  
 tel. 035516090-035513738  
 E-Mail: info@studiogeospada.it

*Dott. Geol. MARIO SPADA*  
*Dott. Geol. GIAN MARCO ORLANDI*  
*Dott. Geol. SUSANNA BIANCHI*

 **ARCHITETTURA E CITTA' STUDIO ASSOCIATO**  
 architettura e paesaggio

43123 PARMA - via Archimede, 2  
 tel. 0521491914, fax 0521243969  
 E-Mail: info@assarch.it

*Dott. Arch. PAOLA CAVALLINI*  
*Dott. Arch. MICHELE MUSIARI*

 **@Tutto PROGETTO**

28047 Oleggio (NO) - viale Paganini, 9  
 tel. 032194885, fax 0321961008  
 PEC atuttoprogetto@pec.it, E-Mail info@atuttoprogetto.com

*Geom. PAOLO MASSARA*  
*Geom. FILIPPO BELLONI*  
*Geom. VALENTINA MANTOAN*

 **SAP**  
 Società Archeologica S.r.l.

46020 QUINGENTOLE (MN) - Strada Fienili, 39/a  
 tel. 038642287, fax 038642591  
 E-Mail: mail@archeologica.it

*Dott. ALBERTO MANICARDI*  
*Dott.ssa ELISA LERCO*

TIPOLOGIA

PP

COMMESSA

250-28

DOCUMENTO

ATTI

NUMERO

A.2

SCALA

## INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. CARATTERISTICHE IDROLOGICO-IDRAULICHE DEL FIUME PANARO DESUNTE DA STUDI PREGRESSI .....	3
2.1 PREMESSA .....	3
2.2 EVENTI DI PIENA RECENTI ED ANALISI DELLE PORTATE DI RIFERIMENTO .....	4
2.3 ANALISI DELLE MAPPE DI PERICOLOSITÀ E DIAGNOSI DI CRITICITÀ.....	6
2.4 ANALISI IDROLOGICO-IDRAULICHE SVOLTE DA UNIMORE.....	8
2.4.1 Sintesi dei risultati delle analisi svolte da UNIMORE .....	9
2.5 SITUAZIONI DI CRITICITÀ DEL SISTEMA ARGINALE.....	12
3. ANALISI IDRAULICHE DEL F. PANARO MEDIANTE IMPLEMENTAZIONE DI MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE.....	14
3.1 PREMESSA .....	14
3.2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO .....	14
3.2.1 Ipotesi di calcolo .....	14
3.2.2 Caratterizzazione geometrica dell'alveo oggetto della modellazione .....	19
3.2.3 Taratura del modello .....	20
3.3 SIMULAZIONI CONDOTTE CON IL MODELLO BIDIMENSIONALE E RISULTATI OTTENUTI	27

## 1. PREMESSA

La presente progettazione di fattibilità tecnico-economica ha per oggetto la realizzazione di un nuovo argine del fiume Panaro, in sinistra idraulica, tra il rilevato di accesso al ponte Sant'Ambrogio e la confluenza con il T. Tiepido. Il tratto oggetto di intervento ricade interamente nel territorio del Comune di Modena.

La presente relazione espone le principali caratteristiche idrauliche del sistema fluviale oggetto del presente progetto, derivanti soprattutto dalla modellazione bidimensionale condotta nell'ambito del presente progetto.

Relativamente all'assetto idrologico-idrauliche del fiume Panaro, per il tratto esteso fino allo scarico della cassa di laminazione di Sant'Anna (inizio del tratto oggetto del presente progetto) si è fatto particolare riferimento allo studio condotto dall'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia (UNIMORE) svolto nell'ambito della *“ricerca per lo studio delle interazioni tra grandi opere di sbarramento fluviale, correnti idriche superficiali e sotterranee, con riferimento ai manufatti regolatori ed alle arginature di contenimento: sviluppo di modelli matematici di comportamento della cassa di espansione del fiume Panaro nel Comune di San Cesario sul Panaro (MO), del bacino idrografico di monte e del sistema fluviale di valle (MO-E-1255) (O.P.C.M. 3850/2010 – decreto n. 140/2010 “Piano degli interventi urgenti” della Regione Emilia-Romagna)”*, ed in particolare alla *“Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro”*.

Inoltre, si è fatto riferimento anche a quanto contenuto nel PAI e nel PGRA dell'Autorità di bacino del fiume Po, ed in particolare al documento *“Area a rischio significativo di alluvione - ARS Distrettuali – Scheda monografica Fiume Panaro dalla cassa di espansione alla confluenza in Po”*.

Nel capitolo 2 vengono riportati i dati essenziali estratti dallo studio UNIMORE e utilizzati nel presente progetto, oltre che ai contenuti principali dei documenti dell'Autorità di bacino del fiume Po.

Nel capitolo 3, invece, vengono descritte le analisi idrauliche svolte dagli scriventi, basate su di un modello idraulico bidimensionale dell'intero corso del fiume Panaro a valle della cassa di espansione di Sant'Anna, implementato nell'ambito del presente progetto.

## **2. CARATTERISTICHE IDROLOGICO-IDRAULICHE DEL FIUME PANARO DESUNTE DA STUDI PREGRESSI**

### **2.1 PREMESSA**

Il sistema fluviale del F. Panaro è complesso e risulta costituito principalmente da tre unità:

- 1) il bacino idrografico di monte;
- 2) la cassa di espansione in località Sant'Anna;
- 3) l'asta di valle, dalla cassa fino al Po.

Il bacino idrografico di monte del fiume Panaro, chiuso alla traversa fluviale in ingresso alla cassa di espansione posta in località Sant'Anna subito a valle del ponte dell'autostrada A1 per un'estensione totale di 880 kmq.

Il fiume Panaro ha origine dalla confluenza del torrente Scoltenna e del torrente Leo che scendono rispettivamente dalle valli di Fiumalbo-Pievepelago e di Fanano.

Il bacino idrografico include la fascia di crinale dell'Appennino Tosco-Emiliano caratterizzata da notevoli precipitazioni stagionali e la vetta del Monte Cimone (2165 m s.m.) nelle cui zone di versante si possono avere anche forti pendenze del terreno e zone del bacino pedecollinari con pendenze modeste e minori precipitazioni.

La cassa di espansione è situata in località Sant'Anna a San Cesario sul Panaro ed è costituita da un manufatto principale in calcestruzzo che funge da sbarramento del corso d'acqua, un corpo di arginature maestre che sottende un invaso in linea ed uno sfioratore laterale interno all'invaso in linea che regola il deflusso verso un invaso sussidiario fuori linea. L'invaso fuori linea è interno alle arginature maestre dell'invaso in linea, ma risulta protetto da un argine interno secondario sormontabile.

Il manufatto regolatore principale è dotato di 5 scarichi di fondo principali munite di paratoie regolabili e 4 scarichi di fondo laterali di servizio. Tale manufatto è sormontabile e presenta una quota di sfioro tale da non provocare la crisi dell'opera per gli eventi di piena rari.

L'invaso sussidiario fuori linea è stato ideato per attivarsi poco prima che si raggiunga la quota di sfioro del manufatto regolatore principale in modo da incrementare il volume di laminazione della cassa di espansione.

L'asta fluviale a valle della cassa di espansione è sottesa da un corpo arginale continuo in destra e sinistra idraulica che accompagnano il corso d'acqua lungo tutto il suo sviluppo di circa 68 km fino alla confluenza con il fiume Po.

Lungo il corso fluviale, il fiume Panaro riceve in sinistra idraulica le acque di due affluenti: il torrente Tiepido in località Fossalta ed il Naviglio a Bomporto.

Come già affermato in precedenza, il tratto oggetto del presente progetto appartiene solo alla terza unità, esteso fino al confine tra le province di Modena e Ferrara.

In tale tratto il sistema arginale maestro del fiume Panaro si sviluppa con continuità su entrambe le sponde poco a valle della cassa di espansione. In particolare, in destra idraulica ha origine circa 350 m a valle del manufatto moderatore, dopo l'immissione del diversivo Muzza, mentre in sinistra ha origine alla confluenza del torrente Tiepido, risalendo lungo di esso fino al ponte della via Emilia in località Fossalta di Modena.

Tra la cassa di espansione e la confluenza del torrente Tiepido vi è pertanto un'area "polmone" di espansione delle piene, delimitata in parte da scarpate naturali, in parte da rilevati stradali, in parte da rilevati arginali "secondari". Gli argini maestri si sviluppano poi con continuità giungendo fino al Po, ove si raccordano con le sue arginature maestre.

All'interno degli argini maestri il fiume Panaro è sostanzialmente privo di significative aree golenali, se si eccettuano i primi 8 e gli ultimi 5 chilometri di asta arginata.

## 2.2 EVENTI DI PIENA RECENTI ED ANALISI DELLE PORTATE DI RIFERIMENTO

Quanto di seguito riportato è stato ricavato dal documento *"Area a rischio significativo di alluvione - ARS Distrettuali – Scheda monografica Fiume Panaro dalla cassa di espansione alla confluenza in Po"*.

Gli eventi alluvionali storici di riferimento per l'asta del fiume Panaro sono quelli verificatisi nel 1940 e del 1973. In occasione di quest'ultimo si verificarono 5 rotte arginali con tracimazioni estese complessivamente lungo 8,35 km di cui 4,60 in destra e 3,75 in sinistra, con l'allagamento di estese porzioni della pianura retrostante, tra cui i centri abitati di Bastiglia e Bomporto e il quartiere di Modena Est. L'evento del 1973 fu anche quello in cui fu stimata la massima portata al colmo in prossimità della via Emilia, con valore di circa 1400 m<sup>3</sup>/s a Spilamberto.

A seguito di tali eventi venne realizzata la cassa di espansione, in funzione dal 1982, più volte modificata con ampliamento dei volumi di invaso grazie sia all'ampliamento della superficie che all'innalzamento della quota di sfioro superficiale del manufatto moderatore, tanto che nelle ultime principali piene occorse dal 2008 ad oggi, che hanno messo a dura prova il sistema arginale di valle, non si è mai completamente invasata, mostrando anzi ancora un

buon margine di volume di invaso.

Storicamente, gli argini del Panaro, nel tempo ed in seguito agli eventi di piena più rilevanti, sono stati progressivamente rialzati e ringrossati, fino a diventare delle vere e proprie dighe in terra pensili sul piano di campagna, di altezza massima anche di 10 metri e ad oggi non più significativamente adeguabili in quota per raggiunte condizioni limite strutturali. Oltre al rischio di tracimazione, essi sono quindi soggetti ad altre due tipologie di rischio: il rischio di sifonamento e sfiancamento e il rischio di erosione (in molti tratti, sono praticamente in frodo).

Proprio recentemente nel corso dell'evento di piena del 17-19 gennaio 2014, si sono verificati segnali di fragilità (ad es. filtrazioni) che, in assenza di un pronto intervento, avrebbero potuto causare rotte arginali.

Per tali ragioni le proposte di adeguamento del sistema difensivo contenute nel PAI, prevedono soltanto limitati adeguamenti delle quote arginali e puntano sul miglioramento della capacità di deflusso dell'alveo arginato e sul miglioramento della stabilità e resistenza strutturale del sistema arginale maestro.

Le portate di piena di riferimento sono indicate nella tabella 31 dell'apposita Direttiva del PAI, riportata nella Tabella 1.

**Tabella 1 – Portate di piena di riferimento del F. Panaro indicate nel PAI**

Tabella 31: portate di piena per i corsi d'acqua principali del bacino del Panaro (Panaro, Tiepido)										
Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km²	Q20 m³/s	Q100 m³/s	Q200 m³/s	Q500 m³/s	Idrometro Denominazione
		Progr. (km)	Cod.	Denomin.						
Panaro	Panaro	84.029	175	Marano sul P.	696	960	1180	1380	1550	
Panaro	Panaro	104.273	136	San Cesario	759	1030	1270	1480	1660	
Panaro	Panaro	113.283	117	Saliceto P.	1043	780	880	940	-	
Panaro	Panaro	174.940	3	Confl. in Po	1070	780	880	940	-	
Panaro	Tiepido	12.643	31	Gorzano	44	100	155	175	210	
Panaro	Tiepido	25.965	11	San Damaso	67	120	180	200	240	

A valle della cassa di espansione di Sant'Anna, nel PAI è indicato un valore di portata al colmo di riferimento valido per tutto il tratto arginato. Tale valore, assunto pari a 940 m³/s, è un valore obiettivo, relativo all'assetto di progetto del corso d'acqua definito nel Piano, sostenibile solo in condizioni di buona manutenzione. Tale valore necessita oggi di attenta verifica, poiché l'attuale capacità del tratto arginato, fortemente condizionata dallo stato di manutenzione della vegetazione dell'alveo e dalla sedimentazione sui piani golenali, risulta

complessivamente inferiore.

### 2.3 ANALISI DELLE MAPPE DI PERICOLOSITÀ E DIAGNOSI DI CRITICITÀ

Quanto di seguito riportato è stato ricavato dal documento *“Area a rischio significativo di alluvione - ARS Distrettuali – Scheda monografica Fiume Panaro dalla cassa di espansione alla confluenza in Po”*.

La mappatura delle aree inondabili è stata effettuata tenendo conto degli eventi di piena storici, delle risultanze dei più recenti studi e delle conoscenze locali fornite dal Servizio Tecnico di Bacino della Regione Emilia Romagna e dall'AIPO.

In linea generale, per lo scenario di piena di elevata e media probabilità, il limite delle aree inondabili è delimitato in corrispondenza del tracciato delle opere arginali esistenti e degli altri elementi di contenimento che costituiscono il sistema difensivo, mentre per lo scenario di piena di scarsa probabilità o di evento estremo, la delimitazione contiene nel suo perimetro tutte le aree allagate nel corso delle rotte storiche.

Più in particolare, il sistema difensivo è composto come segue.

In sinistra idraulica:

- dal sistema delle arginature perimetrali della cassa di espansione e dai suoi manufatti di regolazione,
- dal sistema di rilevati arginali secondari compreso tra la cassa e il Tiepido,
- dal rilevato arginale del torrente Tiepido nel tratto a valle del ponte della via Emilia in località Fossalta, che costituisce argine di rigurgito del Panaro,
- dall'argine maestro sinistro del Panaro che si estende con continuità fino alla confluenza in Po,
- dai manufatti idraulici che regolano l'ingresso in Panaro delle acque dei canali del reticolo secondario naturale e artificiale di pianura.

In destra idraulica:

- dal sistema delle arginature perimetrali della cassa di espansione e dai suoi manufatti di regolazione,
- dall'argine maestro destro del Panaro, che si origina a valle dell'immissione del Diversivo Muzza circa 350 metri a valle del manufatto moderatore della cassa e si estende con continuità fino alla confluenza in Po,
- dai manufatti idraulici che regolano l'ingresso in Panaro delle acque dei canali del reticolo



secondario naturale e artificiale di pianura.

Il limite delle aree inondabili per gli scenari di piena di elevata e media probabilità coincide con i rilevati arginali che costituiscono tale sistema e con il limite morfologico di contenimento dei livelli di piena nei brevi tratti privi di rilevati arginali.

In base alle valutazioni a supporto del PAI, tale sistema è adeguato, in quota, rispetto allo scenario di piena di media probabilità, salvo alcuni brevi tratti, in particolare nei pressi di Bondeno. Il sistema risulta invece critico rispetto alla stabilità e resistenza strutturale, per la presenza, in tratti significativi, di froldi, lenti sabbiose sulla fondazione dei rilevati, sagome arginali insufficienti. In relazione a tali inadeguatezze, non sono ancora stati realizzati tutti gli interventi di adeguamento, pertanto permangono attualmente condizioni di criticità, da gestire, in caso di evento, mediante provvedimenti di protezione civile.

Va inoltre tenuto in adeguata considerazione il fatto che l'idoneità in quota del sistema arginale è connessa, nel PAI, a condizioni di buona manutenzione, nelle quali il tratto arginato, è ritenuto adeguato al transito della portata al colmo di  $940 \text{ m}^3/\text{s}$ . Poiché tale valore necessita oggi di attenta verifica, essendo l'attuale capacità del tratto arginato fortemente condizionata dallo stato di manutenzione della vegetazione dell'alveo e dalla sedimentazione sui piani golenali, la possibilità di controllare la portata massima rilasciabile dalla cassa di espansione del Panaro mediante la regolazione con paratoie mobili delle luci di fondo del manufatto moderatore, garantisce notevole flessibilità gestionale rispetto a tale situazione. A tal fine è necessario tuttavia completare le verifiche in corso per definire l'attuale capacità di deflusso del tratto arginato e quindi la portata compatibile a valle della cassa e, di conseguenza, i criteri di regolazione delle luci di fondo del manufatto moderatore, per la laminazione più efficace delle piene di media probabilità.

A completamento del quadro, si evidenzia l'insufficiente protezione idraulica della città di Modena rispetto al reticolo secondario scolante in Panaro. Il canale Naviglio di Modena, che raccoglie le acque di drenaggio urbano di buona parte della città di Modena e le recapita al Panaro in sinistra idraulica presso Bomporto, è dotato di un sistema arginale alquanto inferiore in quota e pertanto è regolato alla confluenza da porte vinciane che, in caso di alti livelli di Panaro, evitano la risalita delle sue acque nel canale Naviglio, impedendo però allo stesso di scaricare. Non vi sono infatti, né sono in progetto, sistemi alternativi di scarico per pompaggio. E' invece prevista la realizzazione di una cassa di espansione del canale Naviglio nell'area compresa tra il cavo Minutara e il cavo Argine in località Prati di San Clemente.



La possibilità di regolare le luci di fondo del manufatto moderatore della cassa di espansione del Panaro mediante paratoie mobili, garantisce notevole flessibilità gestionale sia rispetto alle condizioni di piena del Tiepido, sia rispetto all'immissione del Naviglio di Modena, sia anche in relazione all'eventuale concomitanza di condizioni critiche del reticolo secondario compreso tra il Secchia e il Panaro a valle di Modena. Tuttavia manca, ad oggi, un protocollo di gestione di tali organi mobili. La questione, ai sensi della normativa vigente dovrà essere esaminata nel Piano di laminazione di competenza regionale.

In relazione all'evento estremo, lo scenario di riferimento è quello che considera la possibile rottura dei rilevati arginali, con o senza tracimazione e il limite delle aree inondabili per tale scenario comprende un'area molto ampia, di circa 1250 km<sup>2</sup>, e include anche tutte le aree allagate nelle rotte storiche.

## 2.4 ANALISI IDROLOGICO-IDRAULICHE SVOLTE DA UNIMORE

Lo studio condotto dall'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia (UNIMORE) svolto nell'ambito della *“ricerca per lo studio delle interazioni tra grandi opere di sbarramento fluviale, correnti idriche superficiali e sotterranee, con riferimento ai manufatti regolatori ed alle arginature di contenimento: sviluppo di modelli matematici di comportamento della cassa di espansione del fiume Panaro nel Comune di San Cesario sul Panaro (MO), del bacino idrografico di monte e del sistema fluviale di valle (MO-E-1255) (O.P.C.M. 3850/2010 – decreto n. 140/2010 “Piano degli interventi urgenti” della Regione Emilia-Romagna)”,* descritto nella *“Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro”* (2016), si è occupato delle tre suddette unità di cui si compone il sistema fluviale del Panaro: 1) bacino idrografico di monte, 2) cassa di espansione di Sant'Anna, e 3) asta fluviale di valle per la propagazione dell'onda di piena.

