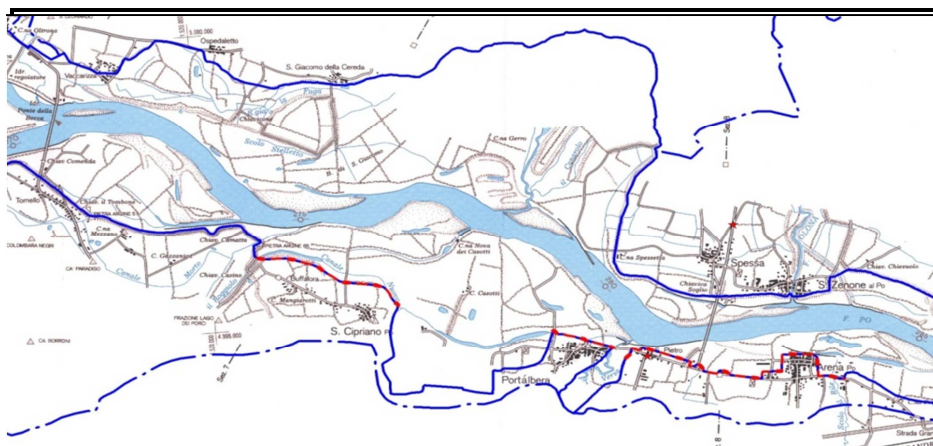


OPERE IDRAULICHE DI 2^A CATEGORIA

OPERE URGENTI E PRIORITARIE – CIRCONDARIO IDRAULICO DI PAVIA

Progetto n. 3283/PV

PV-E-1117 – Realizzazione dell'argine maestro nel Comune di San Cipriano Po (PV).



ELABORATO:

5

STUDIO IDRAULICO

GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

Progettista coordinatore:

Dott. Ing. Remo Passoni

Collaboratori:

Dott. Roberto Romagnoli

Geom. Antonio Cambieri

Geom. Mario Panniello

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Luigi Mille

PROGETTO:

3283/PV

PROTOCOLLO:

DATA:

AGGIORNAMENTO:

PROT. N.

DATA:

CONSULENZA ESTERNA



INDICE

1. PREMESSA	1
2. STUDIO IDRAULICO PRELIMINARE	5
3. INQUADRAMENTO DELL'INTERVENTO NELL'AMBITO DELL'ASSETTO DEL TRATTO DI FIUME PO INTERESSATO	7
4. VERIFICHE IDRAULICHE	12
4.1 Approccio metodologico	12
4.2 Costruzione e messa a punto del modello monodimensionale MIKE 11	13
4.3 Messa a punto del modello idrodinamico bidimensionale MIKE 21	16
4.3.1 Batimetria dello stato attuale	17
4.3.2 Batimetrie dello stato di progetto	19
4.4 Condizioni iniziali	20
4.5 Parametri idrodinamici del modello	22
4.6 Simulazione dell'evento dell'ottobre 2000 - SCENARIO 1 (taratura del modello)	23
4.7 Simulazione della piena con tempo di ritorno 200 anni nelle condizioni attuali - SCENARIO 2	31
4.8 Simulazione della piena con tempo di ritorno 200 anni nelle condizioni di progetto, con tracciato arginale coincidente con la fascia B di progetto - SCENARIO 3	34
4.9 Simulazione della piena con tempo di ritorno 200 anni nelle condizioni di progetto, con tracciato arginale in avanzamento rispetto alla fascia B di progetto - SCENARIO 4	39
4.10 Simulazione della piena con tempo di ritorno 200 anni nelle condizioni di progetto, con tracciato arginale in arretramento rispetto alla fascia B di progetto - SCENARIO 5	44
5. QUANTIFICAZIONE DEI VOLUMI DI INVASO E DELL'EFFETTO DI LAMINAZIONE	48
6. SINTESI DELLO STUDIO IDRAULICO – SCELTA DEL TRACCIATO DI PROGETTO	51
7. RESPONSABILITÀ NELLO SVILUPPO DEGLI ELABORATI	54

ALLEGATO 1 - Descrizione del modello idraulico MIKE11 HD

ALLEGATO 2 - Descrizione del codice di calcolo MIKE 21 - HD

ALLEGATO 3 - SCENARIO 1 - Mappe delle aree di esondazione a diversi istanti nel corso dell'evento di piena dell'ottobre 2000

ALLEGATO 4 - Risultati delle simulazioni con tempo di ritorno 200 anni negli scenari di progetto

1. PREMESSA

Il presente studio idraulico riguarda la realizzazione di un rilevato arginale nel Comune di San Cipriano Po (PV).

L'argine in progetto è individuato nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dell'Autorità di bacino del fiume Po per il completamento dell'assetto idraulico del Po (Cfr. Figura 1) e costituisce parte di un intervento più esteso verso valle, lungo la sponda destra, che prevede la protezione dai fenomeni di inondazione degli insediamenti principali (oltre a San Cipriano, Portalbera e Arena Po), storicamente non protetti rispetto alle piene del corso d'acqua (Cfr. Figura 2).

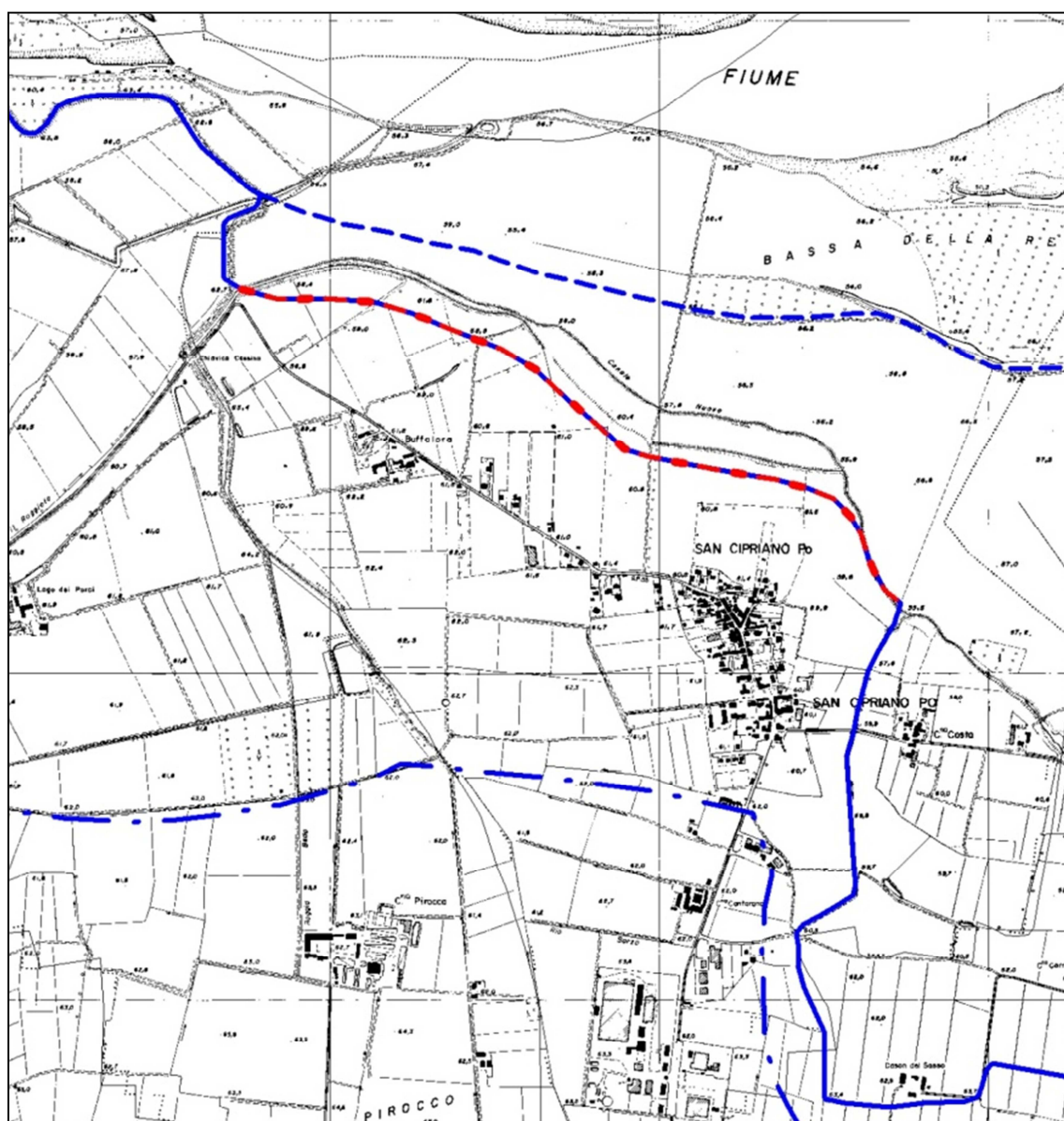


Figura 1 - Stralcio planimetrico della fascia B di progetto del PAI (tratteggio rosso) in corrispondenza dell'abitato di San Cipriano Po (in blu-continuo la fascia B; blu-tratteggiato la fascia A e blu-tratto-e-punto la fascia C).

La zona in questione si colloca in sponda destra, circa 3,5 km a valle della confluenza del Ticino, nel tratto dove l'alveo assume la connotazione definitiva di corso fluviale, con andamento sub-rettilineo, soprattutto a valle dell'abitato di San Cipriano, risultato di numerosi tagli artificiali di curve realizzati alla fine del 1800. Il tronco è ora sede di processi erosivi spondali di intensità significativa discretamente diffusi, e tale tendenza erosiva del canale di magra può essere interpretata come propensione a ristabilire la situazione pregressa; la caratteristica dell'alveo-tipo di moderata pluricursalità in passato, negli ultimi decenni tende ad assumere un carattere più marcatamente monocursale; alla diminuzione dei rami secondari si accompagna un lieve aumento degli ambienti di lanca, che rappresentano morfologie ereditate recenti.