La prima fase di analisi ha riguardato la definizione della forzante idrologica e la predisposizione del modello idrologico relativo al bacino idrografico di monte, finalizzato a definire gli idrogrammi di piena con cui verificare il funzionamento idraulico del sistema costituito dalla cassa di espansione e dall'asta fluviale di valle.

Gli idrogrammi ottenuti dall'analisi idrologica del bacino di monte, sono stati propagati all'interno della cassa di espansione di Sant'Anna in modo da descriverne il funzionamento a seguito della sollecitazione con diverse forzanti e di definire i rispettivi idrogrammi rilasciati nel tratto fluviale di valle. Per ciascuno degli idrogrammi in uscita dalla cassa è stata

effettuata la propagazione lungo l'asta fluviale di valle in modo da ottenere per ogni sezione considerata l'andamento del livello idrico. La seconda fase dello studio è consistita nell'analisi della sicurezza idraulica della cassa di espansione e dell'asta fluviale di valle considerando sia lo stato attuale di rischio che gli effetti prodotti da una regolazione attiva della cassa di espansione al fine di mitigare il rischio idraulico del sistema fluviale e sfruttare tutte le potenzialità della cassa di espansione. Il funzionamento della cassa di espansione è stato studiato in modo da garantire sempre la sicurezza e l'integrità dell'opera in termini di franco di sicurezza per qualsiasi evento considerato secondo quanto stabilito dalla normativa vigente. Sono state definite portate critiche massime compatibili con l'asta di valle che sono rilasciabili in uscita dal manufatto di sbarramento ed in base ad esse è stata condotta un'analisi di fallanza della cassa di espansione.

In tale fase sono state anche definiti i valori delle portate associate al periodo di ritorno di 50, 100 e 200 anni nel caso in cui si attui una regolazione attiva ottimale delle paratoie nel corso dell'evento di piena. La terza fase dello studio ha considerato la modellazione della filtrazione all'interno del corpo arginale dell'asta fluviale di valle al fine di verificare le condizioni di sicurezza dell'argine in seguito alla propagazione dell'onda di piena. Tale studio ha considerato un livello di piena variabile (condizioni di moto vario) secondo quanto simulato dai codici di calcolo per la propagazione dell'onda di piena lungo l'asta fluviale.

Rimandando alla relazione A.2 – *“Analisi multicriteria delle soluzioni alternative”*, allegata al progetto di fattibilità tecnico-economica redatto nel mese di marzo 2017, le ulteriori analisi condotte dagli scriventi in merito al funzionamento della cassa di espansione di Sant'Anna, di seguito si riportano gli idrogrammi di piena e le relative portate al colmo, definite nello studio suddetto, che, in accordo con quanto definito da AIPO nel disciplinare di gara del presente progetto, sono state utilizzate dagli scriventi come portate di riferimento per le analisi idrauliche del fiume Panaro nel tratto a valle della cassa di espansione di Sant'Anna, oggetto del presente progetto. Per maggiori dettagli si rimanda ai contenuti della relazione dello studio svolta da UNIMORE.

#### **2.4.1 Sintesi dei risultati delle analisi svolte da UNIMORE**

L'UNIMORE ha effettuato la stima delle portate massime che devono essere smaltite dall'asta fluviale di valle con il controllo stazionario e non stazionario degli organi di scarico della cassa di espansione di Sant'Anna, tali per cui il sistema soddisfi un periodo di ritorno di

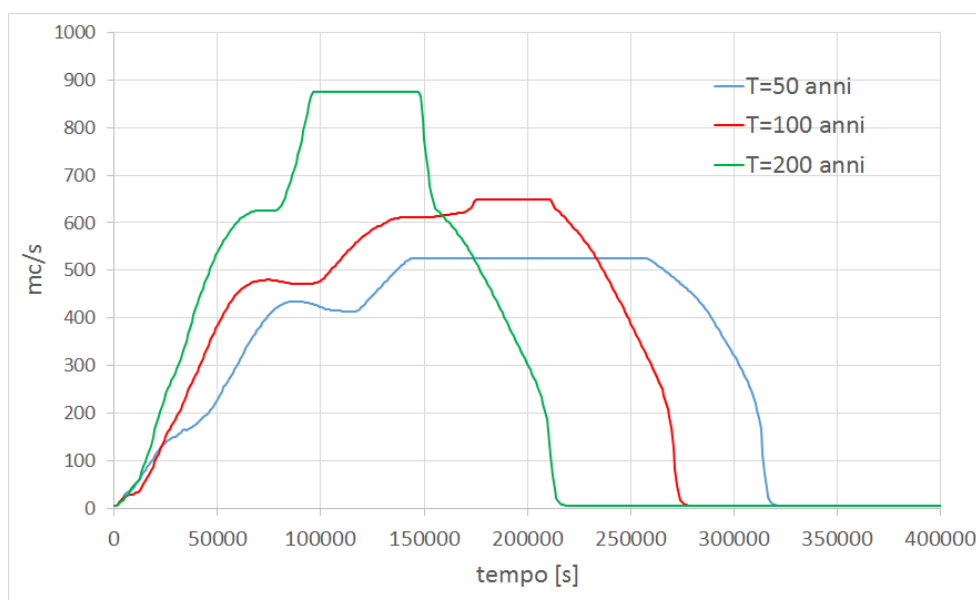
50, 90, 100, e 200 anni. I valori di portata al colmo calcolati costituiscono la portata di riferimento a cui adeguare l'asta fluviale di valle per garantire condizioni di sicurezza idraulica ad un determinato periodo di ritorno.

I risultati ottenuti da UNIMORE, espressi in termini di portate al colmo per diversi valori del tempo di ritorno, sono riassunti nella successiva Tabella 2, mentre nella successiva Figura 1 sono riportati gli idrogrammi di piena in uscita dalla cassa di laminazione di Sant'Anna, nella configurazione a controllo non stazionario. Tali idrogrammi sono stati utilizzati nell'ambito delle analisi idrauliche svolte dagli scriventi e descritte nel successivo capitolo 3 per dimensionare le opere di adeguamento arginale.

**Tabella 2 – Sintesi dei risultati dello studio UNIMORE**

*Tabella 8. Portata massima rilasciata dalla cassa di espansione di Sant'Anna nell'asta fluviale di valle per assicurare il rispetto di un dato periodo di ritorno del sistema con un controllo stazionario e non stazionario delle paratoie. È stata considerata la configurazione con 5 scarichi di fondo operativi.*

Periodo di ritorno, $T$ (a)	Portata massima gestibile dal sistema fluviale ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	
	Controllo stazionario	Controllo non stazionario
50	675	525
90	875	600
100	900	650
200	1100	875



**Figura 1 – Portate di piena in uscita dalla cassa di espansione di Sant'Anna calcolate da UNIMORE**

Dall'analisi dei risultati riportati in Tabella 2 si può osservare che il rischio di eventuale non

operatività del controllo non stazionario della cassa di espansione di Sant'Anna è tutt'altro che trascurabile in termini di tempo di ritorno di riferimento delle portate che possono proseguire a valle della stessa verso il tratto arginato; infatti, la mancata operatività del controllo non stazionario equivale al rischio di incrementare il tempo di ritorno da 50 a 100 anni o da 100 a 200 anni.

Si osserva, inoltre, che la portata di piena definita nel PAI, pari a  $940 \text{ m}^3/\text{s}$ , risulta essere compresa tra i valori definiti da UNIMORE per il medesimo valore del tempo di ritorno (200 anni), a seconda della modalità di controllo dell'organo di scarico della cassa.

Attraverso la modellazione idraulica monodimensionale, UNIMORE ha ottenuto i seguenti risultati, di seguito sinteticamente elencati:

- la portata smaltibile dall'asta fluviale a valle della cassa di espansione di Sant'Anna è pari a  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  a meno di tre criticità in sinistra idraulica in prossimità della via Emilia e della confluenza del Tiepido nel Panaro;
- i livelli idrici critici si raggiungono nelle sezioni di monte, per stanti inferiori a 180 (sia in destra che sinistra);
- con la portata di  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  non è soddisfatto il franco di sicurezza minimo di 1 m per molte sezioni nel tratto di monte dell'asta fluviale compreso tra la cassa di espansione di Sant'Anna e l'abitato di Camposanto;
- i livelli di piena raggiunti con le altre portate soglia di regolazione con controllo non stazionario sono maggiori e comportano un incremento del numero di sezioni e della lunghezza dell'alveo interessati da fenomeni di insufficienza per superamento della quota massima del rilevato arginale;
- il profilo di piena definito nel PAI, corrispondente alla portata di piena duecentennale di  $940 \text{ m}^3/\text{s}$ , è inferiore rispetto ai profili determinati con il modello implementato dalla stessa Università considerando valori di portata al colmo in uscita dalla cassa pari a 450, 500, 600 e  $650 \text{ m}^3/\text{s}$  (quest'ultimo valore è caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 100 anni senza regolazione ottimale della casse). Tali differenze sono imputabili sia al differente grado di dettaglio delle sezioni con cui sono stati implementati i modelli, sia in relazione al processo di taratura. Il modello dell'Università è stato tarato in base ai livelli misurati durante la piena del 2009, tenendo quindi conto della fitta presenza all'interno dell'alveo di vegetazione arbustiva ed arborea, che induce un rallentamento della corrente ed un innalzamento del profilo di piena;

Nello studio i meccanismi di crisi del sistema fluviale considerati da UNIMORE sono stati determinati esclusivamente dall'asta principale del fiume Panaro, per cui la confluenza del torrente Tiepido non è stata valutata come fonte di criticità idraulica. Tale scelta è stata motivata dal fatto che i bacini idrografici del fiume Panaro e del torrente Tiepido hanno caratteristiche geomorfologiche differenti per cui il tempo di corrivazione del bacino del Panaro risulta di circa tre volte superiore a quello del Tiepido. La contemporanea e sinergica composizione delle due piene fluviali risulta possibile, ma con bassa probabilità per cui si è proceduto all'analisi delle sole criticità date dalla forzante del fiume Panaro.

Nello studio citato si afferma che *“nel caso in cui il contributo del torrente Tiepido non si ritenga trascurabile, per mantenere il rischio idraulico del sistema fluviale coerente con quanto presentato nel presente studio, per la cassa di espansione di Sant'Anna sarà necessario fare riferimento a portate soglia minori”*. Nella relazione A.2 – *“Analisi multicriteria delle soluzioni alternative”*, allegata al presente progetto di fattibilità tecnico-economica, sono state effettuate dagli scriventi delle analisi preliminari relative a:

- stima degli idrogrammi di piena del T. Tiepido,
- verifica dell'eventuale concomitanza tra i picchi di piena del F. Panaro e del T. Tiepido,
- effetti della regolazione in tempo reale delle paratoie dello sbarramento della cassa di Sant'Anna, per tener conto della possibile concomitanza delle piene del T. Tiepido in modo da garantire i medesimi valori di portata sopra definiti a valle della confluenza del Tiepido.

## 2.5 SITUAZIONI DI CRITICITÀ DEL SISTEMA ARGINALE

In generale, il F. Panaro presenta le seguenti situazioni di criticità, che comportano potenziali rischi d'instabilità arginale:

- fenomeni di erosione spondale in corrispondenza degli argini in froldo per assenza di difese di sponda o scalzamento di quelle esistenti. Tale criticità non si verifica solo durante gli eventi di piena per effetto delle azioni di trascinamento della corrente, ma anche in condizioni di magra, a causa della formazione di risorgive lungo la sponda che si formano a causa dell'elevato gradiente idraulico tra la falda esterna alle arginature e il livello idrico di magra dell'alveo;
- inadeguatezza della sagoma degli argini, con la linea di saturazione che durante gli eventi di piena non viene contenuta nel paramento esterno dell'argine, con conseguenti fenomeni

di sifonamento e formazione di fontanazzi;

- inadeguatezza della quota di coronamento delle arginature (rischio di tracimazione dell'argine) che per estesi tratti, soprattutto in sinistra idraulica, non sono in grado di contenere con adeguati franchi di sicurezza la portata di piena. Ciò avviene in particolare tra la cassa e la confluenza con il T. Tiepido e tra Bomporto e Camposanto. La distribuzione dei franchi arginali è disomogenea, ci sono tratti con franchi adeguati e tratti con franchi inferiori al metro, che quindi dovranno essere interessati prioritariamente dalla realizzazione di interventi di sovrалzo arginale;
- l'alveo presenta dei tratti con andamento rettilineo (in seguito ad interventi antropici effettuati in passato) che intersecano diversi paleoalvei: in tali tratti il terreno di fondazione degli argini è in parte costituito da lenti di sabbia che favoriscono i moti di filtrazione e aumentano il rischio di sifonamento.

### **3. ANALISI IDRAULICHE DEL F. PANARO MEDIANTE IMPLEMENTAZIONE DI MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE**

#### **3.1 PREMESSA**

A partire dai dati e dai rilievi disponibili e dalle analisi idrauliche già effettuate dall'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, sono stati condotti i necessari approfondimenti idraulici finalizzati a definire le criticità idrauliche del fiume Panaro e definire le caratteristiche degli interventi per ridurre il rischio di esondazione. In particolare, a tale scopo è stato implementato un unico modello bidimensionale a fondo fisso dell'intero tratto di fiume Panaro compreso tra la cassa di espansione di Sant'Anna e la confluenza in Po, per una lunghezza complessiva pari a circa 67 km.

Come mostrato più oltre e nelle tavole allegate al progetto, attraverso il modello bidimensionale è stato possibile descrivere in modo attendibile il comportamento idraulico del fiume e gli effetti delle curve e delle anse del corso d'acqua sul livello idrico di piena in corrispondenza delle arginature.

#### **3.2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO**

##### **3.2.1 Ipotesi di calcolo**

Sulla base dei dati topografici e delle informazioni idrologico-idrauliche disponibili per il tratto fluviale di indagine assunti come riferimento, così come riportato nei successivi paragrafi, si è proceduto all'implementazione di un modello di simulazione idraulica bidimensionale di dettaglio del fiume Panaro che, opportunamente calibrato con riferimento alle informazioni disponibili, ha permesso di analizzare ad un'opportuna scala di riferimento l'evoluzione delle dinamiche fluviali in seguito alla realizzazione delle opere in progetto.

La modellazione a fondo fisso è stata implementata 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

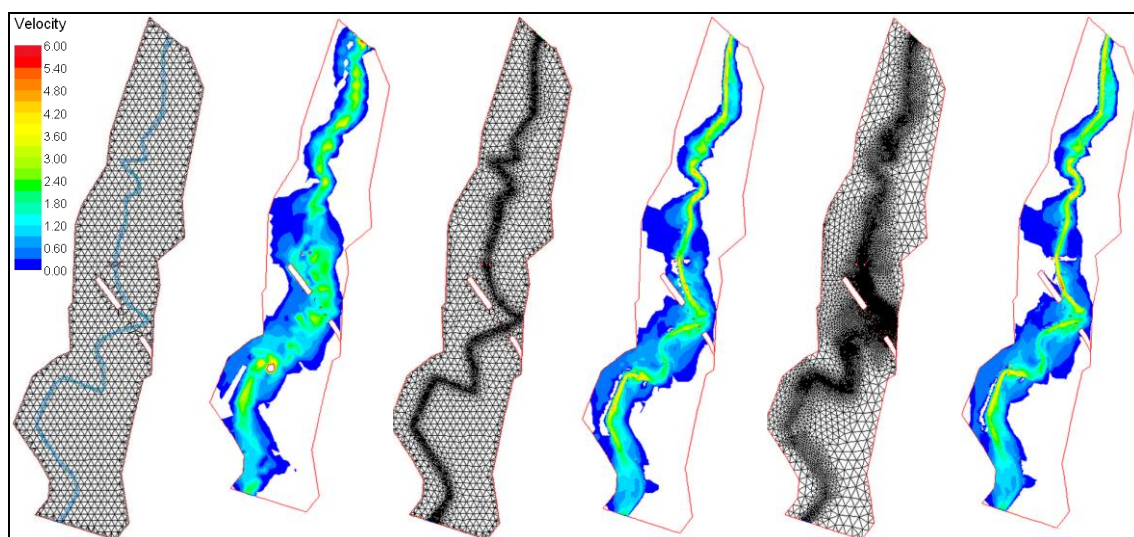


calcolo.

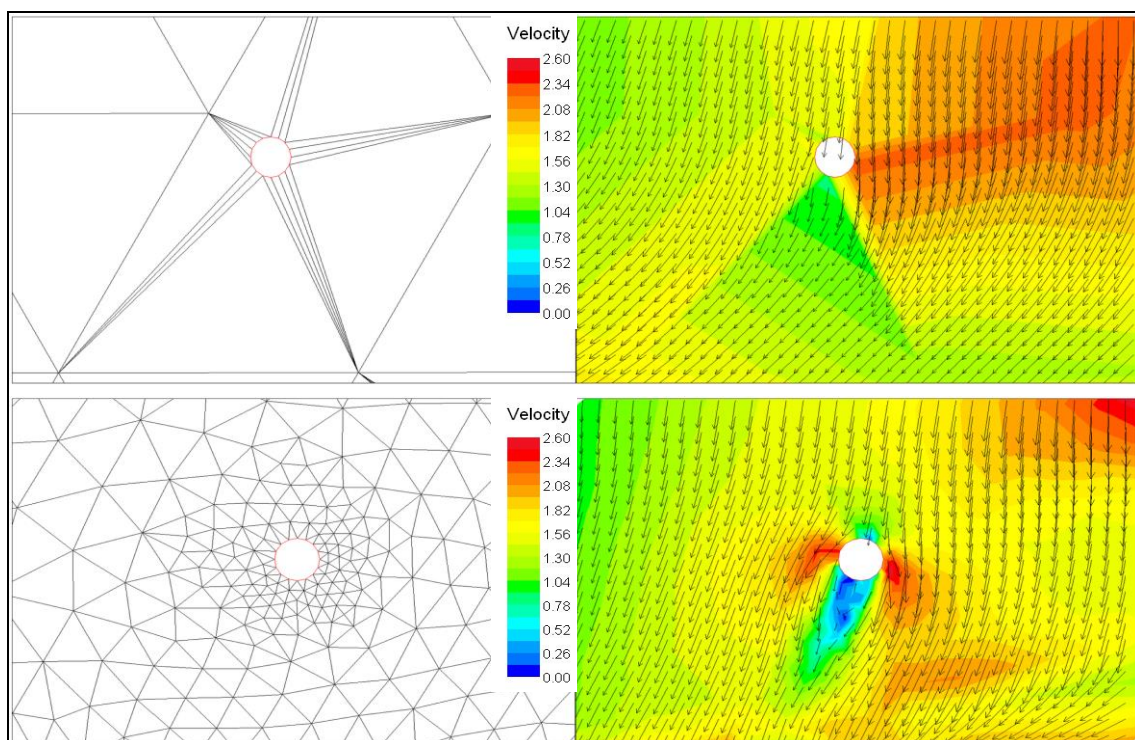
Il modello viene rappresentato attraverso una griglia di elementi triangolari. Le tre equazioni vengono risolte in ciascun nodo della maglia di calcolo; il metodo di calcolo delle suddette equazioni è sviluppato attraverso una procedura di risoluzione iterativa per la minimizzazione dello scarto della soluzione stessa.