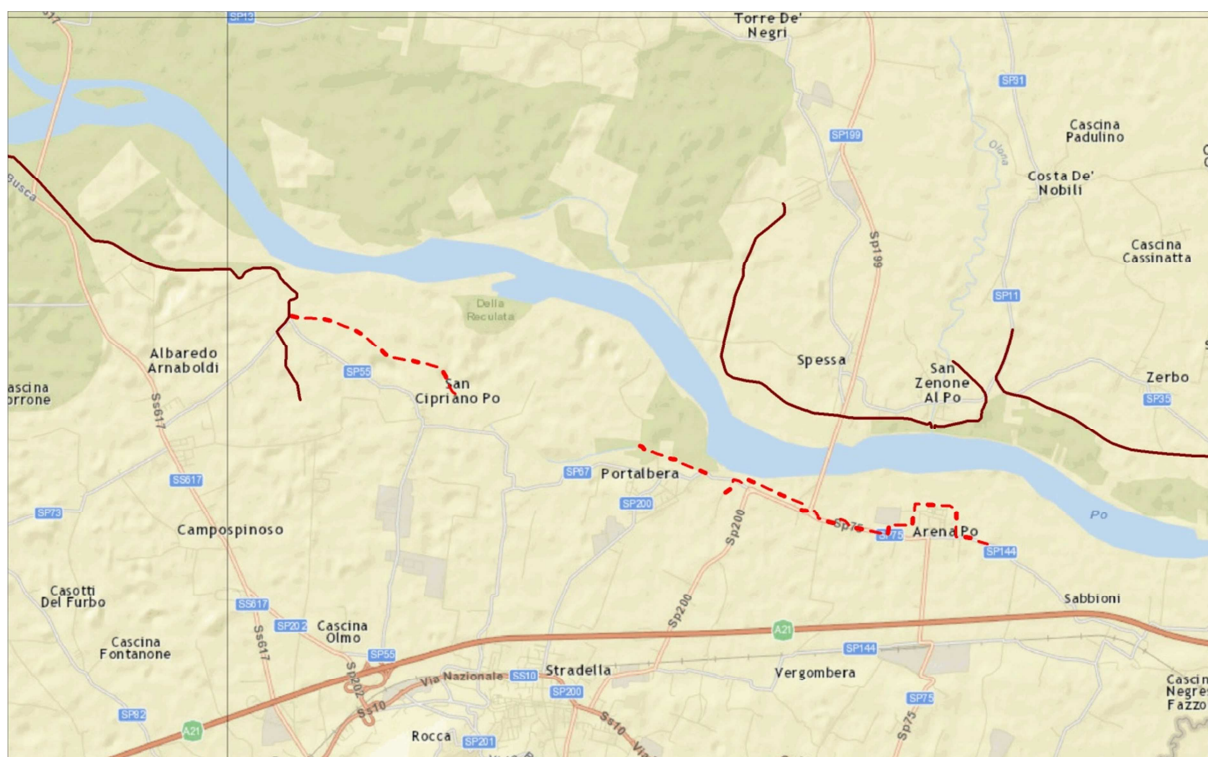


Figura 2 - Stralcio planimetrico del tratto di fiume Po a valle della confluenza del Ticino; in rosso tratteggiato sono rappresentate le fasce B di progetto in corrispondenza di San Cipriano, Portalbera e Arena Po; in marrone gli argini maestri principali.

Nella situazione attuale, il sistema arginale maestro continuo proveniente da monte in sponda destra si interrompe circa 2,3 km a ovest dell'abitato in questione e assume nuovamente caratteristiche di continuità all'altezza di Castel San Giovanni; in sinistra, dopo la confluenza del Ticino sono presenti unicamente modesti sistemi arginali locali fino al ponte di Spessa (SP 199) da dove riprende l'argine maestro che chiude con continuità il limite di inondazione.

Il territorio del comune di San Cipriano Po si estende per circa 8,7 km², di cui una parte significativa (circa il 55%) è costituita dalla golena bassa del Po (a quote comprese tra 56 e 58 m s.m.), quindi da aree inondabili con tempi di ritorno modesti, la cui destinazione d'uso è rivolta ad attività agricole di tipo estensivo.

Il terrazzo alto, che corre lungo la lanca Canale Nuovo, costituisce un limite morfologico destinato ad essere superato dai livelli di piena per tempo di ritorno dell'ordine di circa 20 anni. Sulla porzione di territorio

retrostante (45% del totale), che è in parte costituita dalla golena alta a quote comprese tra 59 e 61 m s.m., sono localizzati tutti gli insediamenti residenziali, la viabilità principale di collegamento e le attività produttive più importanti.

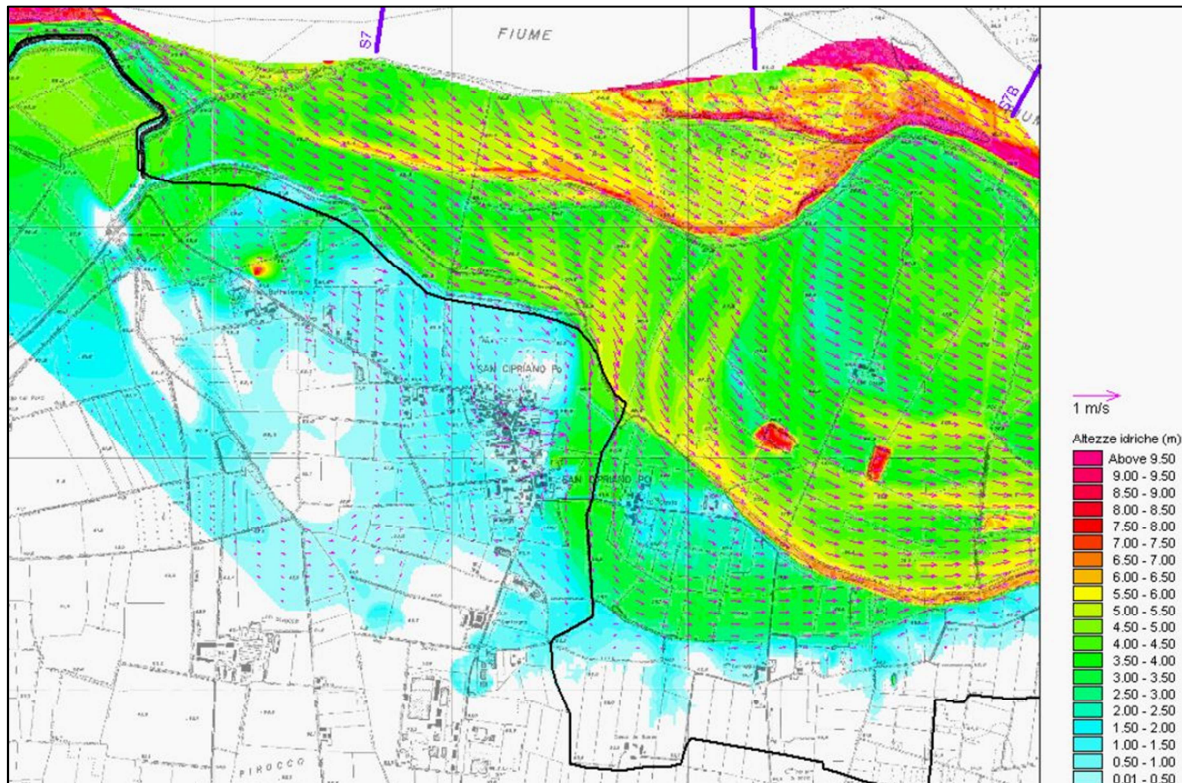


Figura 3 - Risultati della simulazione idraulica della piena dell'ottobre 2000 per il tratto di fiume Po in corrispondenza dell'abitato di San Cipriano (la linea nera rappresenta la fascia B del PAI).

Va considerato che nelle condizioni attuali, una porzione significativa di tale territorio è soggetta a inondazione per i tempi di ritorno più elevati; gli eventi recenti del 1994 e del 2000 hanno comportato l'allagamento di una porzione che supera abbondantemente la strada provinciale (Cfr. Figura 3); se si prende in considerazione la piena con tempo di ritorno di 200 anni, che comporta altezze d'acqua ancora superiori di circa un metro rispetto a quelle che si sono manifestate nei due eventi storici e che rappresenta – a norma di PAI – l'evento di riferimento per la definizione delle condizioni di rischio compatibile, si ottiene che circa l'80% della superficie del comune risulta inondata in occasione di un evento con tale frequenza probabile; in questa porzione di territorio sono collocati gran parte degli insediamenti abitativi, le attività agricole di maggior pregio e la strada di comunicazione principale.

Risulta evidente pertanto come l'opera in progetto, che punta a proteggere gli insediamenti e la viabilità principale, risulti un intervento essenziale per le condizioni socio-economiche del Comune.

Il grado di soggiacenza della parte del territorio del Comune che deve essere protetto rispetto alle piene storiche recenti più importanti è facilmente intuibile anche solo dal confronto dei livelli idrici al colmo raggiunti nelle stazioni idrometriche di monitoraggio stabile funzionanti nel tratto di asta di Po di interesse.

Stazione	1951	SIMPO '82	1994	"94+51"	2000
	colmo m s.m.	colmo m s.m.	colmo m s.m.	colmo m s.m.	colmo m s.m.
TICINO - BECCA	62,95	63,51	62,75	63,78	62,91
PORT'ALBERA - SPESSA	--	61,98	--	62,07	61,06
PIACENZA	52,41	52,06	52,04	52,59	52,76
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
TICINO - BECCA	11.250	12.000	11.500	13.600	--
PORT'ALBERA - SPESSA	11.200	--	--	--	--
PIACENZA	12.800	13.000	11.055	13.000	--

Una prima idea concreta della dimensione delle onde di piena che possono interessare l'area in studio si può avere osservando il confronto dei seguenti idrogrammi delle ultime tre piene più gravose lungo l'asta, relative rispettivamente al 1951, al 1994 e al 2000, nella stazione di Becca.