Il modello calcola in questo modo la velocità in ogni nodo mediandola sul tirante idrico, ovvero senza tenere conto della variazione della velocità nella direzione z.

Per minimizzare i possibili errori numerici nella soluzione, a causa di scarti nel calcolo dell'equazione di conservazione di massa, è possibile infittire localmente la maglia di calcolo per limitare tali effetti di diffusione numerica e fornire risultati di maggiore dettaglio.



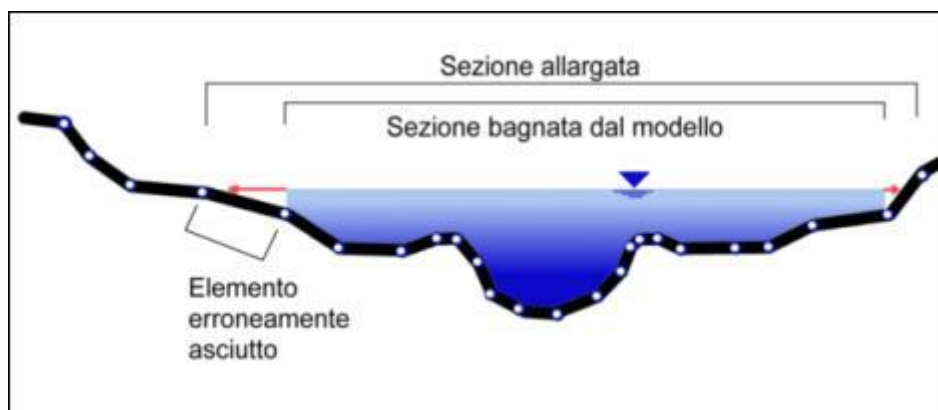
**Figura 2 – esempio di variabilità dei risultati della simulazione in funzione del grado di affinamento della maglia di calcolo per la modellazione idraulica bidimensionale (fonte: Provincia di Bergamo – Studio integrativo delle tematiche di compatibilità idraulica relative all'attraversamento della SP 91 II lotto sul F. Cherio)**



**Figura 3 – esempio di variabilità dei risultati della simulazione in funzione del grado di affinamento della maglia di calcolo per la modellazione idraulica bidimensionale in corrispondenza di opere puntuali e/o singolari**

Le equazioni di base, impiegate per simulare il moto bidimensionale indotto dalla piena di riferimento nell'area in studio, sono affette da alcune approssimazioni. Innanzitutto, le due equazioni del moto lungo le direzioni  $x$  e  $y$  si basano sull'ipotesi che la corrente sia lineare e che quindi la pressione abbia una distribuzione verticale idrostatica.

A livello geometrico la dimensione della maglia, se non sufficientemente piccola, può generare effetti di instabilità al momento in cui un elemento passa dalla condizione di completa immersione ad un parziale asciugamento. Il modello considera appartenente al campo di moto solo gli elementi in cui tutti i nodi presentano un tirante maggiore di zero.



**Figura 4 – esempio di correzione dell’output grafico della modellazione idraulica bidimensionale**

Tuttavia, un eccessivo infittimento della dimensione delle celle, specialmente in zone in cui si prevede che il deflusso delle acque possa avere caratteristiche mediamente regolari e non particolarmente complesse, è tale da generare un appesantimento del calcolo con incremento della durata della simulazione stessa senza che vengano forniti ulteriori utili dettagli.

La corretta scelta della risoluzione delle maglie di calcolo, nelle diverse porzioni costituenti il dominio della modellazione, è quindi un aspetto particolarmente delicato per poter fornire le necessarie informazioni circa la dinamica fluviale.

Un’altra importante approssimazione del modello di calcolo risiede nella formula adottata per la resistenza idraulica del fondo, che viene fatta dipendere dal quadrato del modulo della velocità e dal coefficiente di scabrezza di Manning supposto localmente noto. Se sulla prima dipendenza non ci sono particolari dubbi, dato il carattere turbolento della corrente, sulla dipendenza da un valore costante del coefficiente di Manning esistono non poche incertezze, specialmente per le profondità minori e in presenza di trasporto di materiale solido.

Il modello bidimensionale di dettaglio del fiume Panaro è stato implementato per un’estensione longitudinale lungo l’asse pari a circa 67 km, comprendente l’intera larghezza dell’alveo di piena, esteso al limite della fascia B del PAI, e coincidente con le arginature presenti e diffuse lungo praticamente l’intero tratto.

La superficie del dominio di calcolo del modello idraulico è pari a 11.3 kmq, e siccome il numero delle celle di calcolo è pari a circa 870'000, si ha che la superficie media degli elementi di calcolo è pari a circa 13 mq. In corrispondenza delle pile dei ponti le dimensioni delle celle di calcolo sono state ridotte per poter tenere in conto l’ingombro delle opere presenti in alveo.

Per meglio definire i comportamenti morfodinamici del fiume Panaro, il modello bidimensionale a fondo fisso è stato implementato con diversi scenari di portata di riferimento (idrogrammi per tempo di ritorno pari a  $T = 50$ ,  $T = 100$  e  $T = 200$  anni, riportati nel precedente paragrafo 2.4.1), oltre che con l'idrogramma relativo all'evento di piena verificatosi nel mese di dicembre del 2009, evento utilizzato per la taratura del modello.

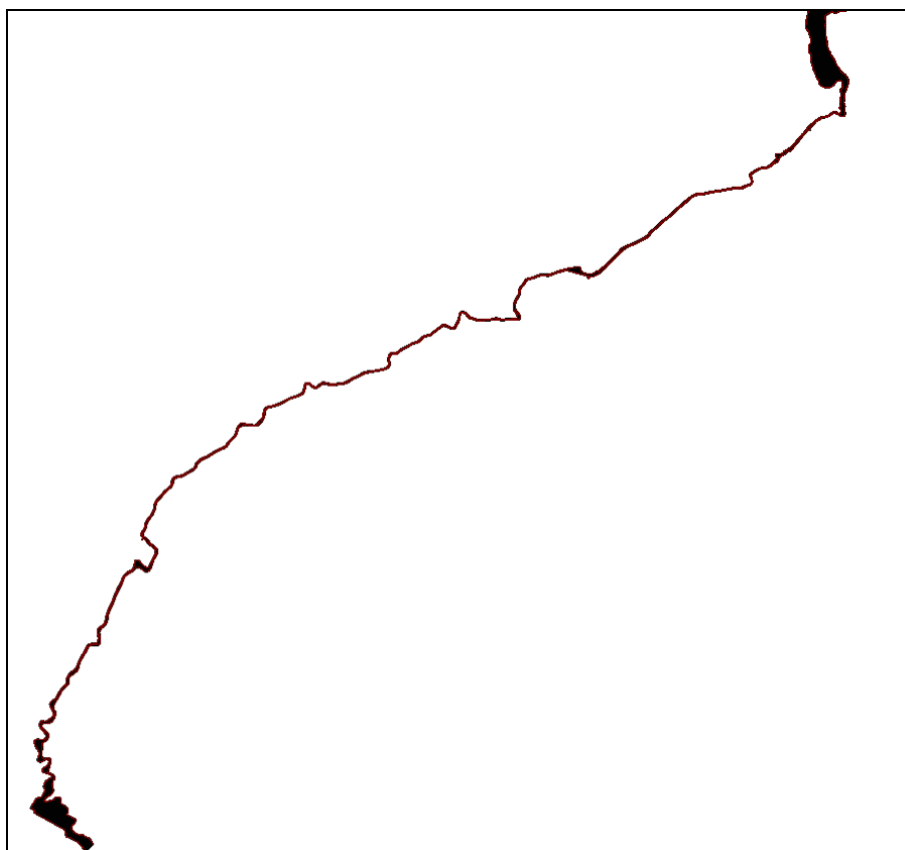
In Tabella 3 sono riportati i valori di portata al colmo in ingresso al modello (condizione al contorno di monte) e il corrispondente livello idrico di valle (condizione al contorno di valle) posto in corrispondenza della confluenza del F. Panaro nel F. Po utilizzati per l'implementazione del modello idraulico bidimensionale a fondo fisso.

Come valore del livello di valle è stato assunto il medesimo valore utilizzato nella modellazione del F. Panaro da parte di UNIMORE. Tale valore corrisponde ad una piena di Po dell'ordine di  $10'000 \text{ m}^3/\text{s}$ , che è caratterizzata da un tempo di ritorno compreso tra 20 e 50 anni.

**Tabella 3 – condizioni al contorno per l'implementazione del modello idraulico bidimensionale a fondo fisso**

evento	Portata ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Livello di valle (m s.m.)
Dicembre 2009	520	Variabile con valore massimo in corrispondenza del colmo di piena pari a 10.3
50 anni	525	15.0
100 anni	650	15.0
200 anni	875	15.0

Nella Figura 5 è riportato l'intero dominio di calcolo del modello bidimensionale del fiume Panaro.



**Figura 5 – magliatura del modello implementato del fiume Panaro**

### **3.2.2 Caratterizzazione geometrica dell'alveo oggetto della modellazione**

Le caratteristiche topografiche delle aree interessate dalla modellazione sono state dedotte sulla base delle seguenti informazioni:

- modello digitale del terreno (DTM), a maglia 1 m, effettuato con volo Lidar nel corso del mese di maggio del 2015;
- modello digitale del terreno (DTM), a maglia 1 m, effettuato con volo Lidar nel corso del mese di settembre del 2015;
- rilievo batimetrico dell'alveo di magra effettuato tra la fine del 2016 e l'inizio del 2017.

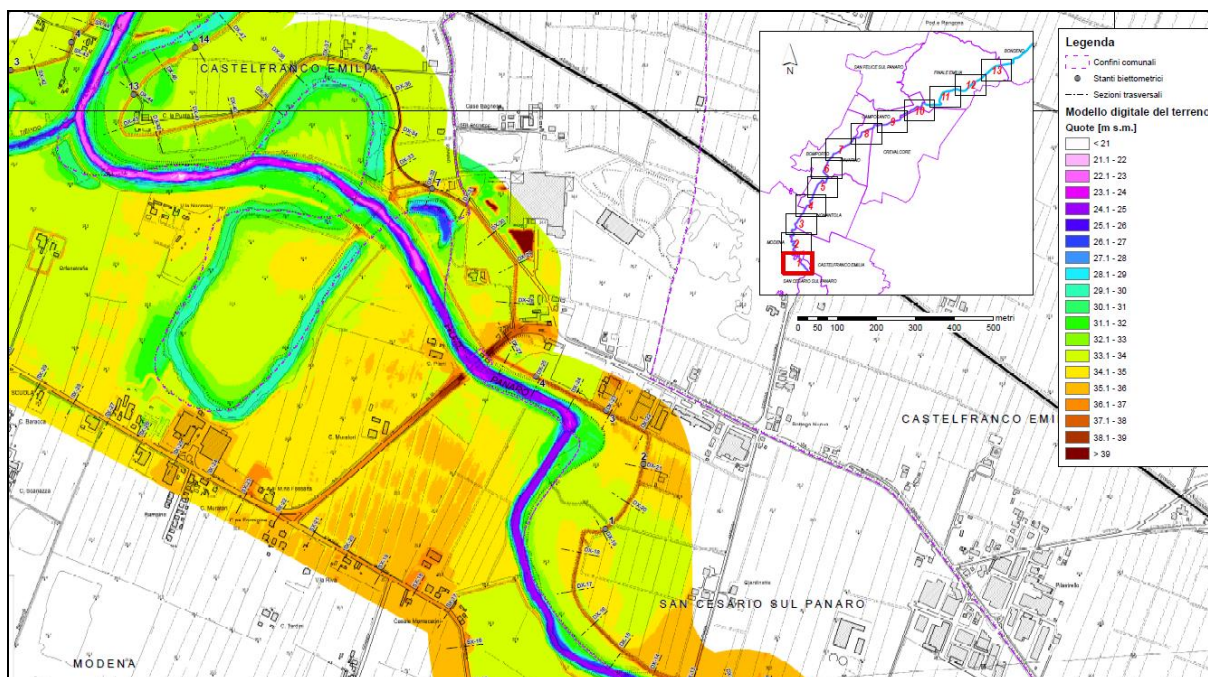
I due rilievi Lidar differiscono tra loro per i seguenti aspetti: il rilievo di maggio è stato effettuato con un livello idrico maggiore rispetto a quello di settembre e la copertura vegetazionale presente a settembre era maggiore rispetto a quella presente a maggio.

Si è proceduto a generare un nuovo D.T.M., sempre a maglia 1 m, ottenuto attraverso l'unione dei due rilievi Lidar e della batimetria del fondo alveo, attraverso un applicativo GIS che restituisce in ogni punto della maglia dei rilievi la quota più bassa; in tale modo si è ottenuto



un modello digitale del terreno caratterizzato da una ridotta presenza di copertura vegetazionale e comprensivo delle quote di fondo alveo rilevate.

Nella successiva Figura 6 è riportato uno stralcio del D.T.M. dell'alveo del Panaro, utilizzato come elemento di base con il quale definire la geometria del modello di calcolo bidimensionale.



**Figura 6 – rappresentazione grafica del DTM del F. Panaro utilizzato per implementare il modello idraulico bidimensionale.**

### 3.2.3 Taratura del modello

Ai fini della taratura del modello bidimensionale adottato, è stato utilizzato l'evento di piena verificatosi durante la fine del mese di dicembre 2009, di cui si dispone delle seguenti informazioni:

- Altezze idrometriche presso gli idrometri presenti lungo l'asta del F. Panaro, ed in particolare in corrispondenza dell'idrometro di Bomporto, di cui si dispone della scala di deflusso, che consente di dedurre l'idrogramma di piena in funzione dei livelli registrati;
- Picchettatura del livello idrico della piena, effettuato dalla società Geogrà s.r.l. per conto dell'Ufficio Operativo di AIPo di Modena;
- *“Rapporto sull'evento meteo idrogeologico e idraulico del 22 – 28 dicembre 2009”* a cura di ARPA – Servizio Idro Meteo Clima – Regione Emilia Romagna.

In particolare, le simulazioni di taratura sono state condotte considerando il valore della portata di piena relativa a tale evento e confrontando i valori dei livelli idrici calcolati dal modello con i valori misurati.

La taratura ha utilizzato, come parametri di calibratura, le scabrezze dell'alveo nelle sue diverse componenti (alveo di magra, sponda, argine) e delle zone 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.

Di seguito si riportano i dati disponibili e le valutazioni effettuate dagli scriventi per poter effettuare la taratura del modello, in particolare:

- nella Figura 7 è riportato il livello idrico registrato presso l'idrometro di Bomporto durante l'evento;
- nella Figura 8 è riportata la scala delle portate del fiume Panaro in corrispondenza dell'idrometro di Bomporto, in parte desunta dai dati pubblicati nell'annale idrologico del 2009 (per valori di tirante fino a circa 10 m) ed in parte ricavata mediante estrapolazione dei dati suddetti (per valori di tirante maggiore di 10 m);
- nella Figura 9 è riportato l'idrogramma di piena presso l'idrometro di Bomporto durante l'evento, dal quale si evince che la portata al colmo era pari a circa 500 m<sup>3</sup>/s;
- in Figura 10, invece, è riportato l'idrogramma di piena inserito come condizione al contorno di monte del modello bidimensionale (portata in uscita dalla cassa di espansione di Sant'Anna). Tale idrogramma è stato ricavato, anticipando e riscalandolo l'idrogramma ricavato a Bomporto mediante un processo iterativo, fino a quando l'idrogramma ricavato dalla simulazione a Bomporto non fosse analogo a quello ricavato dalle registrazioni; tale confronto è riportato nella successiva Figura 11). La portata al colmo in uscita dalla cassa era pari a circa 520 m<sup>3</sup>/s;
- infine, nella Figura 12 è riportato il confronto, lungo l'argine sinistro, tra i livelli misurati durante la piena e i livelli calcolati dal modello idraulico bidimensionale. Prima di effettuare il confronto sono state confrontate le quote del coronamento arginale tra i due sistemi (rilievo Geogrà e DTM posto alla base della modellazione idraulica), da cui è emersa la necessità di incrementare le letture di 20 cm in modo tale da far coincidere le quote di coronamento degli argini e uniformare i due sistemi.



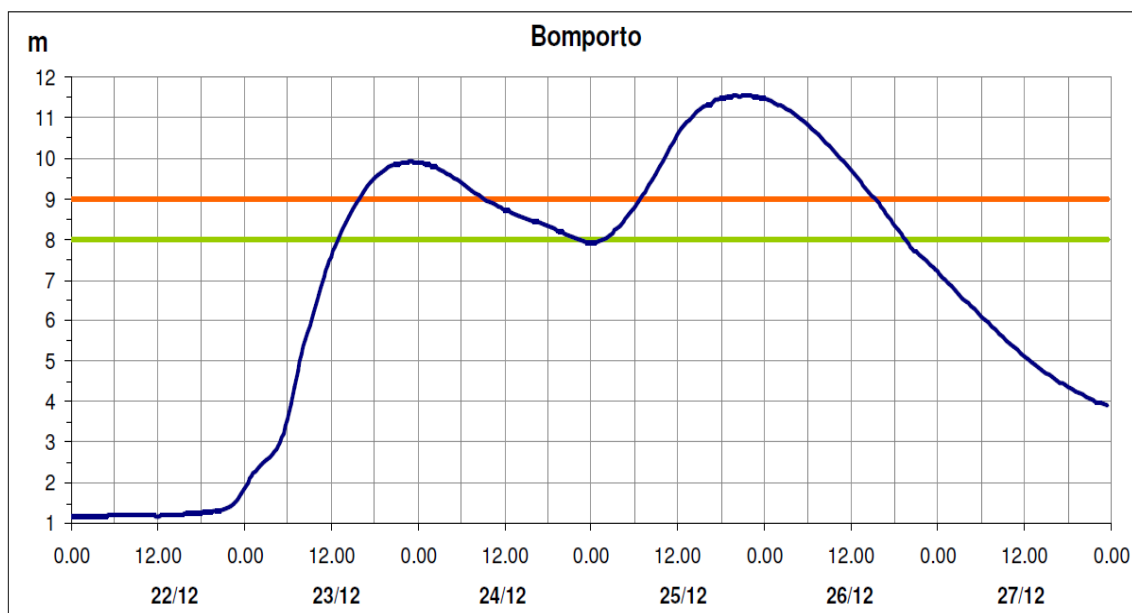


Figura 7 – livello idrico registrato a Bomporto durante l'evento del 2009.