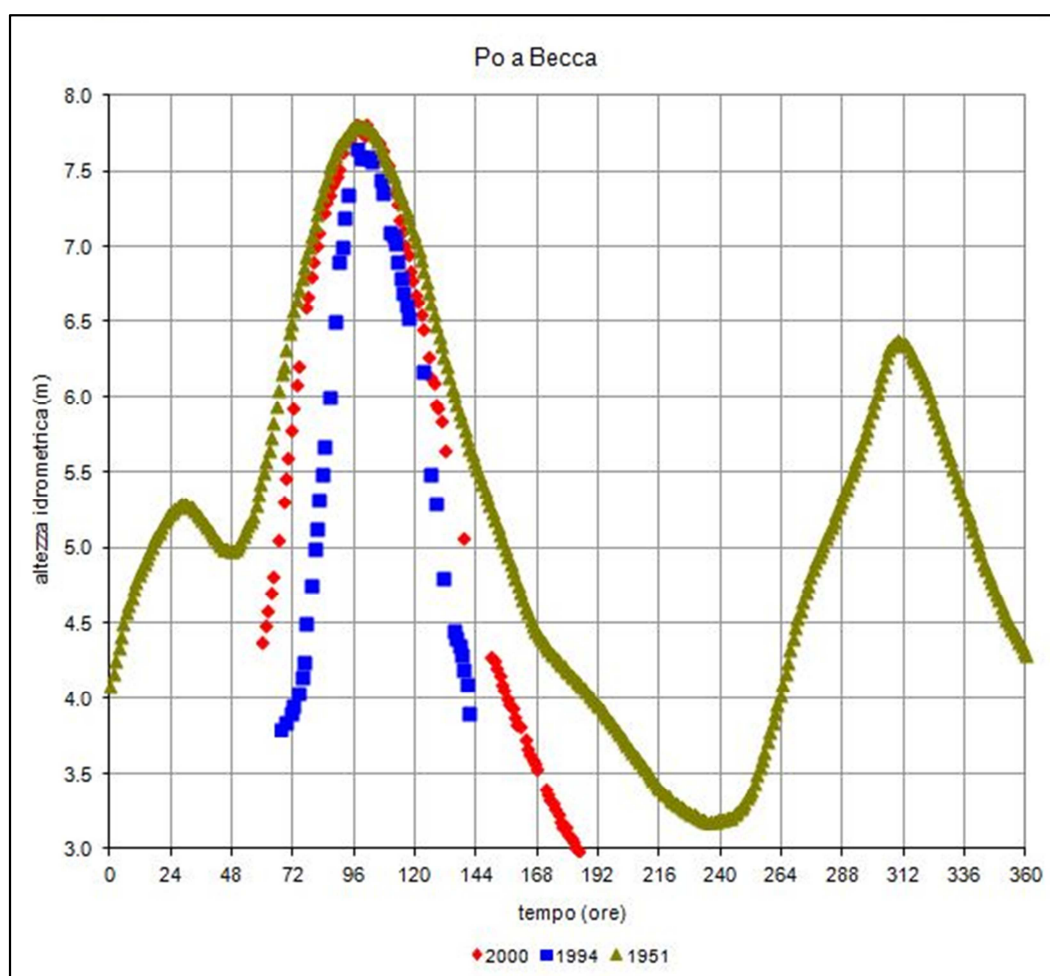


Figura 4 - Confronto nella stazione di misura di Becca (confluenza del Ticino) dell'andamento idrometrico delle onde di piena massime storiche (1951, 1994 e 2000).

Nel seguito si riporta lo studio idraulico che è stato svolto in via preliminare con lo scopo di approfondire le caratteristiche di comportamento idraulico in corso di piena del tratto di corso d'acqua interessato, nelle condizioni attuali e in quelle a seguito della realizzazione dell'intervento di arginatura previsto, di evidenziare gli effetti idraulici conseguenti all'inserimento dell'argine e di valutare le possibili opzioni di intervento con lo scopo di individuare la soluzione migliore.

In relazione ai risultati ottenuti, è stata adottata come soluzione da realizzare quella corrispondente allo "SCENARIO 5", a cui corrisponde un tracciato dell'argine posto in modo da ottenere il massimo arretramento compatibile rispetto alla fascia B di progetto e quindi posizionato al limite degli abitati da proteggere fino a poco oltre il concentrico del comune; successivamente il percorso raggiunge C.na Costa e ripiega a chiudere verso sud.

2. STUDIO IDRAULICO PRELIMINARE

Come già detto in premessa, l'argine in progetto è individuato nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico dell'Autorità di bacino del fiume Po (PAI) come intervento da realizzare per il completamento dell'assetto idraulico del Po; il suo tracciato è definito, come fascia B di progetto, nell'ambito della delimitazione delle fasce fluviali.

La fascia B di progetto di San Cipriano Po inizia in prossimità della Chiavica Cassino, dove l'argine maestro proveniente da monte svolta verso l'interno per terminare alcune centinaia di metri oltre; prosegue con andamento parallelo al colatore Canale Nuovo (a una distanza di 100÷150 m) fin oltre l'abitato di San Cipriano, dove si avvicina alla sponda del colatore, e termina in corrispondenza della fascia B naturale, sulla sponda sinistra della roggia Bado che proviene dall'abitato di Stradella, posto a sud. La lunghezza complessiva è di circa 2,4 km (Cfr. Figura 1).

Lo studio è stato impostato in modo da approfondire in termini specifici le caratteristiche di comportamento idraulico in corso di piena del tratto di corso d'acqua interessato, nelle condizioni attuali e in quelle a seguito della realizzazione dell'intervento di arginatura previsto.

Lo studio è stato eseguito in accordo alla normativa vigente del (PAI), facendo riferimento in particolare alla *"Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica"* e all'assetto di progetto previsto nel PAI stesso per il tratto di corso d'acqua indicato. Si è inoltre tenuto conto di quanto prescritto nel Regolamento attuativo (approvato ai sensi dell'art. 44, comma 1, NA del PAI con la deliberazione del C.I. n. 11/2006 del 5 aprile 2006) relativo agli *"Adempimenti necessari ai fini dell'adozione della deliberazione di presa d'atto del collaudo delle opere programmate per la difesa del territorio e indicate con segno grafico denominato "limite di progetto tra la fascia B e la fascia C"* (art. 28 delle NA).

L'analisi idrodinamica è stata condotta mediante la messa a punto e l'applicazione di un modello numerico di simulazione, basato sul codice di calcolo MIKE Flood del DHI^{Water Environment Health}, in grado di descrivere tutti i fenomeni rilevanti per lo studio: il modello combina dinamicamente l'approccio monodimensionale lungo l'alveo inciso del Po (codice di calcolo MIKE 11) e quello bidimensionale sulle aree golenali (codice di calcolo MIKE 21).

Il modello è stato implementato con riferimento allo stato di fatto del corso d'acqua e a diverse configurazioni di progetto, con l'obiettivo di individuare la soluzione migliore dal punto di vista del funzionamento idraulico sia a livello locale sia rispetto agli eventuali effetti a valle.

La taratura è stata effettuata con riferimento alla piena più gravosa recente, rappresentata dall'evento dell'ottobre 2000, che uguaglia le massime altezze idrometriche storiche, considerando naturalmente le attuali condizioni di assetto geometrico dell'alveo del corso d'acqua (SCENARIO 1).

Una volta concluse le operazioni di implementazione e di taratura, le simulazioni sono state svolte con riferimento allo scenario idrologico rappresentato dall'onda di piena denominata "94+51", definita nella Direttiva "*Piena di progetto*" del PAI come rappresentativa per l'asta del fiume Po di un evento temibile caratterizzato da un valore della portata al colmo corrispondente al tempo di ritorno di 200 anni lungo l'intero corso d'acqua a valle della confluenza del fiume Tanaro.

Tale piena, e il corrispondente profilo dei livelli idrici massimi, sono adottati dal PAI come dati di progetto per il dimensionamento idraulico delle arginature maestre.

La costruzione del profilo deriva dalla simulazione idraulica, dalla confluenza del Tanaro al mare, effettuata mediante un modello numerico monodimensionale applicato a una piena teorica ottenuta dalla combinazione dell'evento del 1994 (massima piena storica dopo quella del 1951) a cui sono aggiunti gli apporti dei principali affluenti che si sono verificati nel corso della piena del 1951 (massima onda piemontese + massima onda nel tratto medio-basso del corso d'acqua). 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 nelle stesse stazioni per il tempo di ritorno di 200 anni. Il profilo dei livelli massimi risulta quindi adeguato al criterio generale posto dal PAI che fissa tale tempo di ritorno come dato di progetto per i corsi d'acqua del bacino, inteso come l'evento idrologico più gravoso per il quale le opere strutturali di controllo dei fenomeni di piena devono assicurare condizioni di sicurezza.

Il profilo dei livelli idrici massimi sopra citato è riportato nella Direttiva del PAI; le modalità di costruzione dello stesso, appoggiate a un modello di simulazione di tipo 1D e a una descrizione della geometria dell'alveo derivata dalle sezioni trasversali ad interasse piuttosto ampio (sezioni Brioschi) viene considerato come dato di riferimento di prima approssimazione, coerente con il livello di dettaglio proprio di uno strumento di pianificazione quale è il PAI.

L'analisi idraulica condotta, in coerenza con le finalità connesse alla realizzazione dell'argine di protezione dell'abitato di San Cipriano Po, ha radicalmente incrementato il grado di dettaglio delle simulazioni condotte, assumendo al contorno del tronco di corso d'acqua l'input idrologico rappresentato dall'onda di piena in portata che rappresenta l'evento di progetto (piena "94+51") e andando a ricostruire per tutto il tratto le grandezze idrodinamiche sulla base dell'applicazione del modello 2D.

La descrizione della geometria dell'alveo di piena è avvenuta mediante l'utilizzo delle informazioni topografiche più aggiornate disponibili, rappresentate rispettivamente dalle sezioni trasversali dell'alveo derivanti dal rilievo AIPO 2004-2005, dal rilievo laser-scanner 2004-2005 a celle 2x2 m dell'Autorità di bacino e dal rilievo fotogrammetrico in corrispondenza dell'abitato di San Cipriano messo a disposizione dal Comune.

Con riferimento all'assetto geometrico attuale dell'alveo di piena del Po nel tratto in corrispondenza all'abitato di San Cipriano considerato come condizione di paragone (SCENARIO 2), sono stati costruiti tre possibili scenari di progetto, in funzione di diverse ipotesi di tracciato planimetrico dell'argine, che sono stati oggetto delle simulazioni idrauliche per permettere valutazioni di confronto e individuare la soluzione migliore:

- tracciato dell'argine in progetto coincidente, per estensione e posizione planimetrica, con quello della fascia B di progetto del PAI (SCENARIO 3);
- tracciato dell'argine in progetto che, partendo a monte dalla chiavica Cassino, segue l'arginello esistente in sponda destra del colatore Canale Nuovo (in posizione leggermente avanzata verso fiume rispetto alla fascia B di progetto) e prosegue in sostanziale coincidenza con la fascia B di progetto fino in corrispondenza del concentrico di San Cipriano; successivamente l'argine si prolunga verso valle, attraversando con una chiavica la roggia Bado, e raggiunge la frazione di C.na Costa per consentirne la protezione degli insediamenti presenti; infine piega verso sud e si collega al tracciato della fascia B in modo da contenere i livelli idrici di valle (SCENARIO 4);
- tracciato dell'argine in arretramento rispetto alla fascia B di progetto, posizionato al limite degli abitati da proteggere fino a poco oltre il concentrico del Comune; successivamente il percorso è sostanzialmente coincidente con quello dello SCENARIO 4 per tutto il resto del tratto che raggiunge C.na Costa e ripiega a chiudere verso sud (SCENARIO 5).

3. INQUADRAMENTO DELL'INTERVENTO NELL'AMBITO DELL'ASSETTO DEL TRATTO DI FIUME PO INTERESSATO

Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) contiene, tra le altre cose, la definizione dell'assetto di progetto del fiume Po, individuato in specifico dalla delimitazione delle fasce fluviali, a cui sono associate le norme di limitazione dell'uso del suolo, e dall'individuazione degli interventi strutturali necessari al conseguimento di condizioni di "rischio compatibile", rappresentati prevalentemente dalla fascia B di progetto, che individua l'esigenza della realizzazione di nuove arginature.

Nel caso di interesse, per il tratto di Po a valle della confluenza del Ticino, è previsto l'estensione del sistema arginale storicamente esistente lungo la sponda destra, con la realizzazione di nuovi argini (fascia B di progetto) in corrispondenza degli abitati di San Cipriano Po, Portalbera e Arena Po (Cfr. Figura 5).

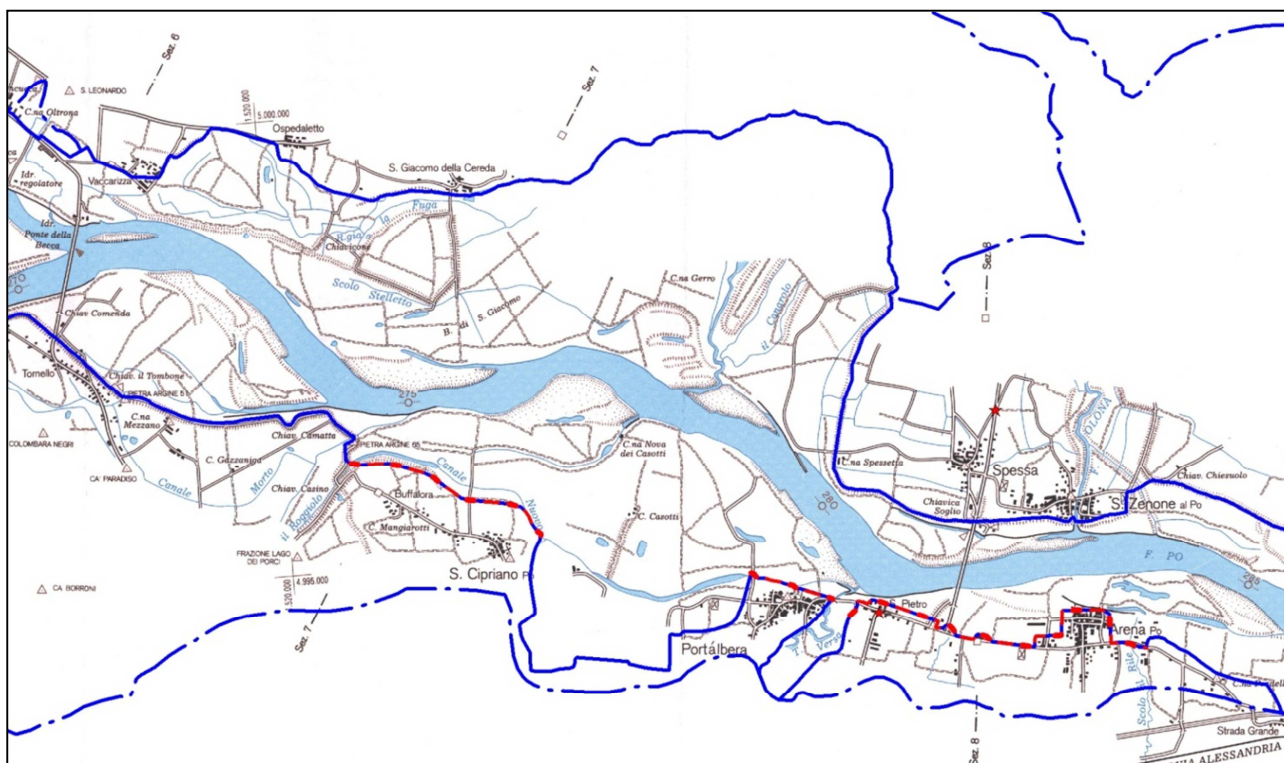


Figura 5 - Cartogramma, su base 1:50.000 di AIPO del tratto di fiume Po a valle della confluenza del fiume Ticino con evidenziati i tratti di fascia B di progetto in sponda destra in corrispondenza degli abitati di San Cipriano Po, Portalbera e Arena Po.

L'inquadramento idrologico e idraulico del tronco è contenuto nel PAI, che definisce le portate e le onde di piena di riferimento, nonché, per tutto il tratto tra la confluenza del Tanaro e il Delta, il profilo di progetto rispetto al quale definire la quota di ritenuta degli argini maestri.

La Direttiva "Piena di progetto" allegata al PAI contiene i valori delle portate massime al colmo di assegnata frequenza probabile che derivano dall'applicazione delle procedure di analisi statistica alle serie storiche disponibili nelle diverse stazioni di misura presenti lungo l'asta (Cfr. Figura 6).

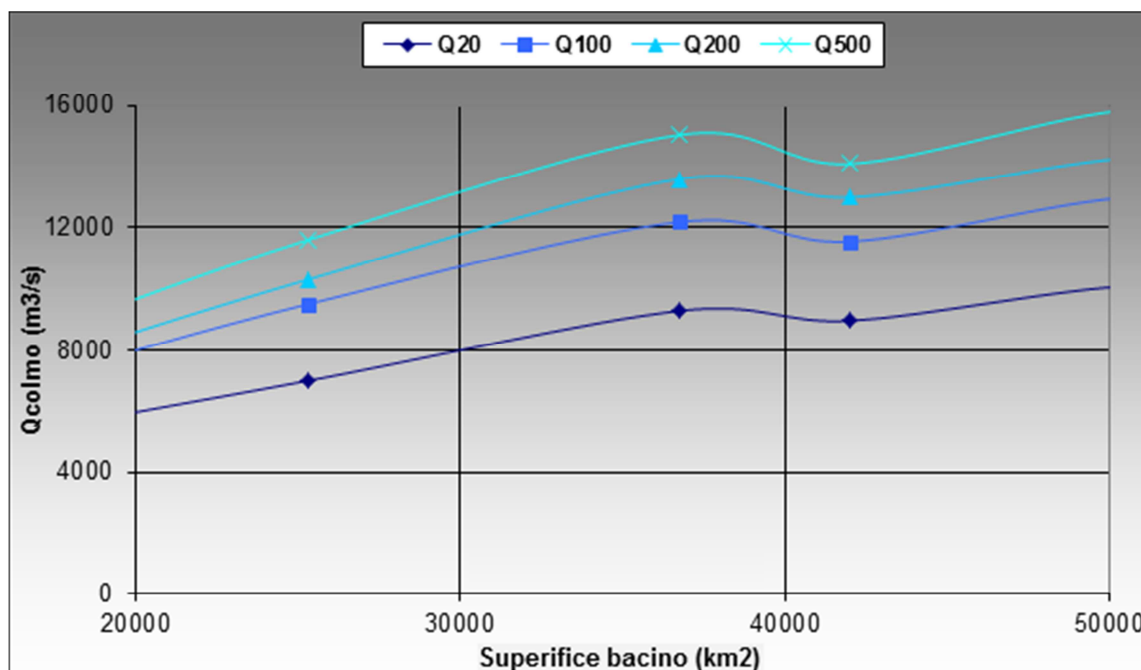


Figura 6 - Andamento delle portate di piena al colmo definite nella Direttiva "Piena di progetto" del PAI in funzione della superficie del bacino idrografico sotteso lungo l'asta del Po rispettivamente nelle stazioni di Isola Sant'Antonio (25.320 km²), Becca (36.770 km²) e Piacenza (42.030 km²).