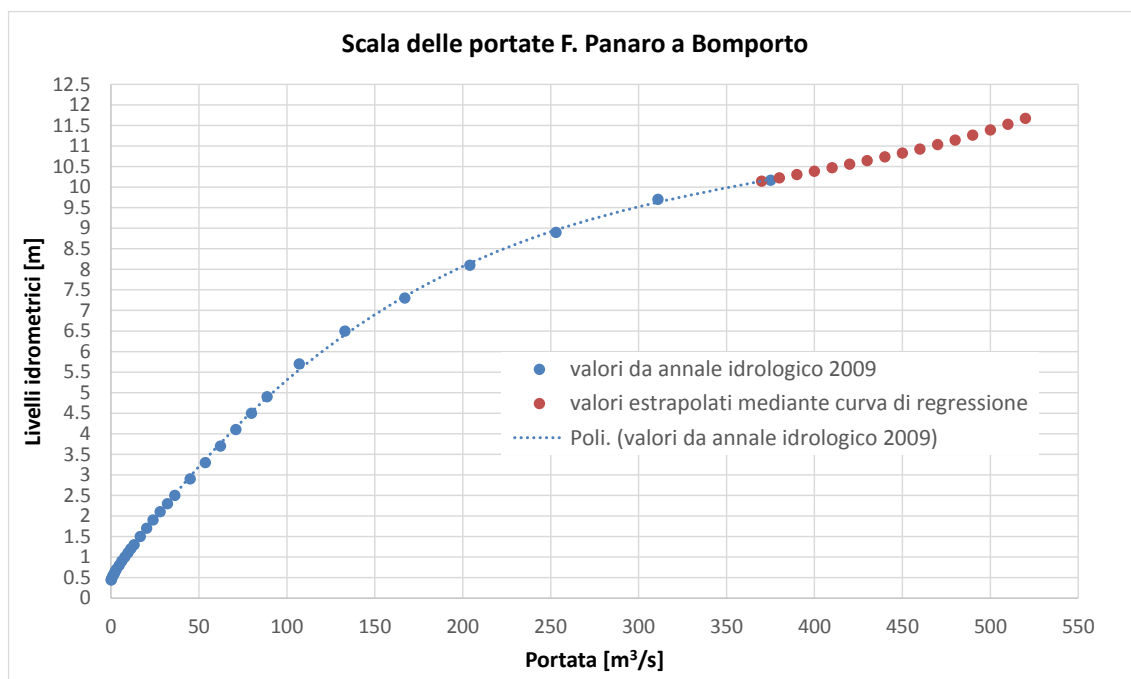
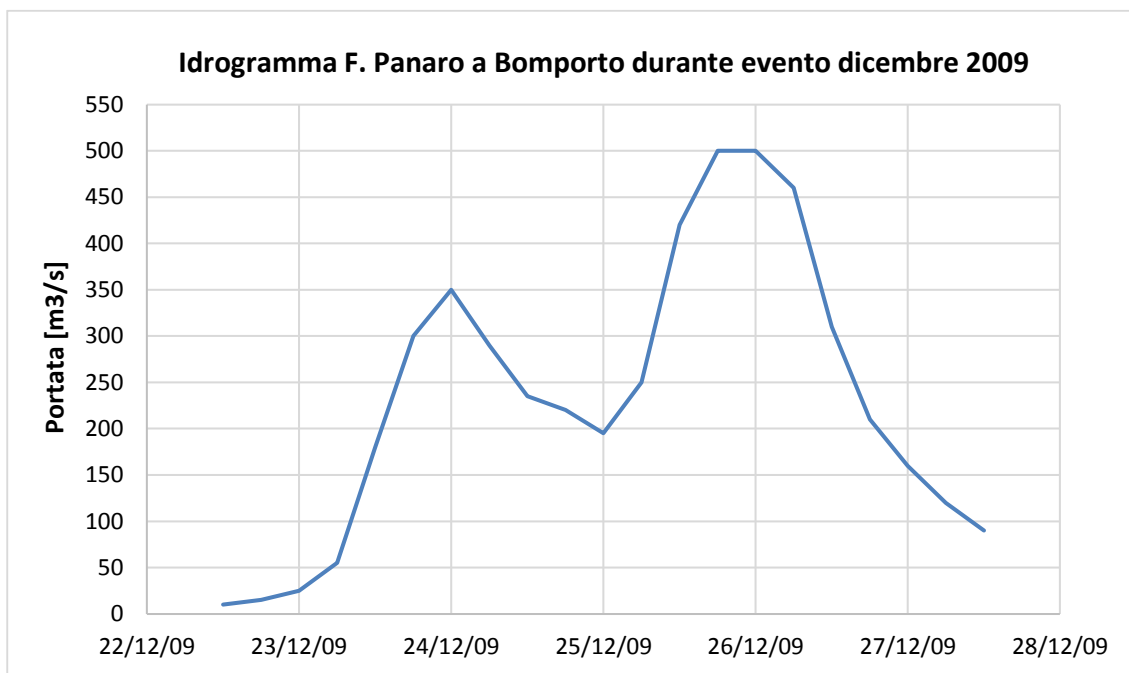
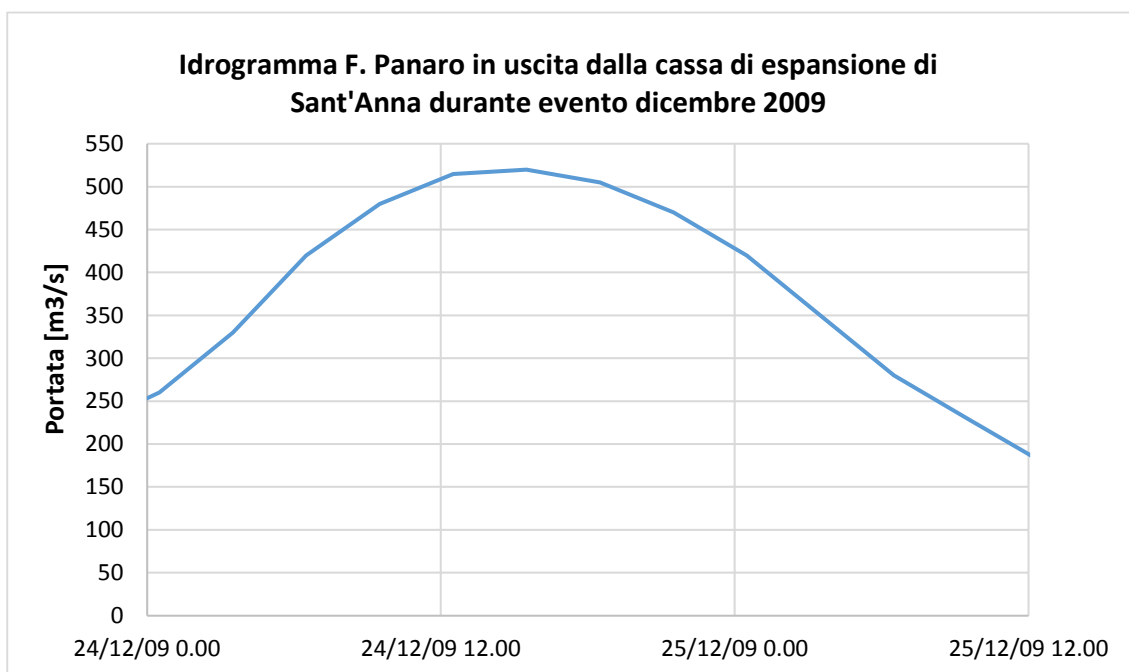


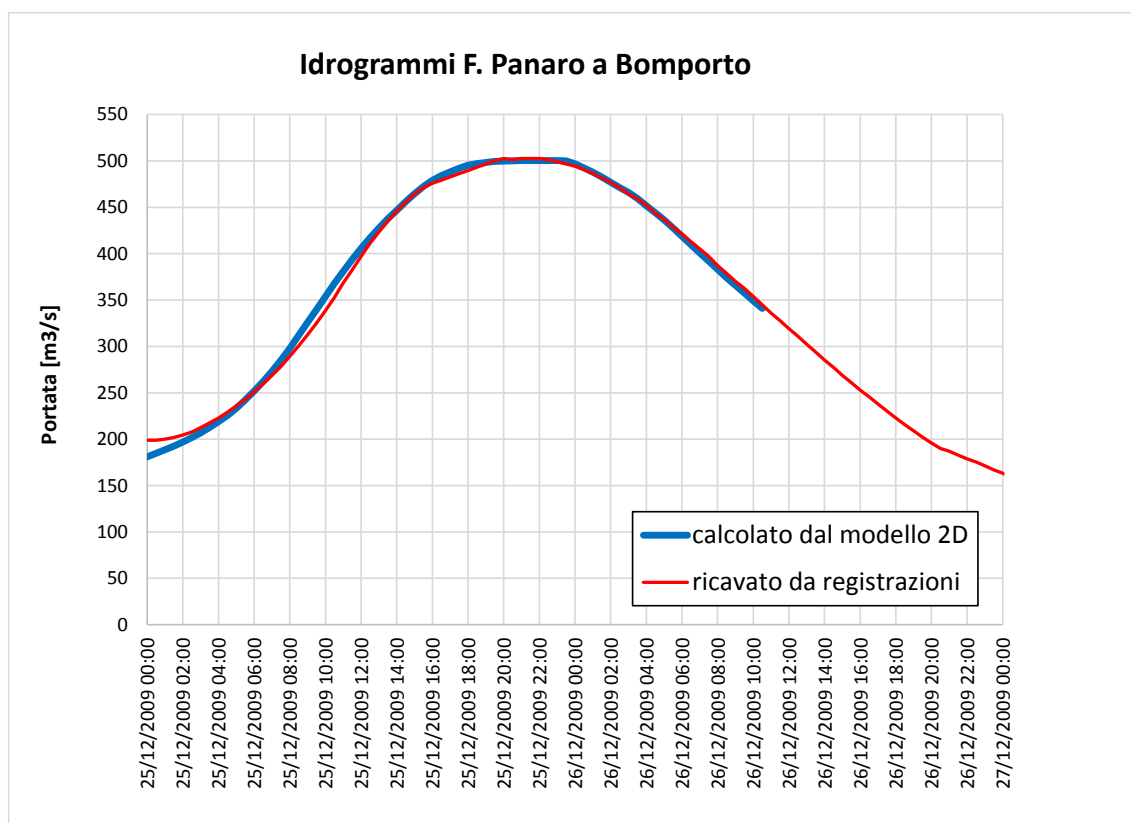
Figura 8 – Scala delle portate del fiume Panaro a Bomporto.



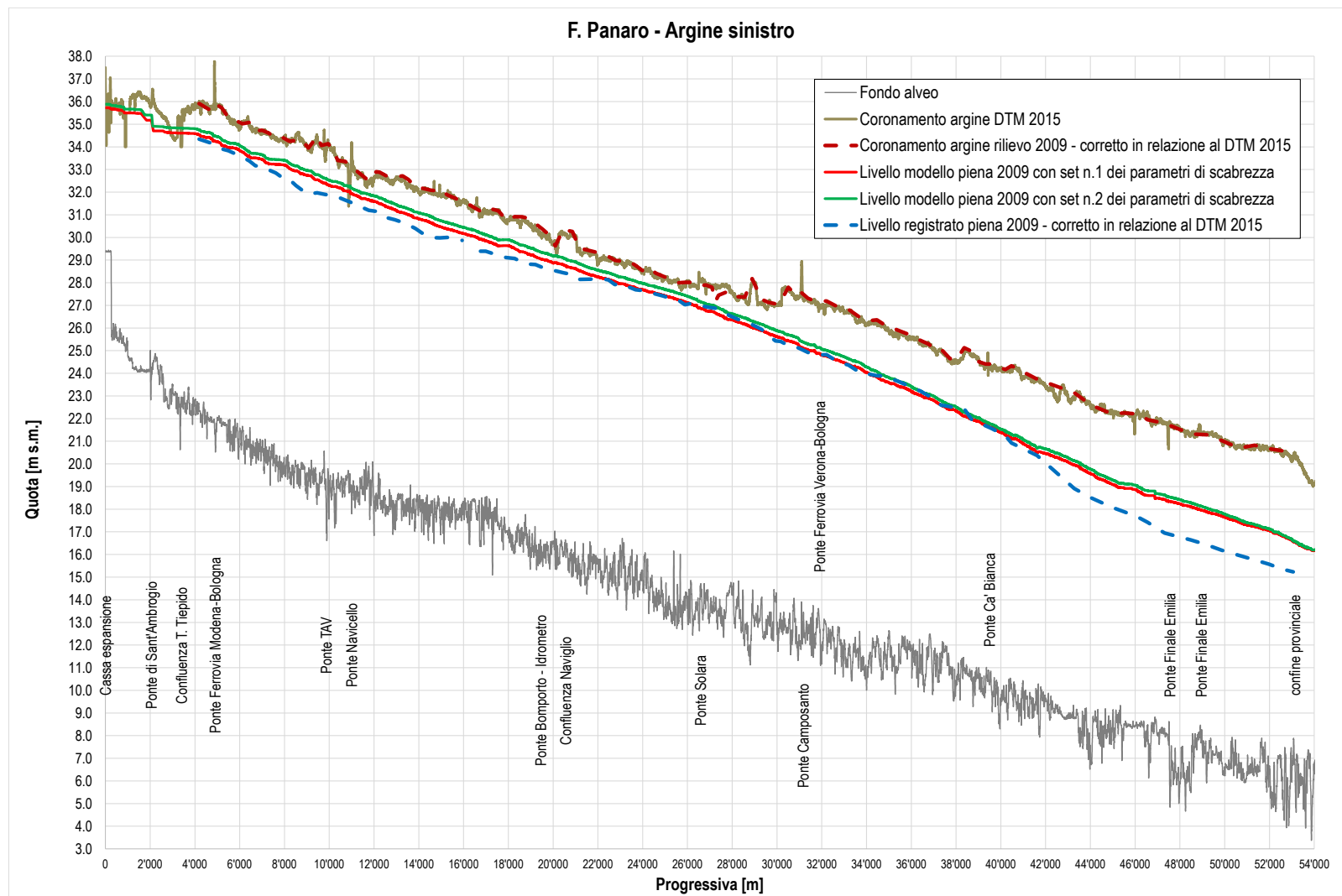
**Figura 9 – Idrogramma dell'evento di piena di dicembre 2009 del fiume Panaro a Bomporto.**



**Figura 10 – Idrogramma dell'evento di piena di dicembre 2009 del fiume Panaro in uscita dalla cassa di Sant'Anna e utilizzato nella simulazione di taratura**



**Figura 11 – Confronto fra l'idrogramma registrato e quello simulato in corrispondenza dell'idrometro di Bomporto.**



**Figura 12 – Confronto fra il livello misurato durante la piena del 2009 e il livello simulato dal modello idraulico bidimensionale**

Nel grafico di Figura 12 sono riportati due differenti livelli simulati, ottenuti con due differenti set di parametri di scabrezza, di seguito riportati nella Tabella 4 (set n. 1) e nella Tabella 5 (set n. 2). Si segnala che la scabrezza media ponderata sulle superfici dei due differenti set di scabrezza è pari a  $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  per il set n. 1 e  $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  per il set n. 2.

**Tabella 4 – set n. 1 dei parametri della scabrezza secondo Strickler per la taratura del modello**

Alveo di magra:	<b><math>Ks = 55 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Sponda molto vegetata:	<b><math>Ks = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Sponda poco vegetata:	<b><math>Ks = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Argine:	<b><math>Ks = 45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Aree golenali coltivate:	<b><math>Ks = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Aree golenali a bosco:	<b><math>Ks = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Aree golenali a pioppeto:	<b><math>Ks = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>

**Tabella 5 – set n. 2 dei parametri della scabrezza secondo Strickler per la taratura del modello**

Alveo di magra:	<b><math>Ks = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Sponda molto vegetata:	<b><math>Ks = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Sponda poco vegetata:	<b><math>Ks = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Argine:	<b><math>Ks = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Aree golenali coltivate:	<b><math>Ks = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Aree golenali a bosco:	<b><math>Ks = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>
Aree golenali a pioppeto:	<b><math>Ks = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>

La suddivisione dell'alveo di piena tra le diverse tipologie sopra riportate è stata condotta dagli scriventi attraverso l'analisi delle ortofoto del 2015 e dalle informazioni ricavate, con particolare riferimento alla vegetazione spondale, dal *“Programma di gestione della vegetazione ripariale dei fiumi Secchia e Panaro dalle Casse di espansione al confine provinciale”* condotto da AIPo nel 2014.

Dal confronto tra i valori simulati e quelli registrati, si può osservare che:

- la differenza di livello tra i due differenti set di scabrezza è prossimo a circa 20 cm;
- il livello conseguente al set di scabrezze n. 1 è più vicino al livello registrato;
- nel tratto tra Bomporto e Cà Bianca si ha un'ottima corrispondenza tra i livelli registrati e quelli simulati;
- a monte di Bomporto i livelli simulati sono superiori a quelli registrati di valori compresi mediamente tra 20 e 50 cm, con tratti isolati in cui la differenza è prossima a 80 cm;
- a valle di Cà Bianca i livelli simulati sono superiori a quelli registrati; il massimo scostamento si ha nel tratto prossimo al confine provinciale, in cui la differenza è

prossima a 1.5 m;

- il modello risulta, a giudizio degli scriventi, sufficientemente tarato e adeguatamente cautelativo in relazione alla tematica del rischio di allagamento e del conseguente obiettivo di riduzione del rischio idraulico.

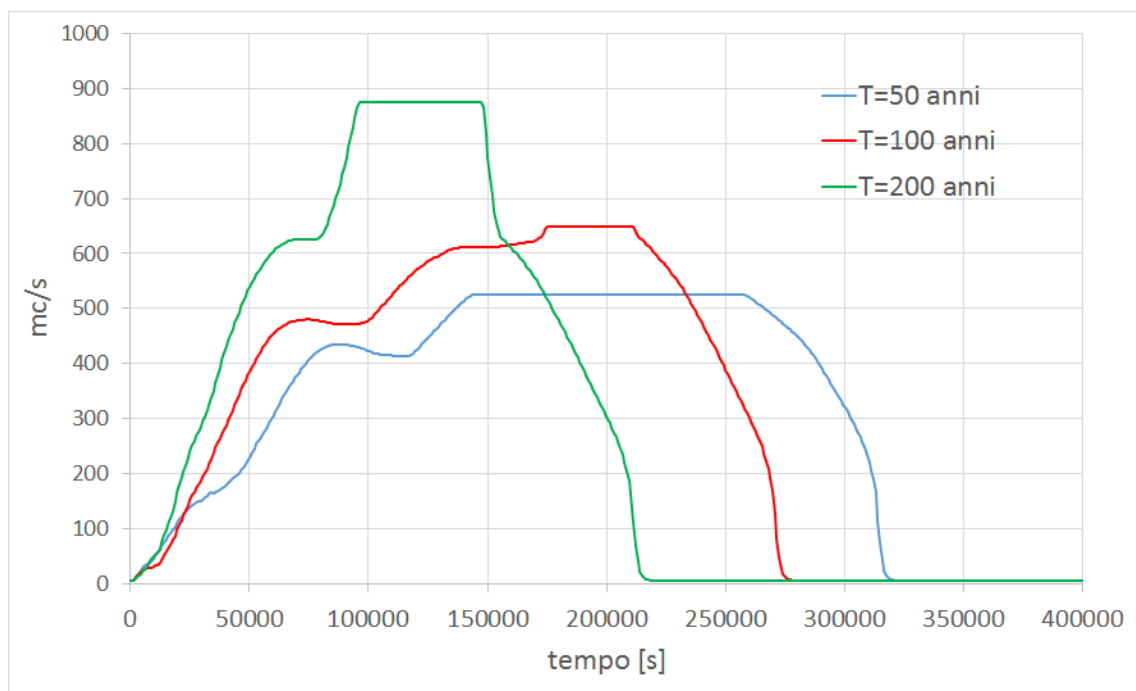
Le analisi modellistiche relative agli eventi di riferimento corrispondenti ai diversi valori del tempo di ritorno (50, 100 e 200 anni) sono state condotte, a favore di sicurezza, utilizzando il set di parametri di scabrezza n. 2.