Successivamente, tramite un incarico affidato al DIIAR del Politecnico di Milano, l'Autorità di bacino ha messo a punto una metodologia che consente di ricavare, oltre alla stima della portata al colmo con procedure di tipo stocastico, idrogrammi di pari tempo di ritorno rispetto a quello delle portate, il che ha comportato la stima con metodi statistici dei volumi di piena e della forma dell'idrogramma (Cfr. Figura 7).

Nella Direttiva prima citata è inoltre riportato il profilo di riferimento per il dimensionamento degli argini maestri, *Profilo PAI* ("94+51"), costruito tramite simulazione idraulica quasi-bidimensionale, nel tratto dalla confluenza del Tanaro al mare, applicata a una piena teorica ottenuta dalla combinazione dell'evento del 1994 a cui sono stati aggiunti gli apporti dei principali affluenti che si sono verificati nel corso della piena massima storica del 1951.

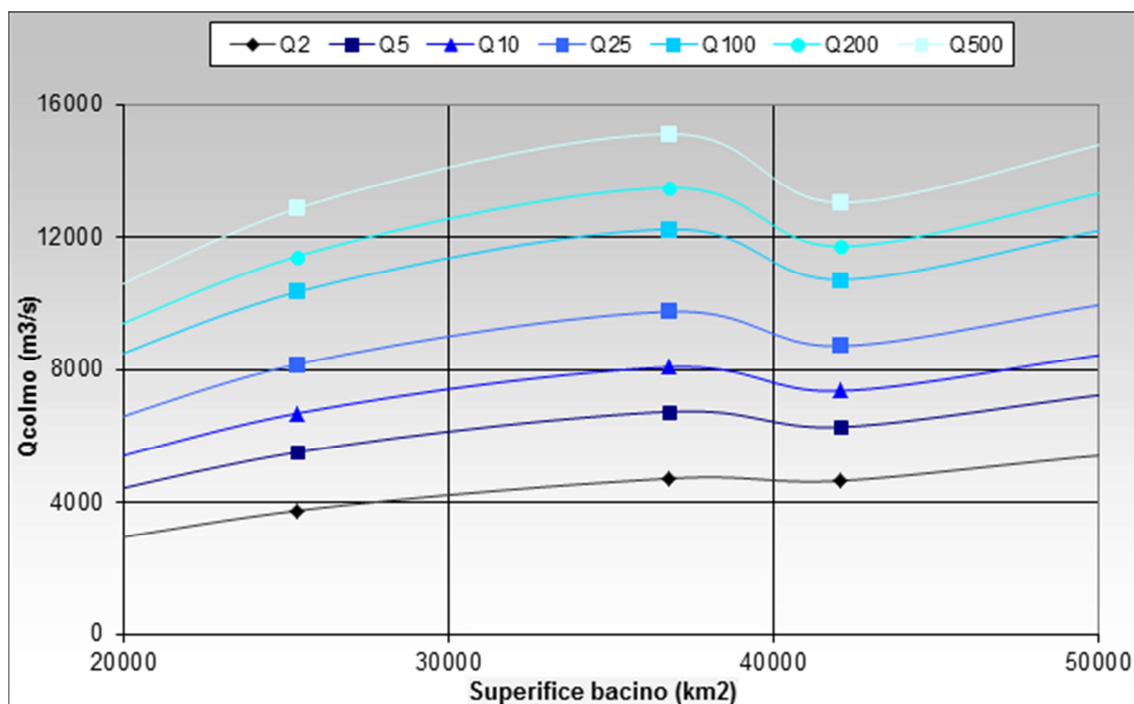


Figura 7 - Andamento delle portate di piena al colmo definite dal DIIAR del Politecnico di Milano in funzione della superficie del bacino idrografico sotteso lungo l'asta del Po rispettivamente nelle stazioni di Isola Sant'Antonio (25320 km²), Becca (36770 km²) e Piacenza (42030 km²).

I risultati sono affiancati a quelli del *Profilo SIMPO '82*, derivanti dallo studio omonimo, che sono stati utilizzati in precedenza dal Magistrato per il Po per l'adeguamento in quota e in sagoma delle arginature maestre esistenti lungo l'asta.

Sez.	Progr. (km)	Rif. sez. Brioschi	Rif. sez. SIMPO '82	T = 200 anni	SIMPO '82
				Quota idrometrica (m s.m.)	Quota idrometrica (m s.m.)
082	264.855	6-TICINO	234	63.78	63.51
081	269.665	7	231	63.24	63.12
080	276.570	8-PORTALBERA	227	62.07	61.98
079	281.895	9	224	61.11	60.87
078	284.500	PONTE S.S. 412		61.00	60.44
077	289.300	10	220	59.87	59.65

Figura 8 - Stralcio della tab. 33 - "Profilo di piena per il Po nel tratto da Isola Sant'Antonio al Delta" della Direttiva "Piena di progetto" del PAI relativo al tratto di interesse, compreso tra la confluenza di Ticino e il ponte che collega Port'albera con Spessa.

E' possibile osservare (che il profilo di piena del tratto contiene una sola sezione di calcolo delle altezze idriche in corrispondenza dell'abitato di San Cipirano Po (sez. 7); la sezione di monte più prossima è quella in corrispondenza della confluenza del Ticino (circa 4.800 m a monte) mentre quella di valle è posta all'altezza di di Portalbera (distante circa 6.900 m).

Successivamente al PAI, sono stati svolti altri approfondimenti circa i profili di piena per le condizioni di progetto delle arginature di Po, sempre tramite l'applicazione di strumenti numerici di simulazione di carattere monodimensionale estesi all'intera asta, che tengono conto sia di aggiornamenti della geometria dell'alveo, sia di miglioramenti nelle modalità di simulazione e di taratura del modello, soprattutto alla luce dell'evento di piena dell'ottobre 2000.

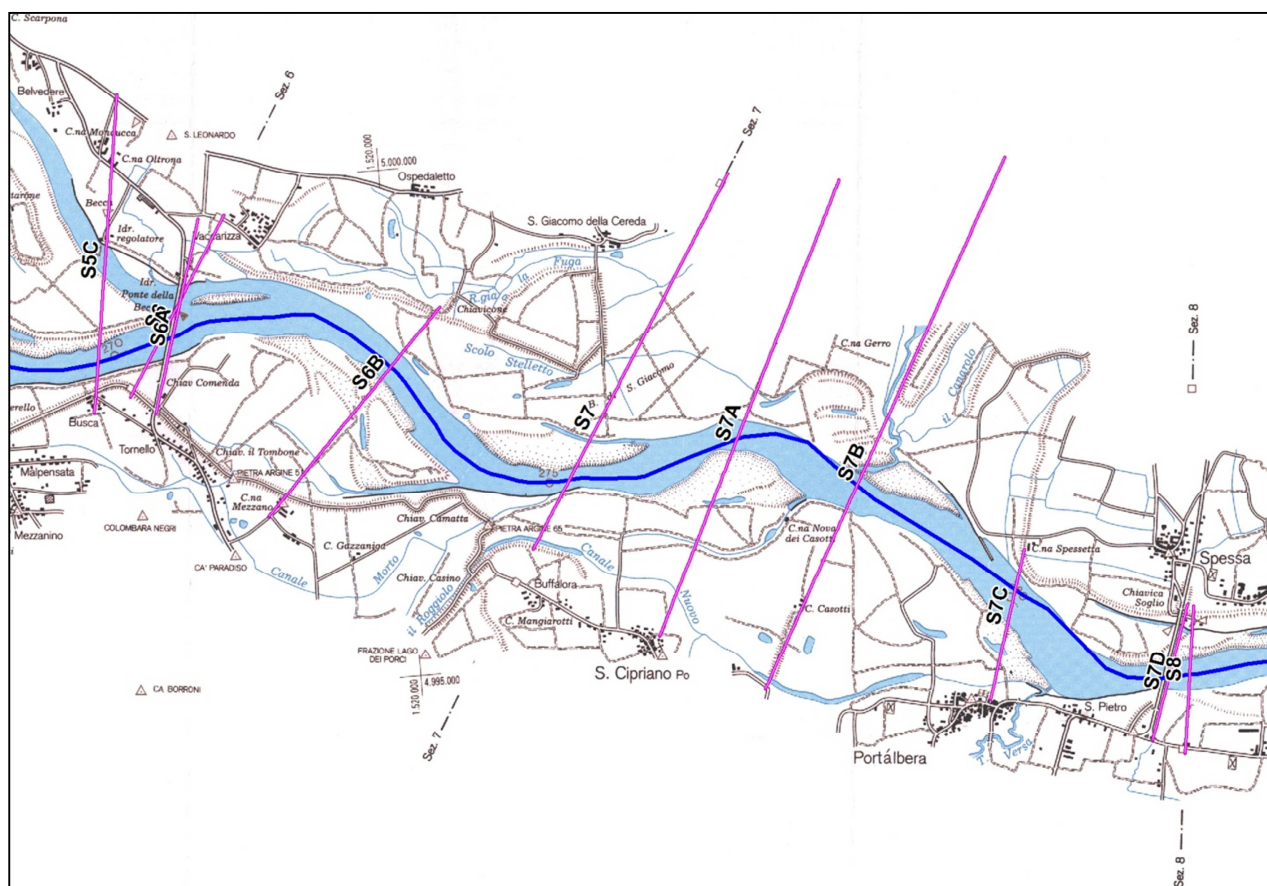


Figura 9 - Stralcio planimetrico dell'alveo del fiume Po con indicazione delle sezioni trasversali di rilievo topografico (sezioni Brioschi e relativi infittimenti).