### 3.3 SIMULAZIONI CONDOTTE CON IL MODELLO BIDIMENSIONALE E RISULTATI OTTENUTI

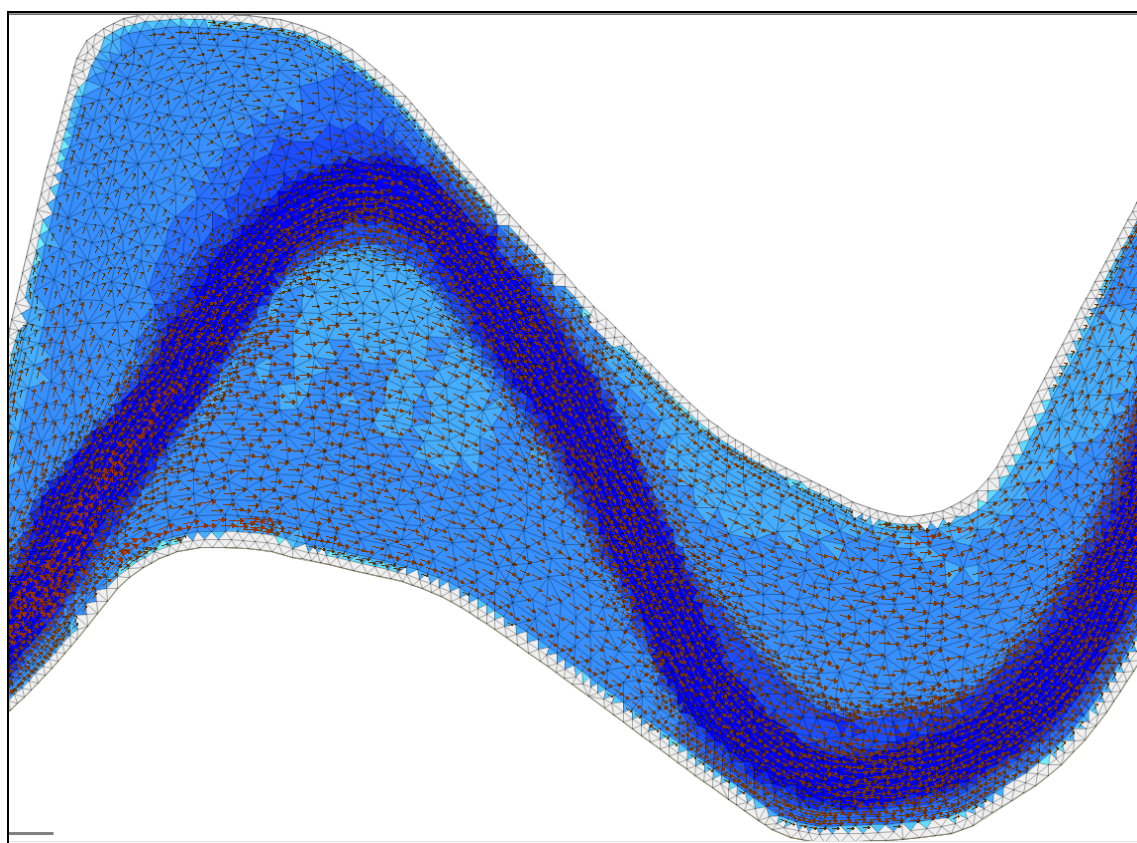
A partire dal modello idraulico bidimensionale descritto nel paragrafo precedente ed in relazione agli idrogrammi in uscita dalla cassa di espansione di Sant'Anna, definite da UNIMORE e riportate nel paragrafo 2.4.1, sono state condotte le seguenti simulazioni in moto vario:

1. evento di piena con tempo di ritorno pari a 50 anni, caratterizzato da una portata al colmo pari a 525 m<sup>3</sup>/s;
2. evento di piena con tempo di ritorno pari a 100 anni, caratterizzato da una portata al colmo pari a 650 m<sup>3</sup>/s;
3. evento di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni, caratterizzato da una portata al colmo pari a 875 m<sup>3</sup>/s.

Nella seguente Figura 13 sono nuovamente riportati gli idrogrammi di piena determinati da UNIMORE per i suddetti valori del tempo di ritorno, che sono stati utilizzati come idrogrammi entranti nel fiume Panaro a valle della cassa di Sant'Anna, mentre nella Figura 14 è riportato un esempio del campo di moto ricavato dal modello bidimensionale.



**Figura 13 – Portate di piena in uscita dalla cassa di espansione di Sant’Anna calcolate da UNIMORE**



**Figura 14 – Rappresentazione del campo di moto del modello bidimensionale durante l’evento di piena simulato**



In relazione a quanto descritto nella relazione A.2 – “*Analisi multicriteria delle soluzioni alternative*”, allegata al progetto di fattibilità tecnico-economica redatto a marzo 2017, con particolare riferimento al possibile ampliamento della capacità d’invaso della cassa di espansione di Sant’Anna, i risultati relativi all’evento caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 50 anni sono validi anche per eventi caratterizzati da tempi di ritorno pari a 100 e 200 anni. In pratica, attraverso l’incremento della capacità di laminazione della cassa di Sant’Anna sarà possibile lasciar defluire a valle della cassa stessa una portata al colmo pari a  $525 \text{ m}^3/\text{s}$  anche in occasione di eventi del bacino a monte della cassa caratterizzati da tempi di ritorno pari a 100 e 200 anni.

La modellazione bidimensionale è stata condotta considerando come limiti del dominio di calcolo il coronamento arginale, senza quindi analizzare la propagazione della piena nelle aree esterne alle arginature in caso di tracimazione delle stesse. Questo in quanto il modello in oggetto è stato implementato con la finalità di progettare gli interventi di adeguamento arginale, non per definire le aree di allagamento allo stato attuale per i diversi valori del tempo di ritorno.

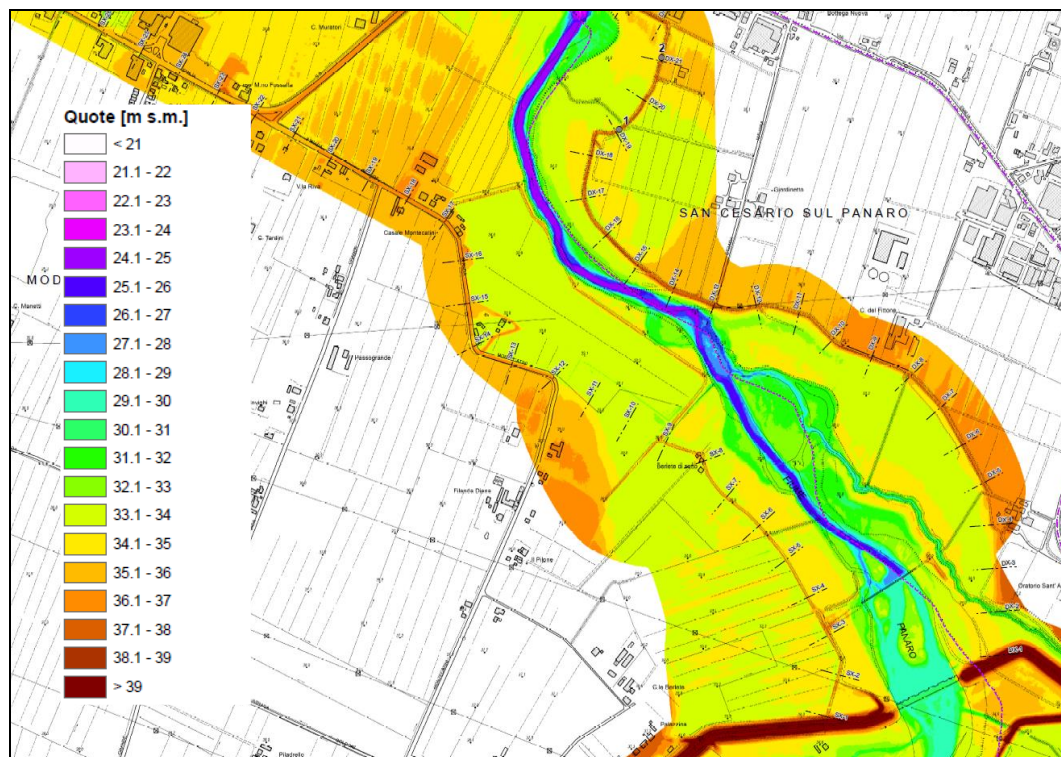
L’analisi è stata estesa alle aree extra-golenali solo per la parte di asta fluviale compresa tra la cassa di espansione di Sant’Anna e la confluenza con il T. Tiepido, in quanto in tale tratto, soprattutto in sinistra idraulica, non è presente un vero e proprio sistema arginale, ma sono presenti solo rilevati arginali “secondari” e rilevati stradali. Tale analisi è stata effettuata solo con riferimento al tempo di ritorno cinquantennale.

Con riferimento al presente progetto, di seguito vengono presentati i risultati del modello idraulico bidimensionale in corrispondenza del tratto di fiume Panaro posto appena a valle della cassa di Sant’Anna e la confluenza con il T. Tiepido. Tale tratto non presenta, in sinistra idraulica, un vero e proprio sistema difensivo, infatti gli argini maestri del Panaro si sviluppano appena a valle del ponte della via Emilia sul T. Tiepido.

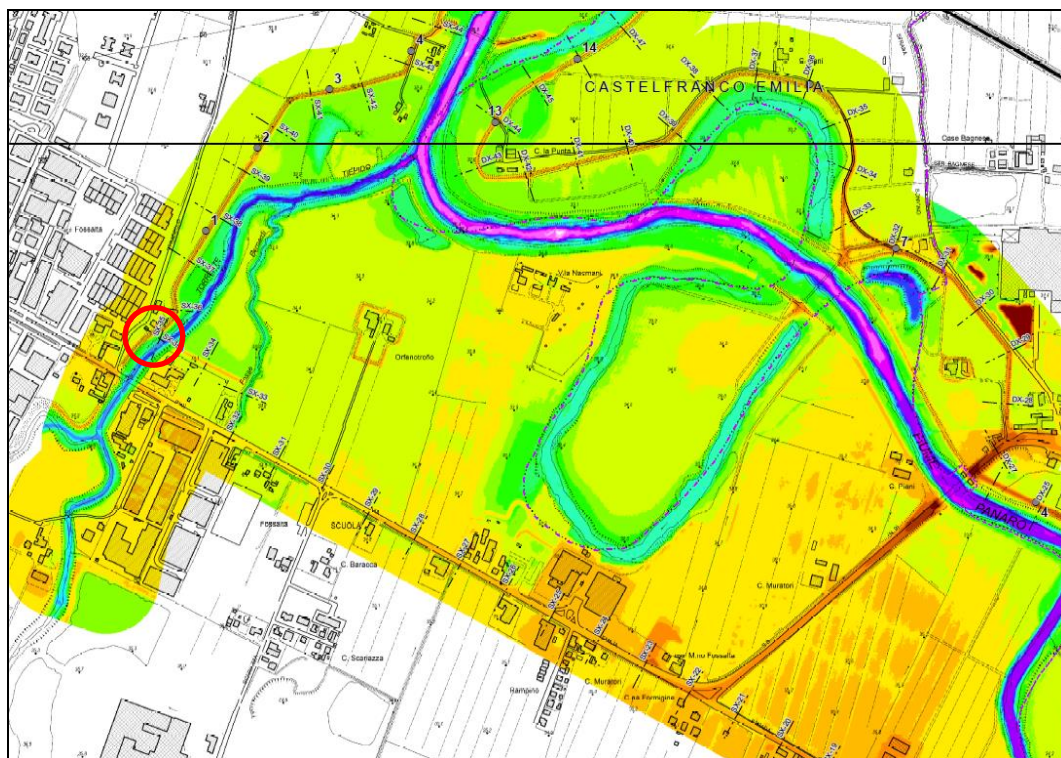
Tra la cassa di espansione e il rilevato di accesso della via Emilia al ponte di Sant’Ambrogio la regione fluviale è delimitata in parte da scarpate naturali, da rilevati stradali (via Montecatini) e in parte da rilevati arginali “secondari. Proseguendo verso valle, la regione fluviale è delimitata in sinistra idraulica dal rilevato della via Emilia, che si estende fino al T. Tiepido.

Nella seguente Figura 16 è indicato anche il punto in cui hanno inizio gli argini maestri del F. Panaro, in sinistra idraulica (cerchio rosso).

In destra idraulica, invece, l'argine maestro del Panaro inizia circa 350 m a valle della cassa di laminazione di Sant'Anna. Per tale tratto è stata condotta una modellazione bidimensionale estesa oltre ai suddetti limiti (scarpate naturali, rilevati stradali e rilevati arginali "secondari") per verificare ove si estende l'allagamento. In particolare di seguito viene rappresentata graficamente l'estensione dell'allagamento conseguente alla piena con tempo di ritorno cinquantennale, che ricordiamo, è caratterizzata da una portata al colmo pari a  $525 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 15 – Stralcio planimetrico dell'assetto attuale del corso d'acqua con riportate le quote altimetriche – tratto tra la cassa di Sant'Anna e il rilevato della via Emilia di accesso al ponte di Sant'Ambrogio**



**Figura 16 – Stralcio planimetrico dell'assetto attuale del corso d'acqua con riportate le quote altimetriche – tratto il rilevato della via Emilia di accesso al ponte di Sant'Ambrogio e la confluenza con il T. Tiepido**

Nella simulazione non è stato inserito nessun valore di portata di piena nel T. Tiepido, considerando l'ipotesi di non contemporaneità degli eventi, al fine di valutare gli effetti di rigurgito lungo l'asta del Tiepido per effetto della piena del T. Panaro.

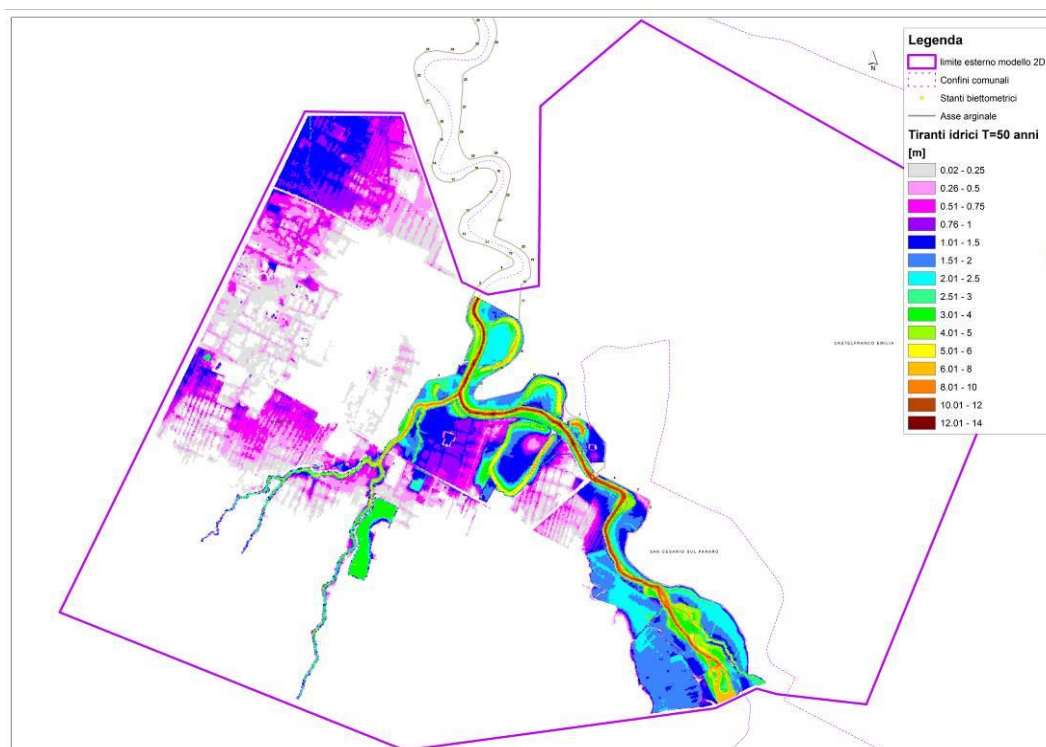
Nelle figure seguenti sono riportate le aree di allagamento ottenute attraverso il modello bidimensionale, con indicazione dei tiranti idrici.

In particolare, nella Figura 17 è riportato il risultato esteso all'interno dominio di calcolo, mentre nella Figura 18 c'è il dettaglio relativo alla zona tra la cassa e la via Emilia, e nella Figura 19 il dettaglio del tratto tra la via Emilia e il T. Tiepido.

La modellazione è stata effettuata utilizzando come geometria del sistema fluviale ed extra-fluviale il modello digitale del terreno (DTM). Siccome nel DTM non sono presenti le opere di difesa costituite da muri, l'allagamento ottenuto dal modello potrebbe in realtà essere minore, qualora tali opere fossero più alte del livello idrico della piena considerata.

Si osserva, inoltre, che nelle zone in cui l'allagamento giunge in prossimità del limite del dominio di calcolo le altezze idriche sono sovrastimate, in quanto nella realtà l'acqua continuerebbe a defluire verso valle, mentre nel modello è come se ci fosse un muro che ostacola il deflusso.





**Figura 17 – Aree di allagamento per la piena T=50 anni con particolare riferimento al tratto compreso tra la cassa di Sant’Anna e il T. Tiepido – esteso al dominio di calcolo**

Dalle analisi sin qui condotte emerge:

- in sponda destra i limiti delle scarpate naturali (tratto lungo 350 m a valle della cassa di Sant’Anna) e le arginature maestre (fino al ponte ferroviario ove termina il modello in oggetto) sono in grado di contenere il deflusso della piena cinquantennale;
- in sponda sinistra:
  - o tra la cassa e la via Emilia l’allagamento della piena cinquantennale interessa aree agricole e alcune cascine, oltre a limitati tratti della viabilità ordinaria (via Montecatini);
  - o a valle del rilevato di accesso della via Emilia al ponte di Sant’Ambrogio si verificano alcune importanti fenomeni di esondazione:
    - lungo la via Emilia, in particolare tra l’incrocio con la Strada Scariazza e il ponte sul T. Tiepido;
    - lungo il T. Tiepido in sponda destra, con interessamento di alcune aree urbanizzate;
    - lungo il T. Grizzaga (affluente sinistro del T. Tiepido), sia in sponda destra che in sponda sinistra, con interessamento di aree urbanizzate della città di Modena.