Utilizzando il rilievo topografico del Magistrato per il Po degli anni 1999 -2000, sono state effettuate le seguenti simulazioni:

- piena ottobre 2000 (taratura del modello);
- aggiornamento piena "94+51";
- piena "2000+51", costruita come la precedente, tendendo conto che all'uscita del territorio piemontese (Isola Sant'Antonio) la piena del 2000 è risultata più gravosa rispetto a quella del 1994;
- piene sintetiche con tempo di ritorno di 200 anni per ciascuna stazione di misura sull'asta, derivanti dalle elaborazioni del DIIAR del Politecnico di Milano.

Ulteriori elementi che concorrono alla definizione dell'assetto attuale e di progetto (come definito negli strumenti di pianificazione) del corso d'acqua sono rappresentati:

- dallo studio "Caratterizzazione geomorfologica dell'alveo del fiume Po e delle aree inondabili" redatto dall'Autorità di bacino del fiume Po, in cui è stata elaborata una carta geomorfologica di dettaglio ottenuta

attraverso la fotointerpretazione eseguita su foto aeree del 1994/95, 2000, 2002 e su ortofoto AIMA del 1994/96 alla scala 1:25.000 e di dettaglio alla scala 1:10.000;

- dal “Programma di gestione dei sedimenti dell’alveo del fiume Po” (Stralcio confluenza Tanaro - confluenza Arda) in cui il tema è affrontato a un buon livello di dettaglio lungo l’intera asta fluviale, con una cartografia alla scala 1:25.000 che definisce rispettivamente l’assetto attuale, le tendenze evolutive di caratteri geomorfologici, gli obiettivi da conseguire e gli interventi da porre in atto.

In conclusione l’onda di piena di progetto con tempo di ritorno 200 anni utilizzata per le verifiche idrauliche (denominata “94+51”) assume nel tratto fluviale in esame un valore al colmo circa pari a **13.600 m³/s** (valore di progetto pubblicato nella sopracitata Direttiva), con una forma e un volume corrispondenti all’idrogramma rappresentato nella Figura 10.

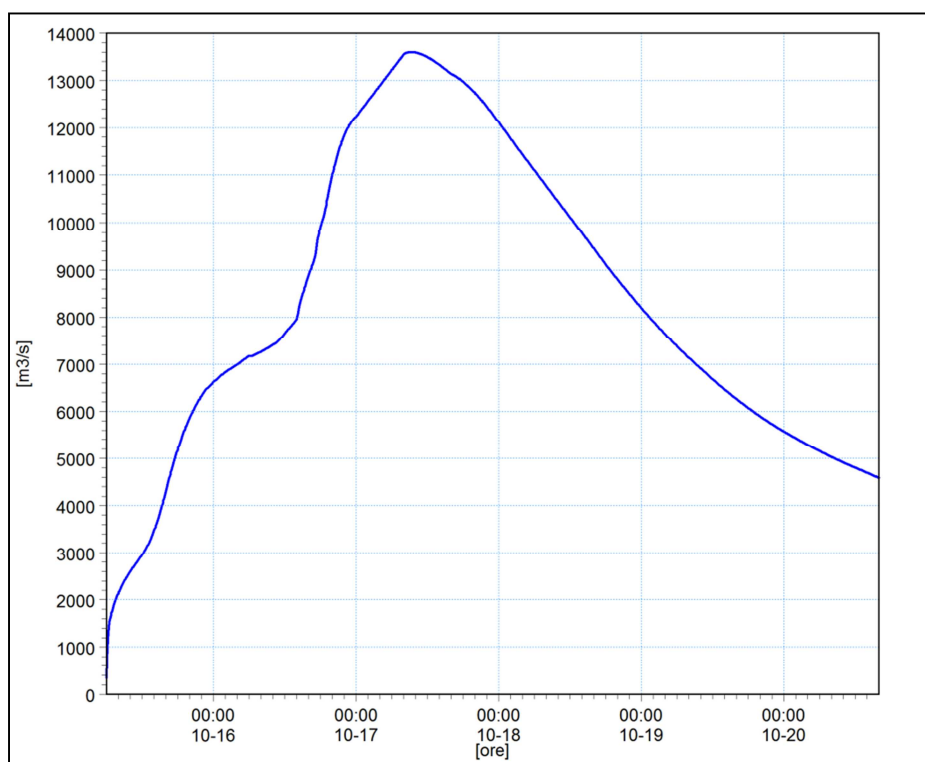


Figura 10 - Idrogramma di progetto con tempo di ritorno 200 anni (“94+51”) a valle della confluenza Ticino.

4. VERIFICHE IDRAULICHE

4.1 Approccio metodologico

Al fine di descrivere con approfondito dettaglio la propagazione idrodinamica delle onde di piena dell’evento dell’ottobre 2000 e dell’evento di progetto con tempo di ritorno 200 anni (“94+51”), è stato messo a punto un modello numerico basato sul codice di calcolo **MIKE Flood** del DHI_{Water Environment Health} che combina dinamicamente l’approccio monodimensionale e quello bidimensionale. Nel caso in esame il deflusso in piena del Po è stato modellizzato come segue:

- con approccio monodimensionale per quanto attiene l’alveo inciso del Po, attraverso l’inserimento delle sezioni trasversali di rilievo eseguite negli anni 2004-2005 dall’AIPO, nel tratto compreso tra la confluenza

del Ticino (ponte della Becca) e il ponte di Spessa, manufatti di attraversamento su cui sono presenti due stazioni idrometriche di misura;

- con approccio bidimensionale per quanto attiene le golene presenti sia in sponda destra che in sponda sinistra; l'interscambio di portata tra l'alveo inciso e gli ambiti golenali avviene tramite collegamenti dinamici, rappresentati da speciali strutture laterali di sfioro previste dal codice MIKE Flood, che consentono l'allagamento delle golene stesse nel rispetto delle quote dei limiti naturali del terreno (quote di ciglio sponda, orli di terrazzi, alti morfologici ecc.) o delle opere artificiali in rilevato esistenti (argini, infrastrutture viarie ecc.). La modellizzazione accurata della dinamica di piena, effettuata con approccio bidimensionale, è stata estesa all'intero territorio di possibile esondazione (oltre i limiti della fascia B), sia in sponda destra che in sponda sinistra. La geometria del territorio è stata rappresentata mediante un modello digitale del terreno (detto "batimetria") a celle quadrate di lato 10x10 m, ricavato dal rilievo LIDAR a celle quadrate 2x2 m eseguito dall'Autorità di bacino del fiume Po negli anni 2004-2005, opportunamente integrato da un rilievo fotogrammetrico in corrispondenza dell'abitato di San Cipriano messo a disposizione dal Comune.

Il codice di calcolo MIKE Flood è uno strumento modellistico integrato che permette di accoppiare in maniera dinamica, attraverso un'interfaccia utente grafica, il codice monodimensionale MIKE 11 e quello bidimensionale MIKE 21 (le descrizioni sintetiche dei due codici sono riportate rispettivamente negli allegati 1 e 2).

MIKE Flood consente di sfruttare al massimo le potenzialità di MIKE 11 e di MIKE 21, facendo intervenire nell'ambito di uno stesso modello l'uno o l'altro codice in funzione delle specifiche esigenze di rappresentazione geometrica e di simulazione necessarie:

- MIKE 11 per la simulazione monodimensionale di tratti di alveo incisi non coperti da un DTM (modello digitale del terreno) e per il deflusso idrodinamico attraverso ponti, tombini, salti di fondo ecc.;
- MIKE 21 per il deflusso nelle aree golenali o di esondazione e di invaso coperte da un DTM.

MIKE Flood è caratterizzato dal fatto che MIKE 11 e MIKE 21 rimangono singoli codici indipendenti l'uno dall'altro nella messa a punto e nell'input-output, mentre una specifica interfaccia grafica consente di definire i collegamenti reciproci e biunivoci di MIKE 11 e MIKE 21 per gli interscambi di portata e di quantità di moto e per la congruenza dei livelli idrici di calcolo.

Nel caso in esame è stato messo a punto un modello MIKE Flood nel modo seguente:

- modello MIKE 11 monodimensionale per la rappresentazione dell'alveo inciso del Po;
- modello MIKE 21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree golenali allagabili;
- connessione dinamica dei modelli MIKE 11 e MIKE 21: il collegamento dinamico è di tipo "laterale" lungo tutto lo sviluppo di entrambe le sponde dell'alveo inciso del Po.

4.2 Costruzione e messa a punto del modello monodimensionale MIKE 11

Ai fini della messa a punto del modello MIKE Flood si è realizzato innanzitutto il modello monodimensionale dell'alveo inciso del Po utilizzando il codice di calcolo MIKE 11 HD (modulo idrodinamico) descritto nell'allegato 1.

La geometria dell'alveo inciso del corso d'acqua è stata rappresentata sulla base del rilievo AIPO 2004-2005, costituito da 10 sezioni trasversali (dalla 5C alla 7D) localizzate lungo un tratto d'asta di lunghezza circa pari a

12.100 m. In particolare il rilievo ha inizio nella sezione 5C localizzata a monte del ponte della Becca (ubicato sul nodo di confluenza Ticino-Po) e termina in corrispondenza del filo lato monte del ponte di Spessa.

La schematizzazione geometrica dell'alveo è stata eseguita in modo da contenere i livelli di piena entro le sponde incise del Po, tenendo conto delle caratteristiche morfologiche del corso d'acqua e delle strutture interferenti con il moto.

In corrispondenza del ponte della Becca è stata duplicata la sezione 6 di rilievo in modo da rappresentare l'ingombro planimetrico dell'attraversamento.

Una rappresentazione grafica dell'intero modello monodimensionale è riportata nella Figura 11, in cui in rosso sono evidenziate le sezioni d'alveo utilizzate e in blu l'asse del corso d'acqua.