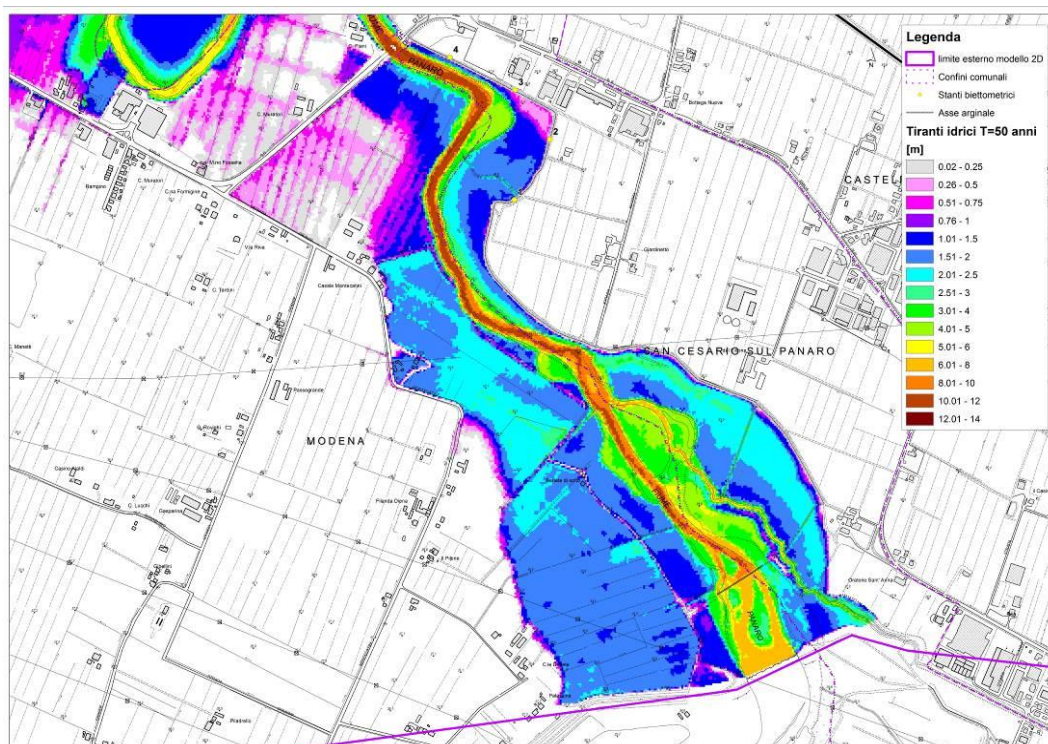


Figura 18 – Aree di allagamento per la piena T=50 anni con particolare riferimento al tratto compreso tra la cassa di Sant’Anna e il T. Tiepido – particolare del tratto tra la cassa e la via Emilia

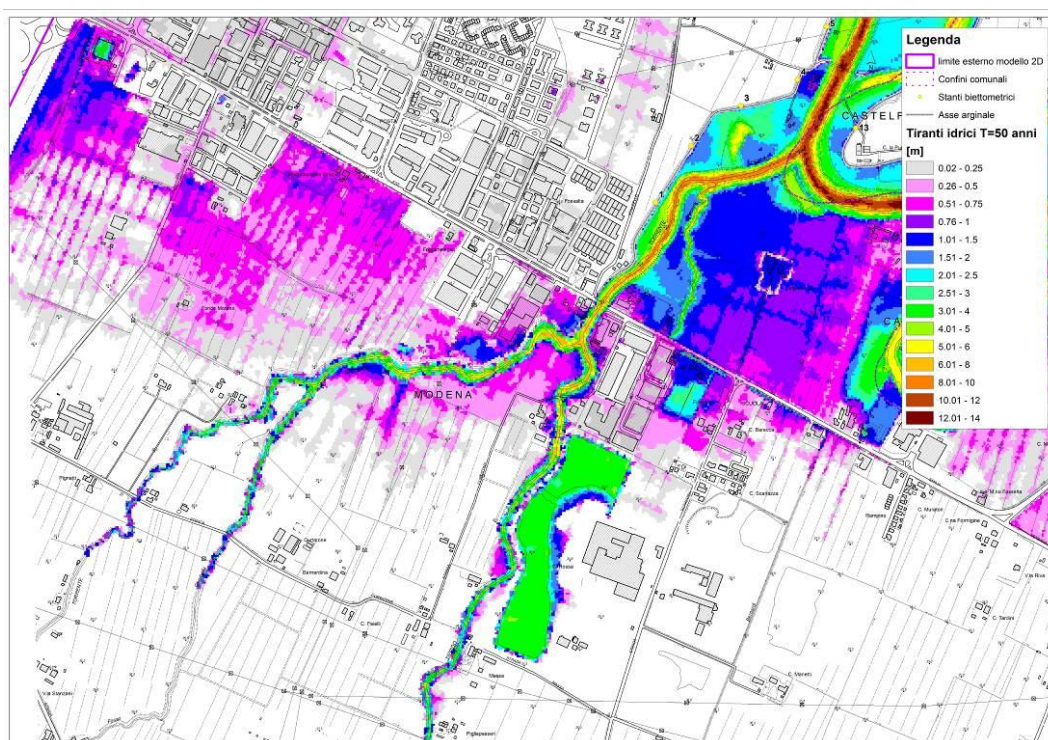
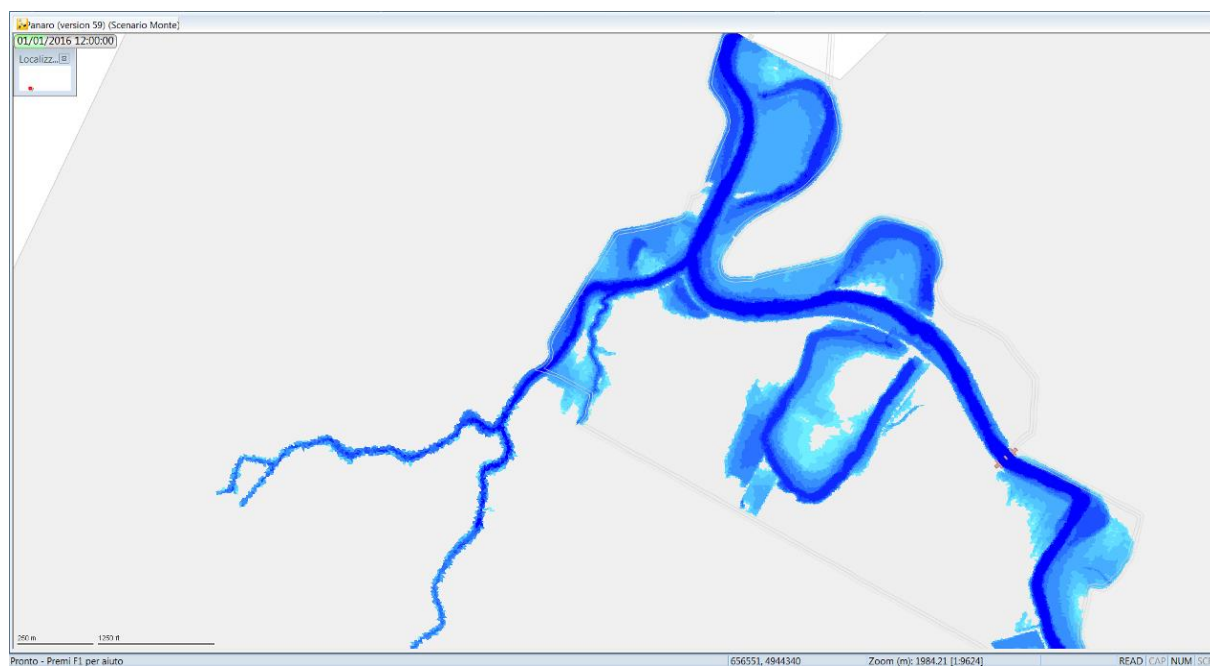
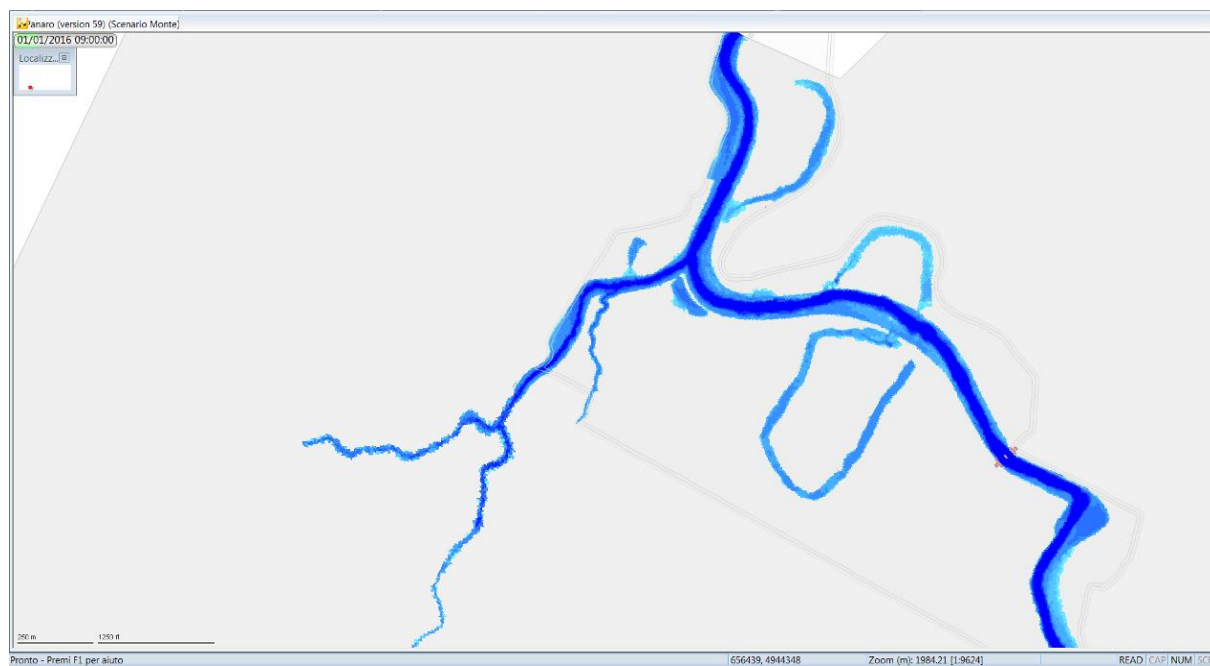
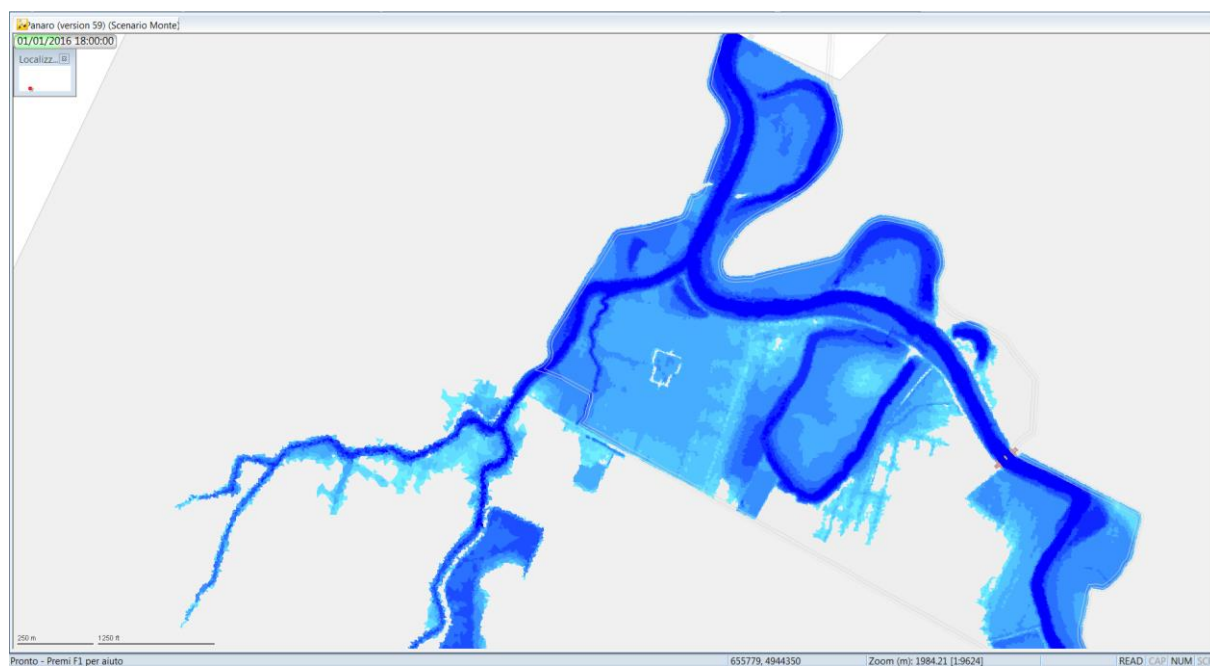
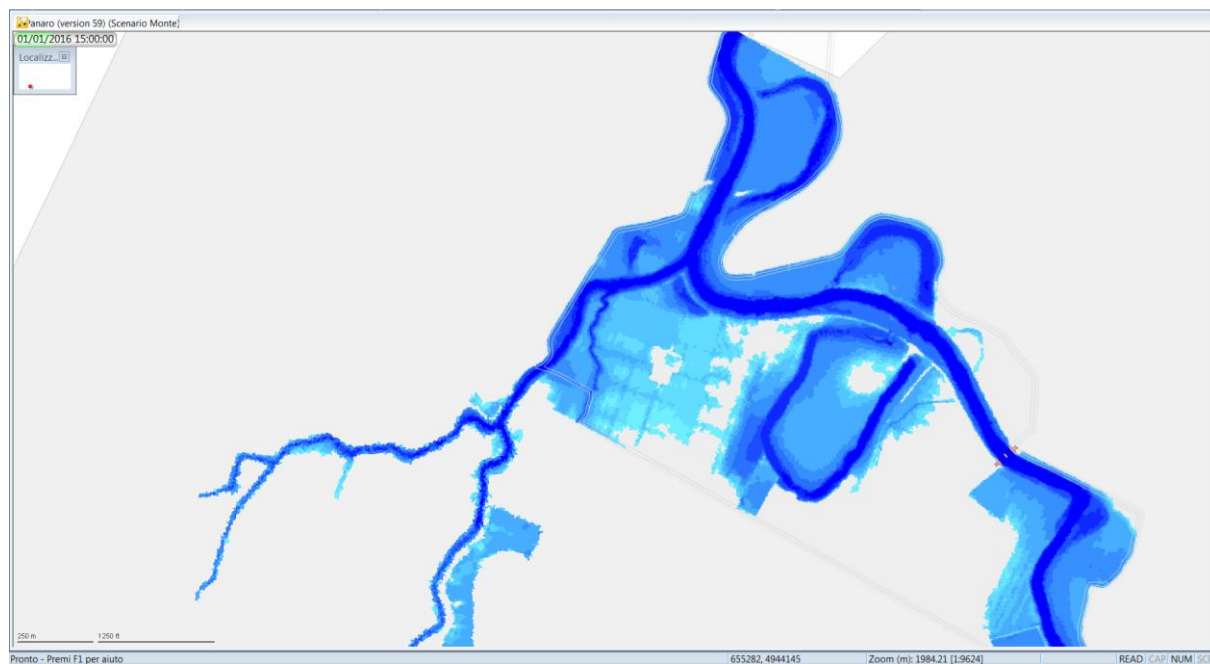


Figura 19 – Aree di allagamento per la piena T=50 anni con particolare riferimento al tratto compreso tra la cassa di Sant’Anna e il T. Tiepido – particolare del tratto tra la via Emilia e il T. Tiepido

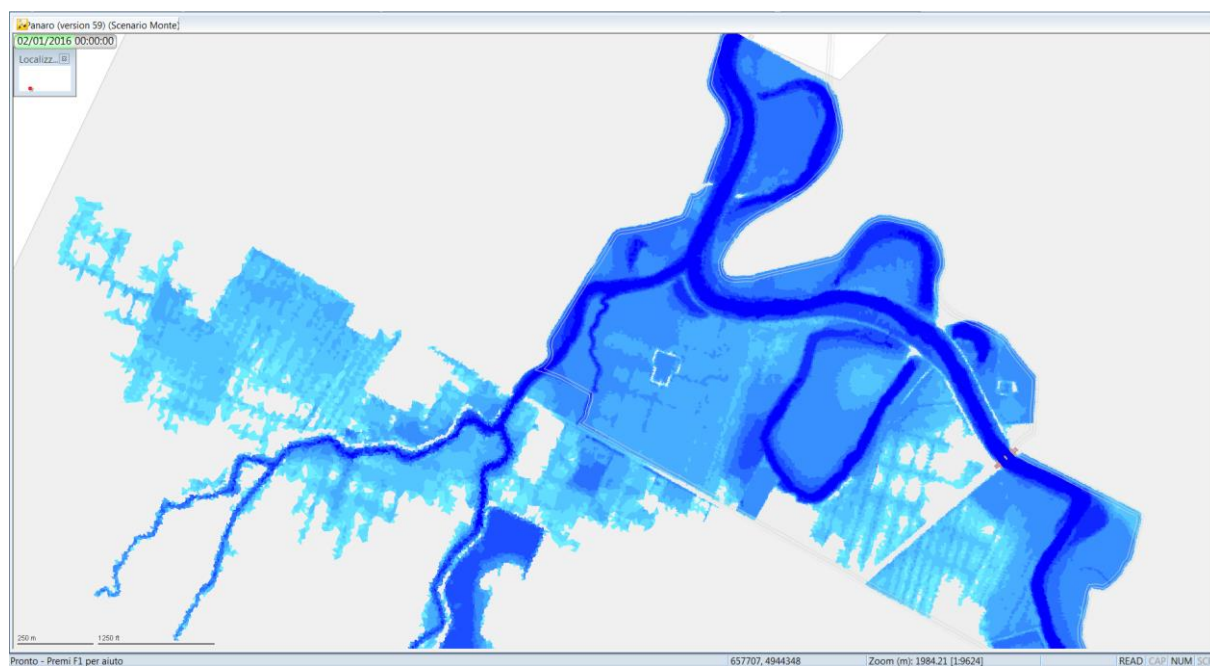
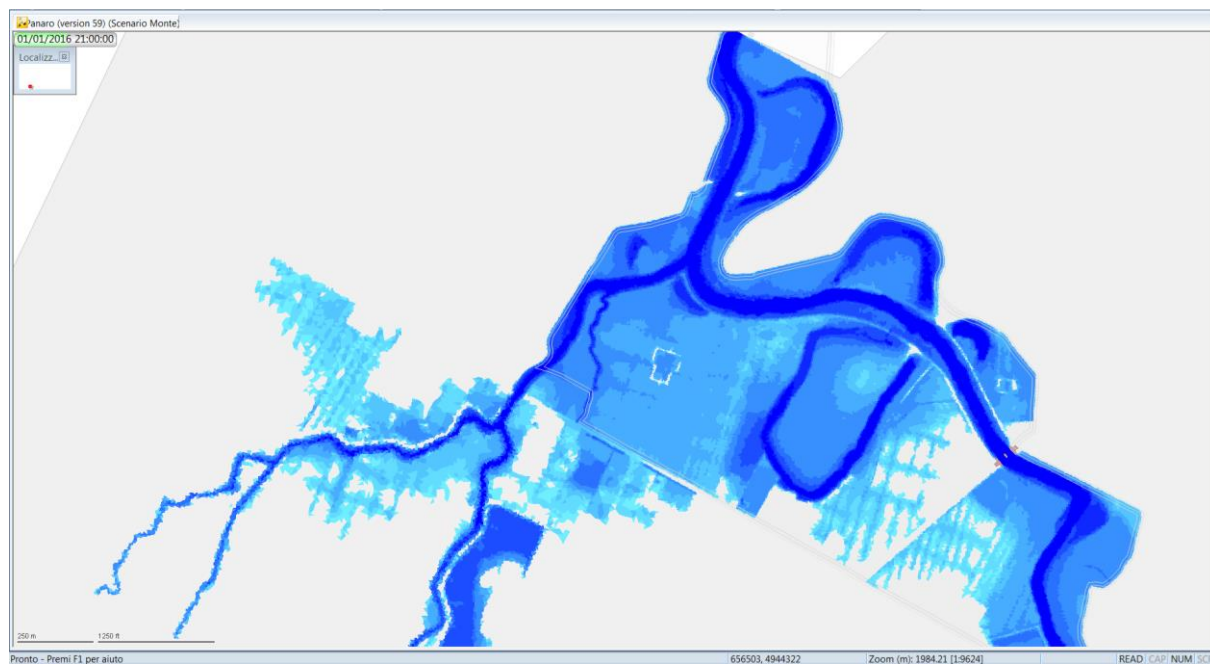