Nella Tabella 1 sono riportate la denominazione delle sezioni di rilievo, la loro distanza progressiva metrica e la quota di fondo alveo (thalweg).

Denominazione Sezione	Progressiva (m)	Quota fondo alveo (m s.m.)
5C	268557,88	51,13
6 monte Becca	269177,00	48,29
6 valle Becca	269237,00	48,29
6A	269330,88	48,98
6B	271699,41	48,76
7	273955,59	47,32
7A	275671,81	48,26
7B	277027,19	47,84
7C	278899,19	48,95
7D	280662,00	44,89

Tabella 1 - Sezioni trasversali d'alveo del fiume Po inserite nel modello monodimensionale.

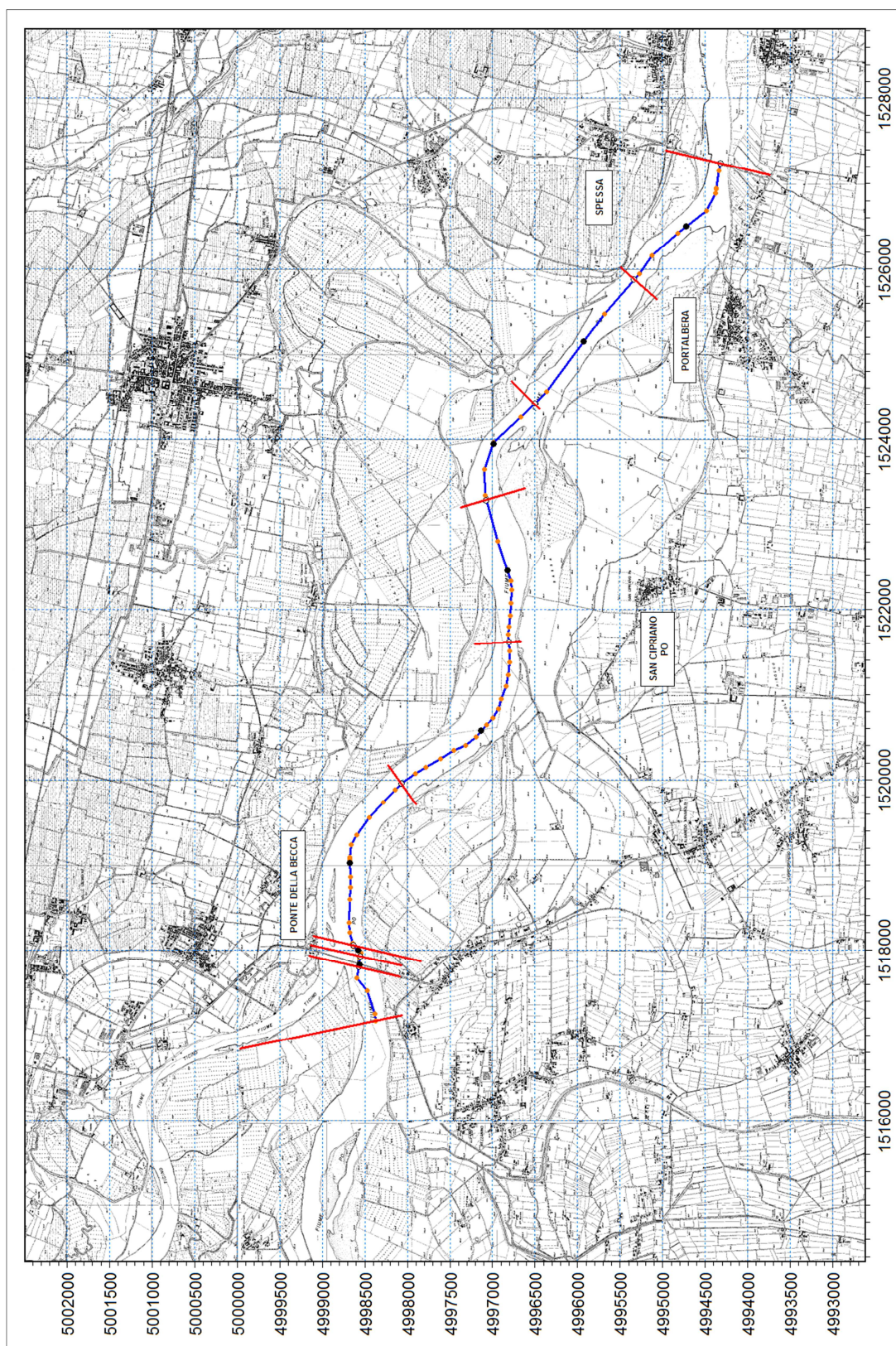


Figura 11 - Rappresentazione planimetrica di dettaglio del tratto di modello monodimensionale (MIKE 11).

L'attraversamento della Becca, è stato schematizzato nell'ambito del modello con una struttura tipo "culvert", di forma geometrica variabile secondo una relazione quota-larghezza che tiene conto della luce di deflusso netta compresa tra le spalle dell'attraversamento (escludendo quindi l'area trasversale occupata dalle pile).

Tale assunzione risulta valida, in quanto il comportamento della corrente è regolato principalmente dal restringimento della sezione in presenza del ponte e dalle perdite di carico concentrate dovute allo stesso, più che da quelle distribuite lungo la struttura.

4.3 Messa a punto del modello idrodinamico bidimensionale MIKE 21

Per la messa a punto del modello MIKE Flood, dopo aver realizzato il modello monodimensionale dell'alveo inciso con il codice MIKE 11 HD, si è proceduto alla costruzione del modello bidimensionale delle aree golenali allagabili sia in destra che in sinistra idraulica del Po, utilizzando il codice di calcolo MIKE 21 HD descritto nell'allegato 2.

In seguito, utilizzando il codice MIKE Flood, si è proceduto all'accoppiamento dei due modelli (monodimensionale e bidimensionale) mediante collegamenti laterali distribuiti lungo le sponde incise del corso d'acqua.

In un modello bidimensionale alle differenze finite, come MIKE 21, la descrizione geometrica del terreno è eseguita definendo la quota media del terreno in ogni cella di calcolo. Tale valore è usualmente calcolato, a partire dai dati rilevati, mediante tecniche di interpolazione.

Nel caso attuale la geometria del modello è stata interpolata a partire dai punti quotati appartenenti al DTM (rilievo LIDAR a celle 2x2 m) realizzato dall'Autorità di bacino del fiume Po, integrato con il rilievo fotogrammetrico del Comune di San Cipriano.

Nella Figura 12 è riportata una corografia dell'area di indagine con evidenziati il contorno della batimetria di calcolo del modello 2D (di colore blu) ed il ramo del modello monodimensionale; l'immagine di colore fucsia rappresenta il rilievo fotogrammetrico del Comune di San Cipriano.

Fondamentale è stata la definizione della dimensione del passo della griglia rettangolare da utilizzare per la messa a punto del modello, che influenza direttamente i tempi di calcolo e l'accuratezza spaziale della soluzione. All'aumentare del passo della griglia diminuiscono i tempi di calcolo, ma diminuisce l'accuratezza spaziale. La scelta deve quindi essere un compromesso tra le due esigenze.

Nel caso in esame la scelta è stata dettata prevalentemente dall'esigenza di rappresentare bene la geometria delle aree esondabili e non quella dell'alveo inciso, già rappresentata con il modello 1D. Si è deciso pertanto di adottare una griglia di calcolo a maglia 10x10 m.

La griglia presenta complessivamente 739 righe e 788 colonne per un totale di 582.332 celle di calcolo.

Ricostruita la topografia del terreno, è stato necessario apportare le dovute correzioni alle quote della griglia 10x10 m in modo da rappresentare correttamente gli elementi che possono condizionare maggiormente la simulazione idrodinamica di un evento di esondazione, ovvero le quote effettive di rilievo dei principali elementi "sovramontanti" (argini maestri e golenali, rilevati stradali, muri divisorii, ingombro abitazioni ecc.).

4.3.1 Batimetria dello stato attuale

Nella Figura 13 è riportata la batimetria complessiva del modello (o geometria di input) relativa alla situazione attuale. L'immagine mostra come il modello geometrico del territorio sia esteso oltre i limiti delle Fasce Fluviali determinate dal PAI, contraddistinte da colore nero (fascia B) e di colore rosa (fascia B di progetto).

Occorre infine osservare come l'intero alveo inciso del Po sia stato escluso dalla simulazione con il modello bidimensionale MIKE 21 perché il suo contributo al deflusso delle piene è già simulato con il modello monodimensionale MIKE 11 nell'ambito del codice MIKE Flood che è in grado, come già detto, di "accoppiare" in contemporanea il funzionamento di entrambi i singoli modelli.