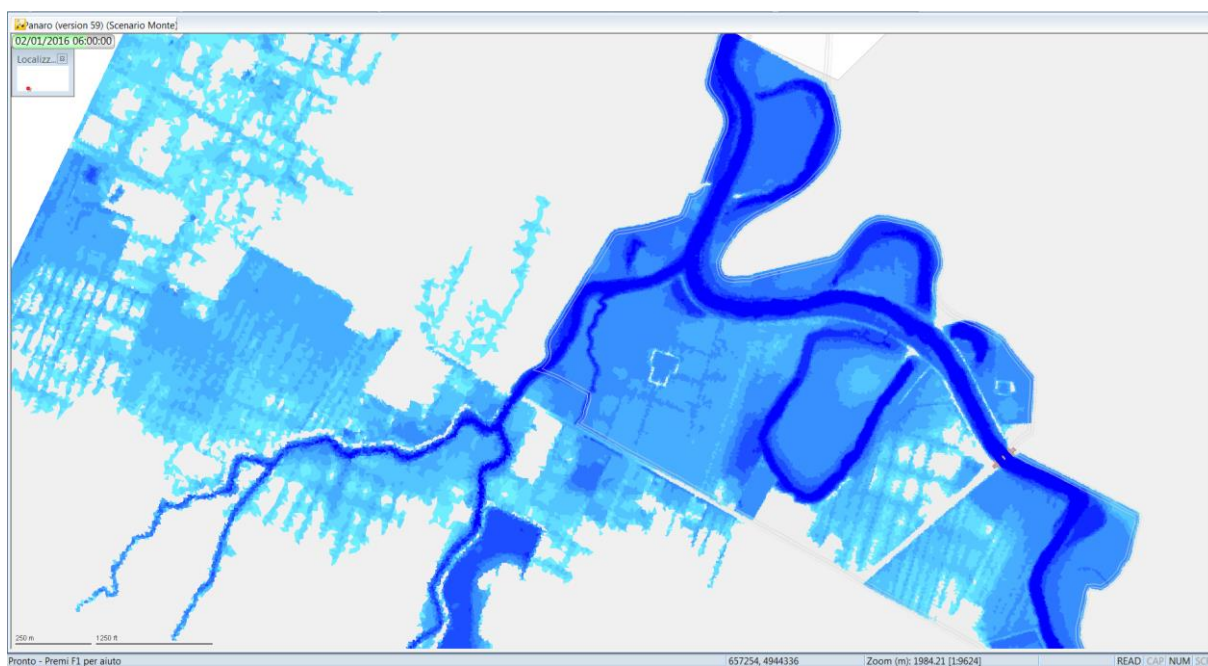
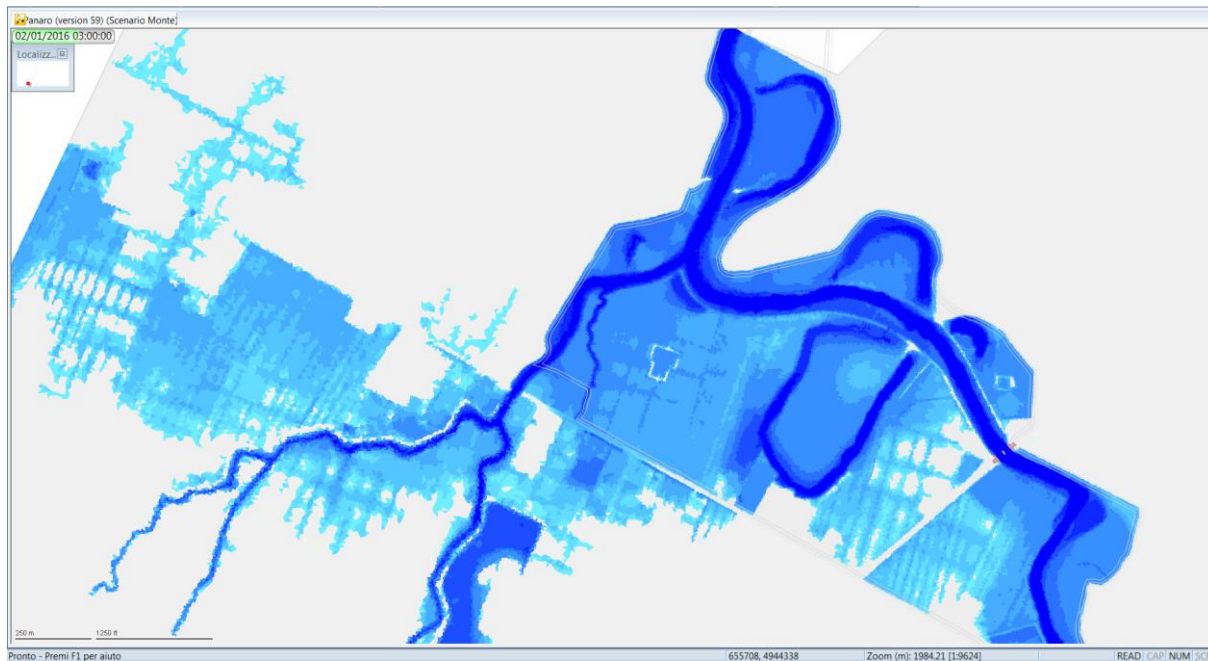
Per comprendere meglio la dinamica di evoluzione dell'allagamento che si sviluppa nella zona in esame, di seguito si riportano alcune immagini ricavate dalla simulazione condotta con il modello idraulico bidimensionale. In particolare le immagini riproducono l'area allagabile ad intervalli di 3 ore, durante l'evoluzione della piena con  $T=50$  anni.

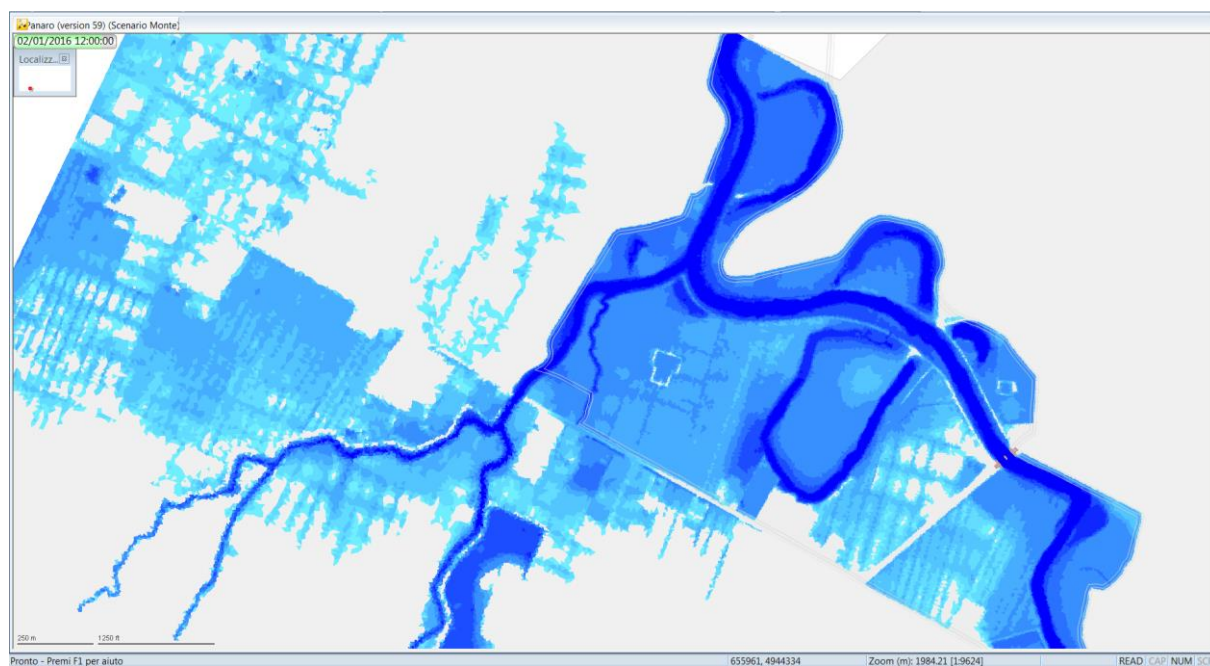
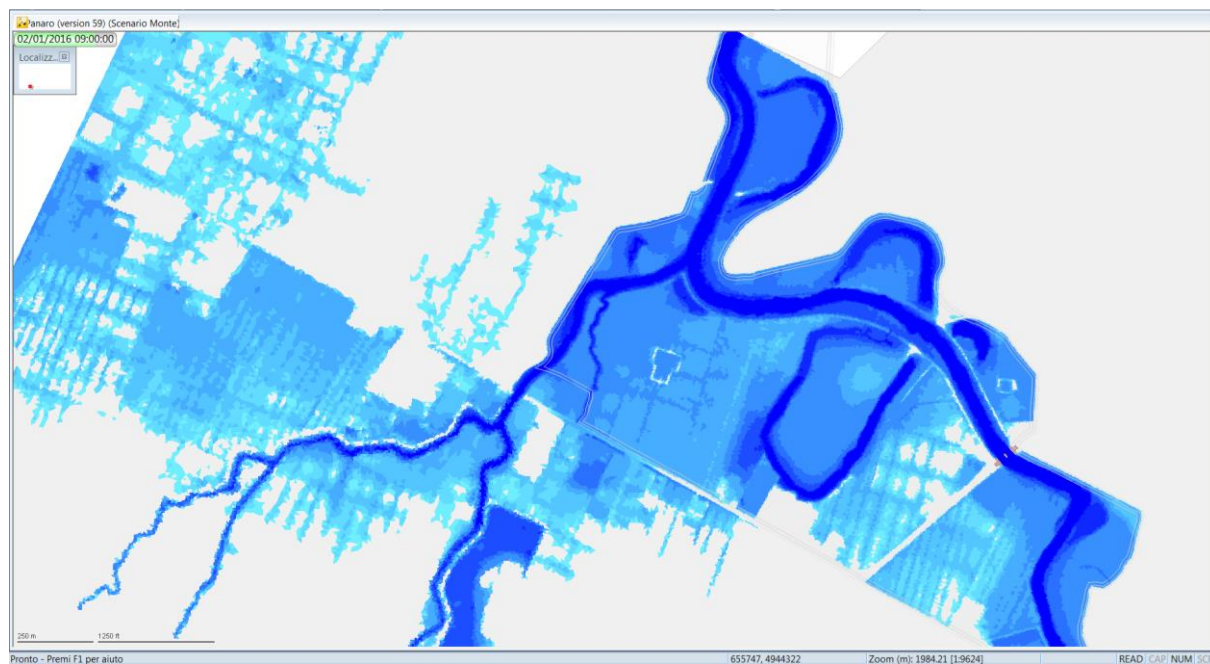






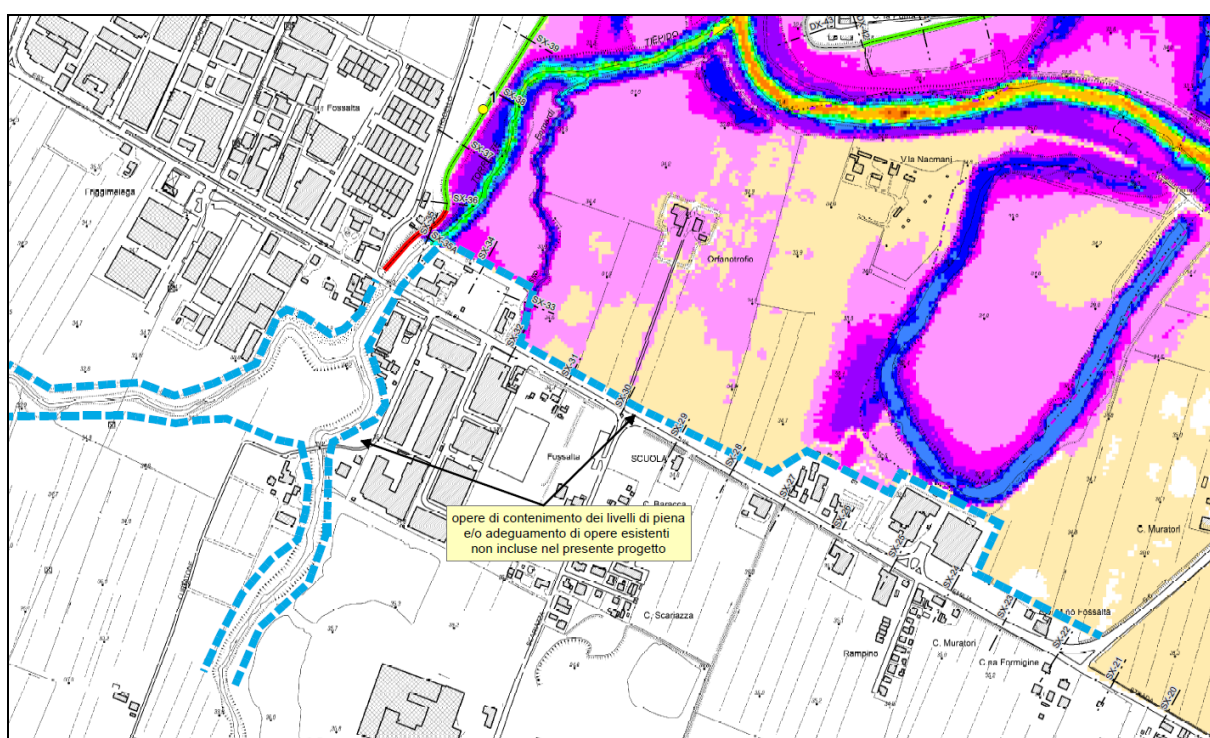








Gli interventi necessari a contenere in tale tratto l'allagamento per la piena di ritorno di 50 anni non sono stati inclusi nel progetto di fattibilità tecnico-economica redatto a marzo 2017, ma l'importo presunto degli stessi è stato inserito tra le somme a disposizione del quadro economico di progetto. Tuttavia, nella tavole D.3.2.1, D.3.3.1 (di cui si riporta uno stralcio nella Figura 20) e D.3.4.1 allegate a tale progetto di fattibilità tecnico-economica, è riportato un possibile tracciato delle opere di contenimento dei livelli di piena e/o di adeguamento delle opere di difesa esistenti nel tratto tra il rilevato di accesso della via Emilia al ponte di Sant'Ambrogio, la zona terminale del T. Tiepido e del suo affluente Grizzaga.



**Figura 20 – Stralcio della tavola D.3.3.1, relativa ai risultati del modello 2D, con indicato un possibile tracciato delle opere di contenimento dei livelli di piena e/o di adeguamento delle opere di difesa esistenti nel tratto tra il rilevato di accesso della via Emilia al ponte di Sant'Ambrogio, la zona terminale del T. Tiepido e del suo affluente Grizzaga.**

Il presente progetto, come già accennato in precedenza, riguarda il tratto di argine posto in sinistra idraulica del fiume Panaro, tra il rilevato di accesso al ponte di Sant'Ambrogio e la confluenza con il T. Tiepido, mentre non entra nel merito delle opere necessarie lungo il T. Tiepido e i suoi affluenti. Tale argine è caratterizzato da una quota di coronamento pari a 35.80 m s.m., un metro al di sopra del livello idrico relativo alla portata di 525 m<sup>3</sup>/s in uscita dalla cassa di laminazione di Sant'Anna (T=50 anni nell'assetto attuale e T=100 e 200 anni

previo ampliamento della volumetria della cassa stessa).

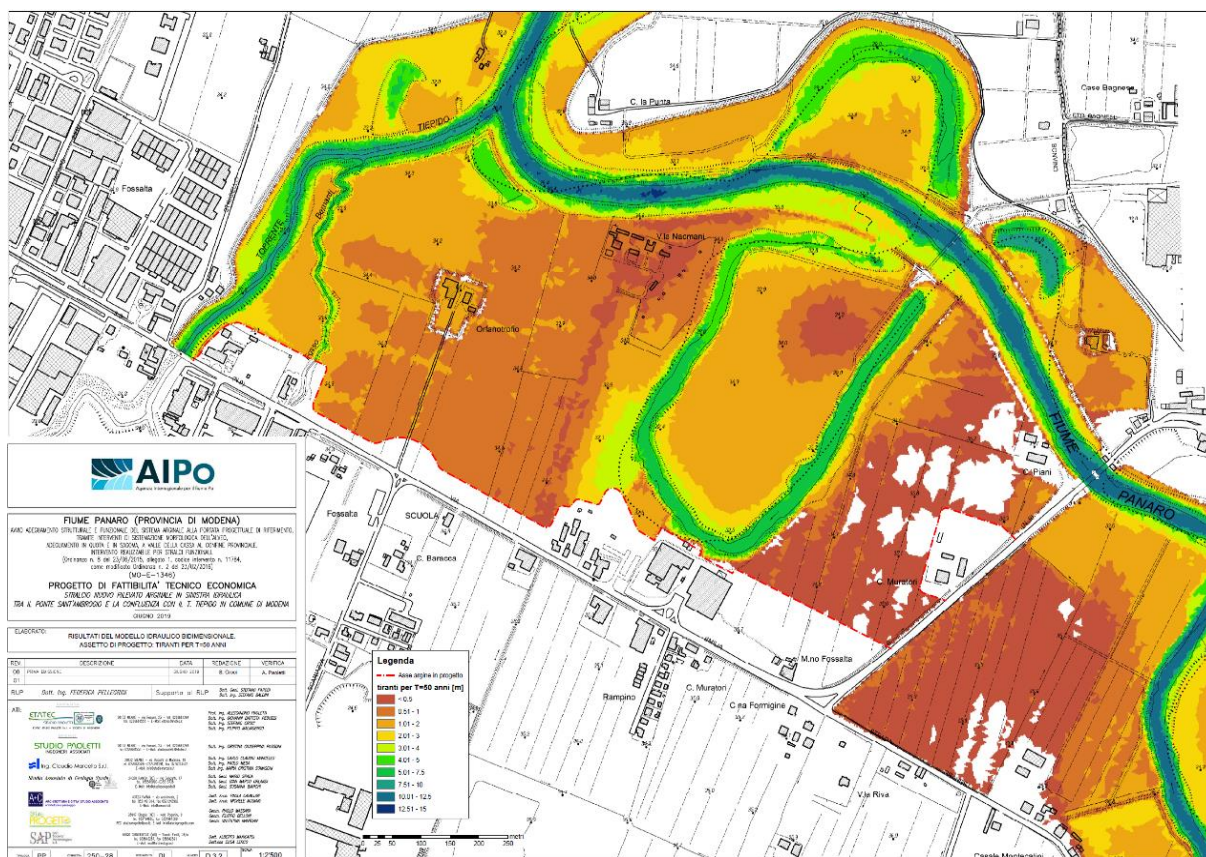
Nelle figure seguenti si riportano i risultati delle simulazioni condotte, in termini di area di allagamento, livelli massimi al colmo, tiranti al colmo e velocità massima della corrente, con riferimento all'evento di riferimento caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 50 anni. Per maggiori dettagli si rimanda alle tavole allegate al presente progetto (D.3.1, D.3.2 e D.3.3).

Nelle simulazioni è stato considerato che l'allagamento non possa avvenire dal T. Tiepido a monte della via Emilia, ipotizzando l'esistenza di opere di contenimento. Questo è stato fatto per verificare i soli effetti indotti dalle opere oggetto del presente progetto.

Dai risultati emerge che il livello della piena è pari a circa 34.80 m s.m., quindi la quota di coronamento dell'argine in progetto è stata posta a 35.80 m s.m..







## Legenda

--- Asse argine in progetto

**tiranti per T=50 anni [m]**

- < 0.5
- 0.51 - 1
- 1.01 - 2
- 2.01 - 3
- 3.01 - 4
- 4.01 - 5
- 5.01 - 7.5
- 7.51 - 10
- 10.01 - 12.5
- 12.51 - 15

Figura 22 – tiranti idrici di piena per T=50 anni – assetto di progetto.

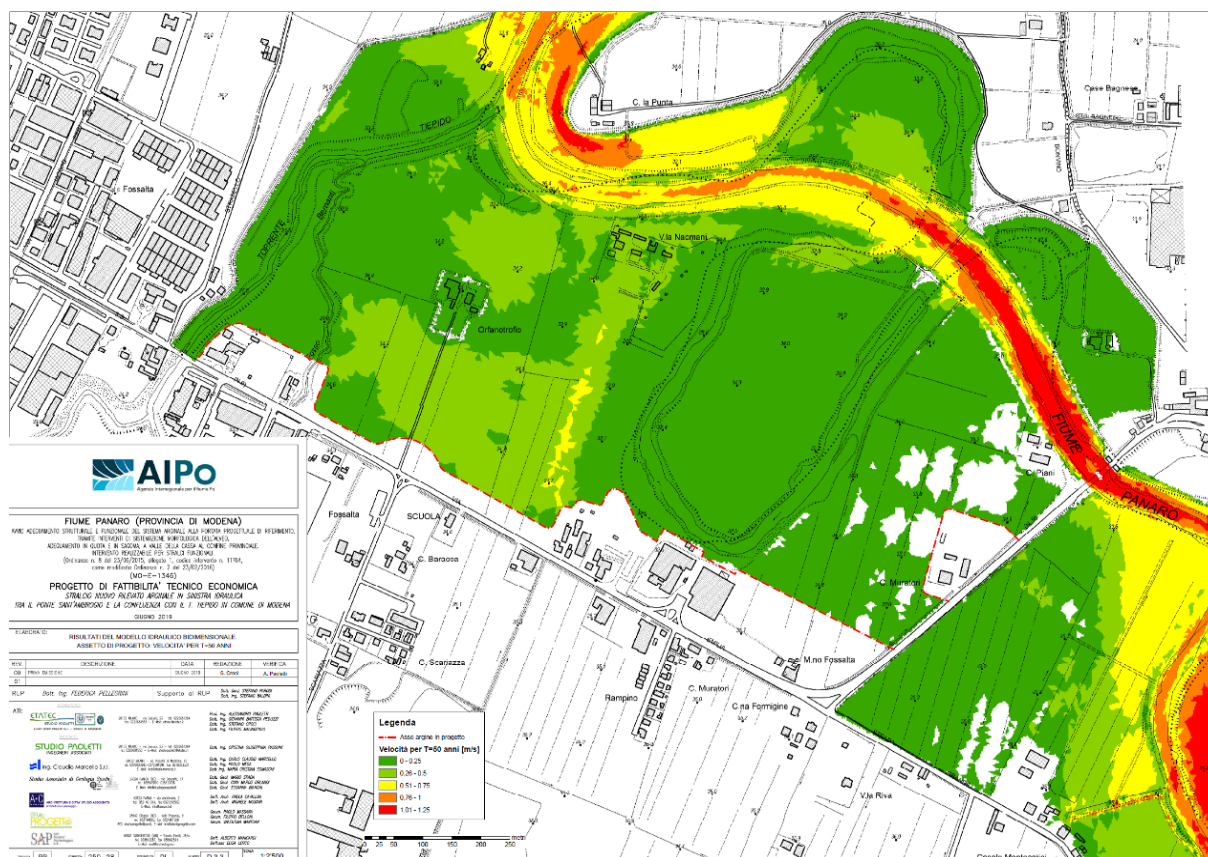


Figura 23 – velocità della corrente per T=50 anni – assetto di progetto.

A completamento delle analisi idrauliche effettuate, di seguito si riportano i risultati della analisi condotte considerando anche l'idrogramma di piena con tempo di ritorno duecentennale, come definito da UNIMORE, caratterizzato da una portata al colmo pari a 875 m<sup>3</sup>/s. Ovviamente per tale valore di portata l'argine in progetto non è sufficiente, come tra l'altro non lo è tutto il sistema arginale esistente del fiume Panaro, per cui si verificano esondazioni diffuse.



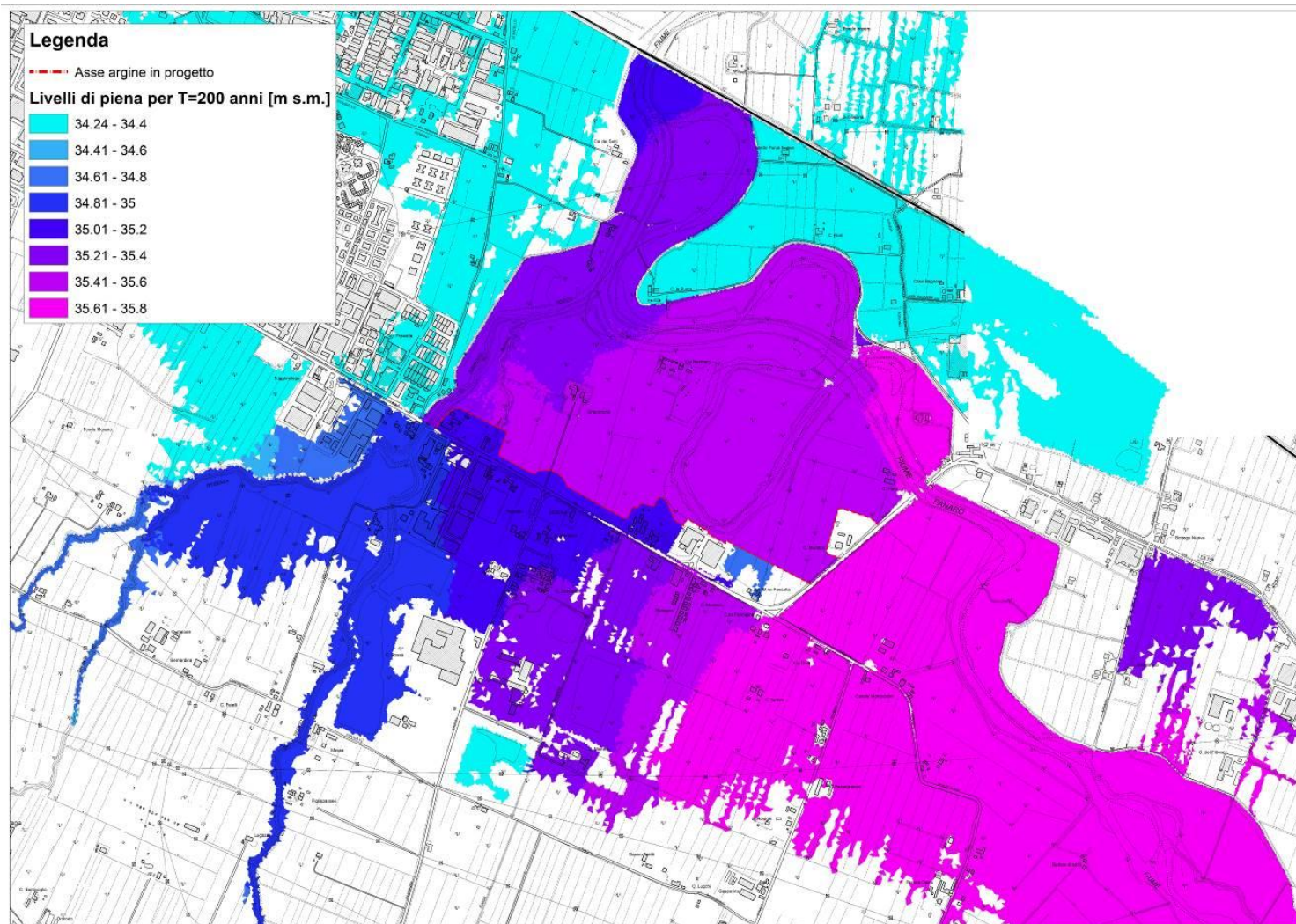
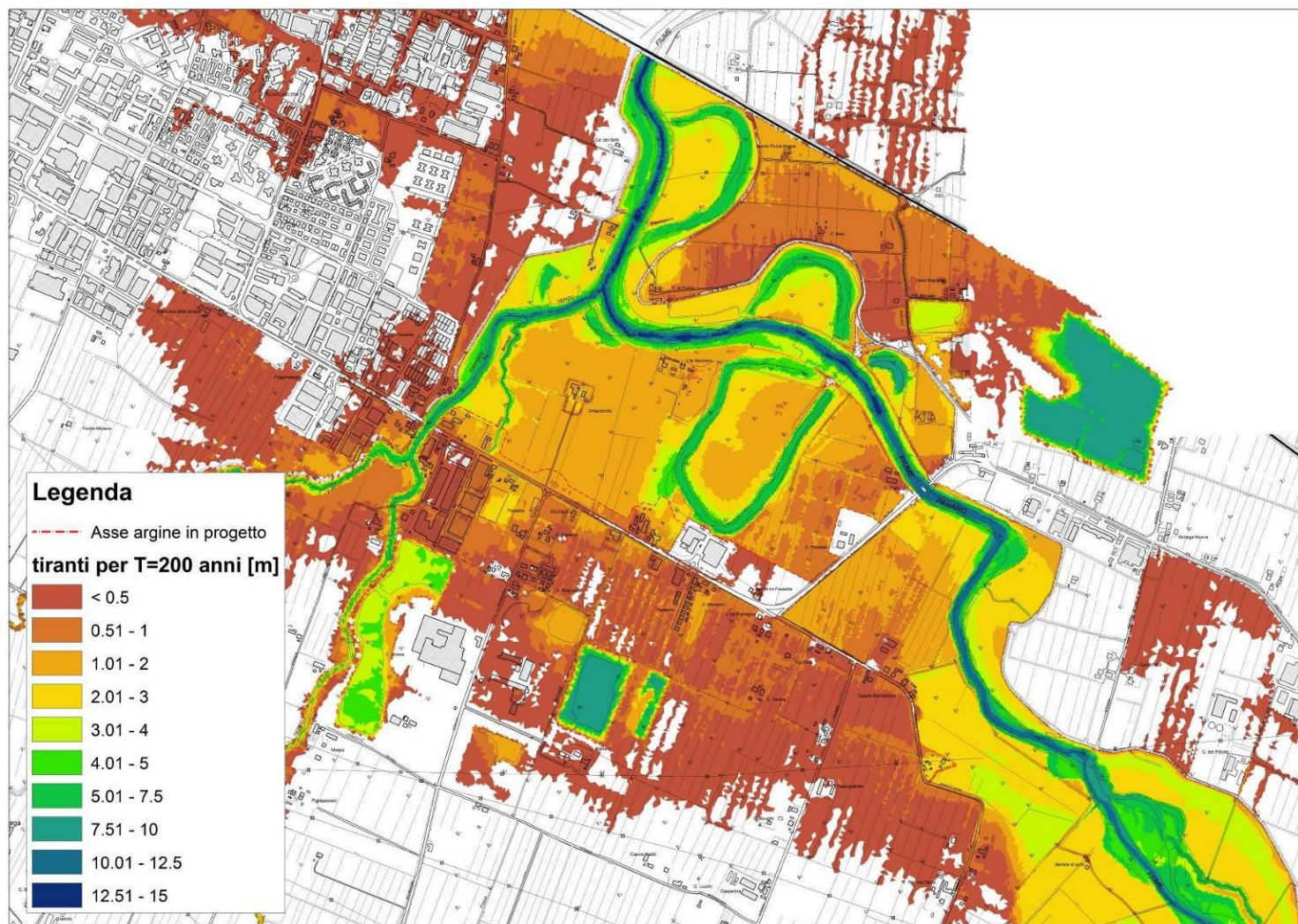


Figura 24 – Livelli di piena per T=200 anni – assetto di progetto con argine per T=50 anni + 1 m franco





**Figura 25 – tiranti idrici di piena per T=200 anni – assetto di progetto con argine per T=50 anni + 1 m franco**



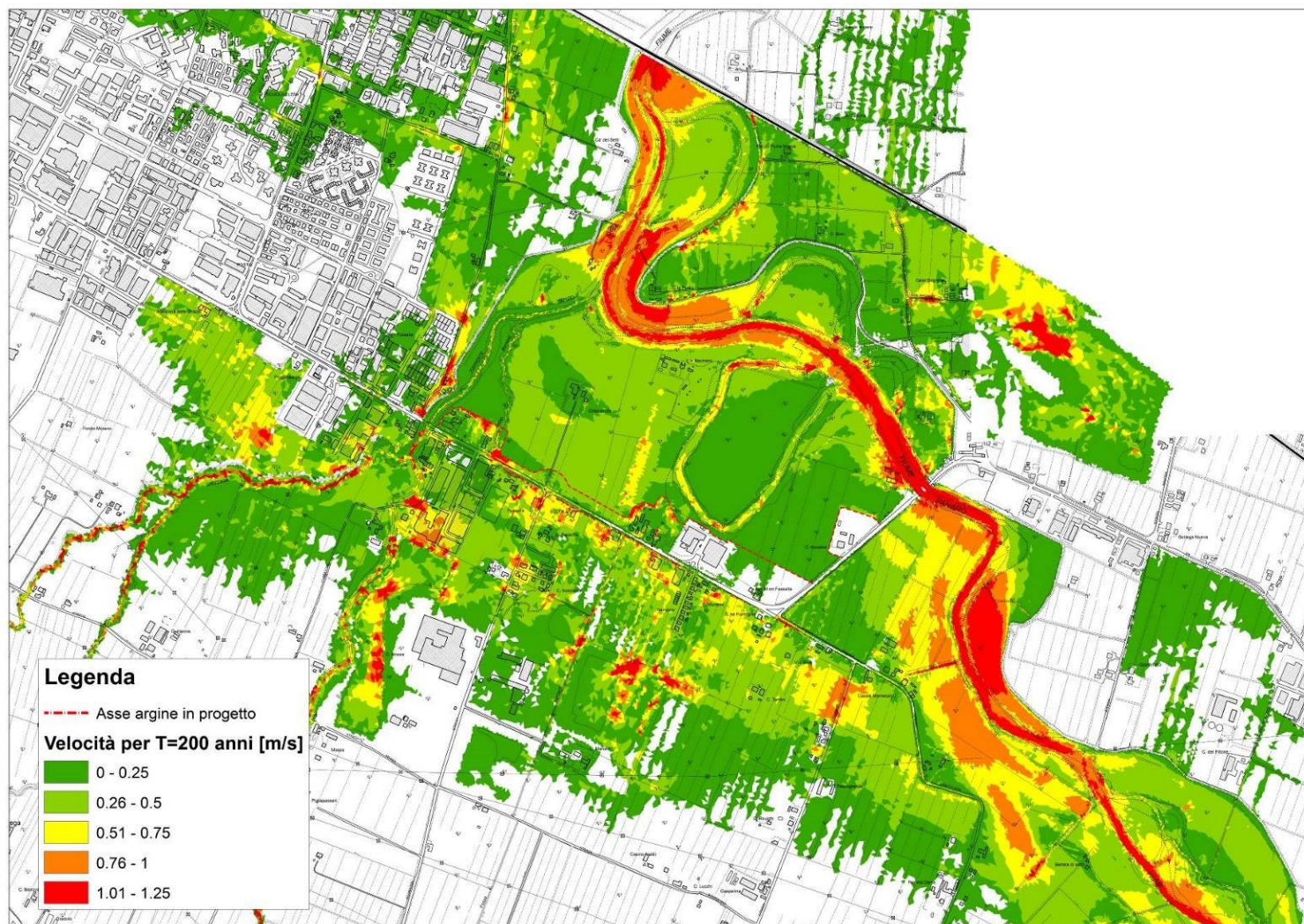


Figura 26 – velocità della corrente per T=200 anni – assetto di progetto con argine per T=50 anni + 1 m franco

Milano, giugno 2019

**I PROFESSIONISTI INCARICATI:**

**ETATEC STUDIO PAOLETTI s.r.l.**

**Prof. Ing. Alessandro Paoletti**

**STUDIO PAOLETTI INGEGNERI ASSOCIATI**

**Dott. Ing. Stefano Croci**

**ING. CLAUDIO MARCELLO s.r.l.**

**Dott. Ing. Carlo Claudio Marcello**

**STUDIO ASSOCIATO DI GEOLOGIA SPADA**

**Dott. Geol. Mario Spada**

**A+C\_ARCHITETTURA E CITTA' STUDIO ASSOCIATO**

**Arch. Paola Cavallini**

**A TUTTO PROGETTO – STUDIO ASSOCIATO DEI GEOMETRI PAOLO MASSARA E  
FILIPPO BELLONI SOCIETA' SEMPLICE**

**Geom. Paolo Massara**

**SAP SOCIETA' ARCHEOLOGICA S.R.L.**

**Dott. Agostino Favaro**