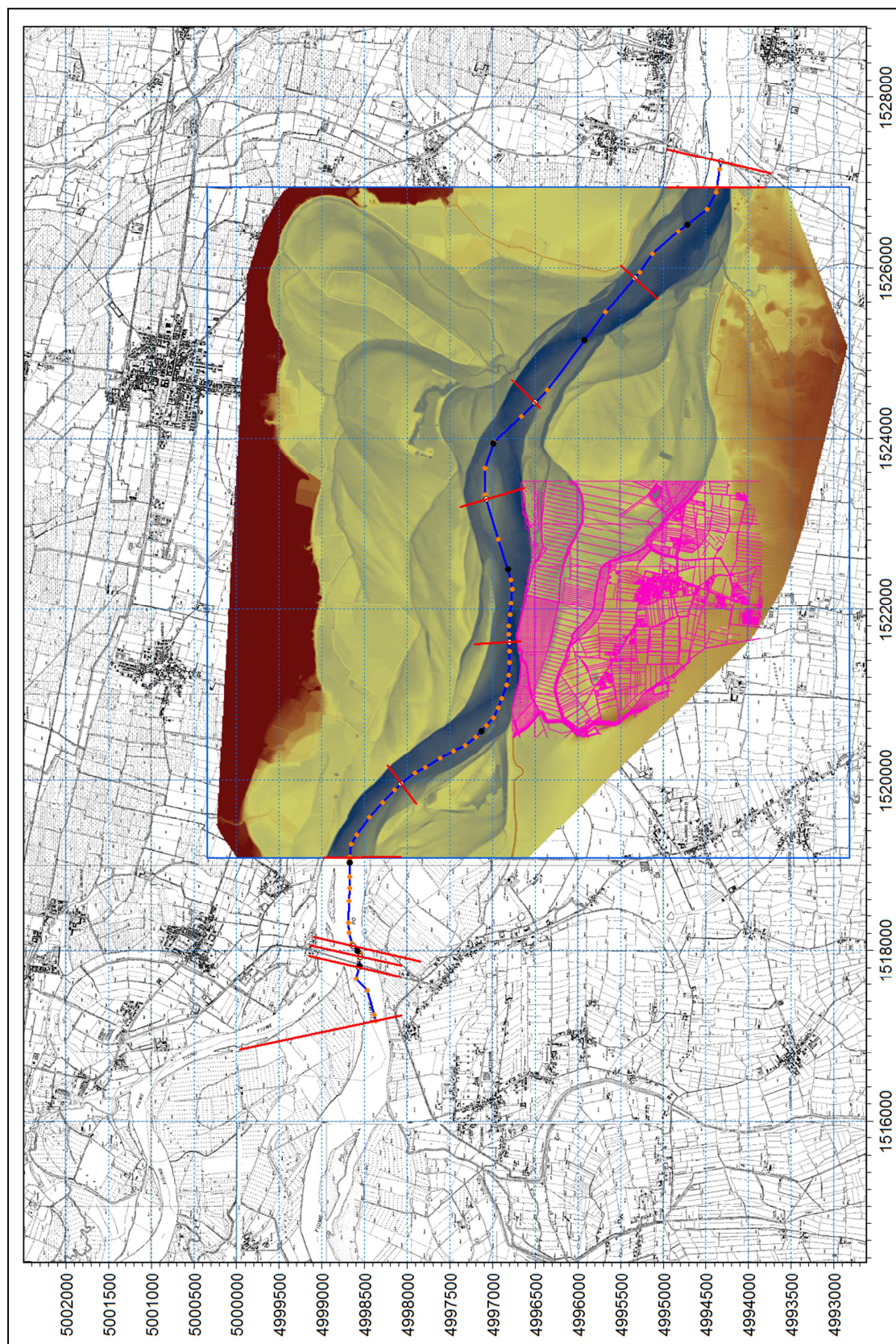


Figura 12 - Area di indagine complessiva coperta dal modello.

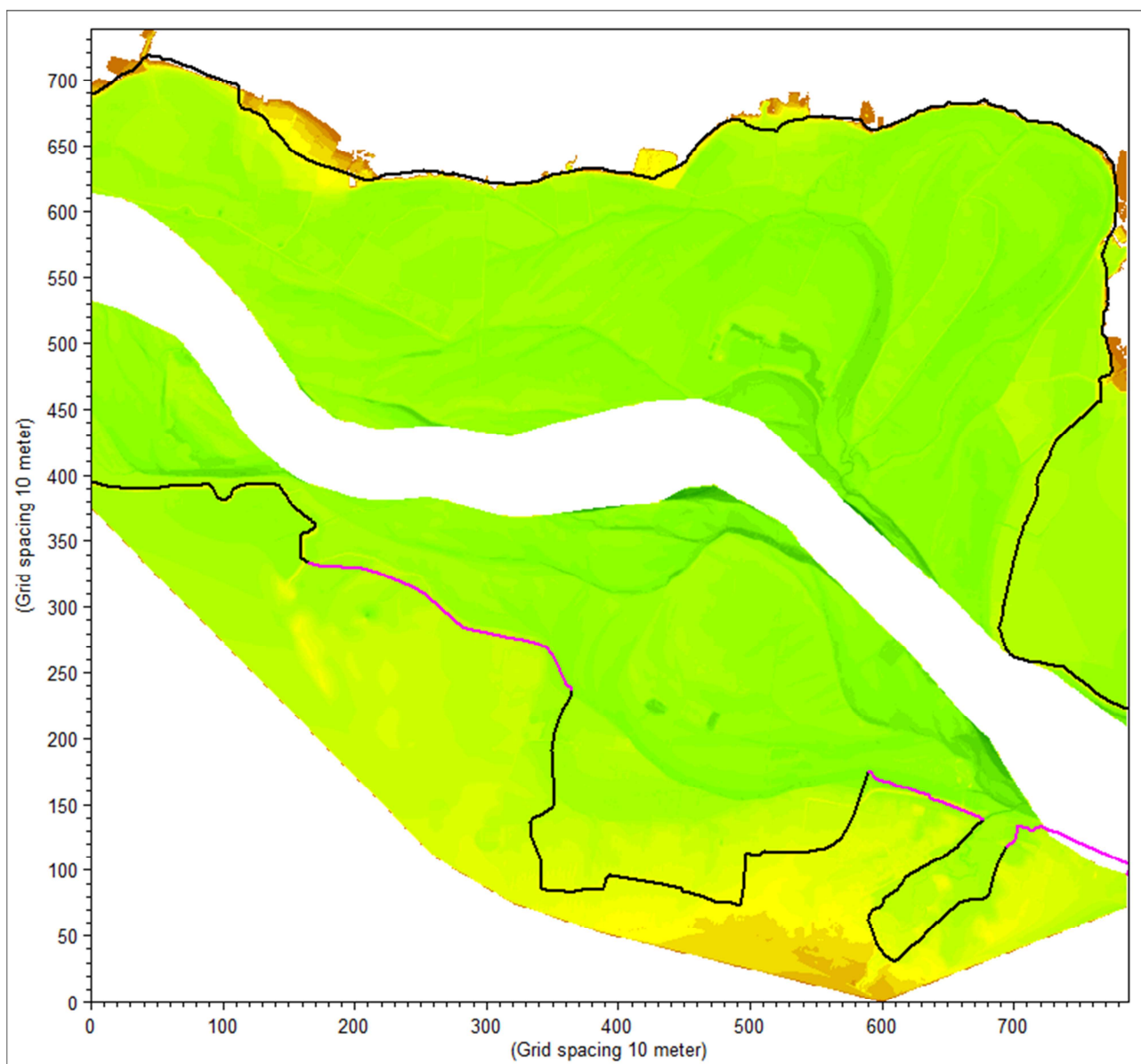


Figura 13 - Batimetria dello stato attuale del modello 2D a maglia 10x10 m.

4.3.2 Batimetrie dello stato di progetto

Le opzioni progettuali analizzate idrodinamicamente al fine ricercare la migliore soluzione del tracciato arginale a difesa dell'abitato di San Cipriano Po sono le seguenti:

- rilevato arginale coincidente con la fascia B di progetto - linea di colore blu in Figura 14 e Figura 15 (simulazione SCENARIO 3); rispetto all'estensione della fascia B di progetto, l'argine è stato prolungato lungo il tracciato della fascia B sul lato est dell'abitato di San Cipriano per contenere i livelli idrici sul lato di valle;
- rilevato arginale collocato in prossimità del ciglio del primo terrazzo alto, nella posizione più avanzata rispetto alla delimitazione dell'alveo di piena; il tracciato, partendo dalla chiavica Cassino, segue l'arginello esistente in sponda destra del colatore Canale Nuovo (in posizione leggermente avanzata verso fiume

rispetto alla fascia B di progetto) e prosegue in sostanziale coincidenza con la fascia B di progetto fino in corrispondenza del concentrico di San Cipriano; successivamente l'argine si prolunga verso valle, attraversando con una chiavica la roggia Bado, e raggiunge la frazione di C.na Costa per consentirne la protezione degli insediamenti presenti; infine piega verso sud e si collega al tracciato della fascia B in modo da contenere i livelli idrici di valle - linea di colore nero in Figura 14 e Figura 15, (simulazione SCENARIO 4);

- rilevato arginale localizzato in arretramento rispetto alla fascia B di progetto, posizionato al limite degli abitati da proteggere fino a poco oltre il concentrico del Comune; successivamente il percorso è sostanzialmente coincidente con quello dello SCENARIO 4 per tutto il resto del tratto che raggiunge C.na Costa e ripiega a chiudere verso sud - linea tratteggiata di colore rosso in Figura 14 e Figura 15 (simulazione SCENARIO 5).

Nel modello idrodinamico 2D ciascuna ipotesi di tracciato è stata rappresentata tramite l'inserimento di un limite di contenimento dei livelli insormontabile dalla piena a tempo di ritorno 200 anni (94+51).

Va specificato che, al fine di simulare l'assetto di progetto definito per il fiume Po dal PAI, in corrispondenza dell'abitato di Portalbera si è schematizzata la fascia B di progetto (limite di contenimento dei livelli di colore rosa di Figura 14) malgrado ad oggi non sia ancora stata realizzata.

Nelle figure citate è stato inoltre rappresentato, con linea di colore marrone, l'argine maestro esistente in destra idraulica a cui si raccordano le ipotesi di tracciato analizzate.

4.4 Condizioni iniziali

Il modello Mike Flood richiede l'introduzione di condizioni iniziali per entrambi i codici MIKE 11 e MIKE 21 accoppiati durante la simulazione. In particolare occorre definire all'istante $t=0$:

- in MIKE 21 la superficie idrica;
- nel ramo di Po di MIKE 11 livelli e portate su ogni sezione, calcolati in automatico in condizioni di moto stazionario per una portata contenuta nell'alveo.

Nel caso in esame si è deciso per semplicità di iniziare la simulazione considerando uno stato di "alveo asciutto" in tutte le celle di MIKE 21 e nel ramo monodimensionale di MIKE 11.

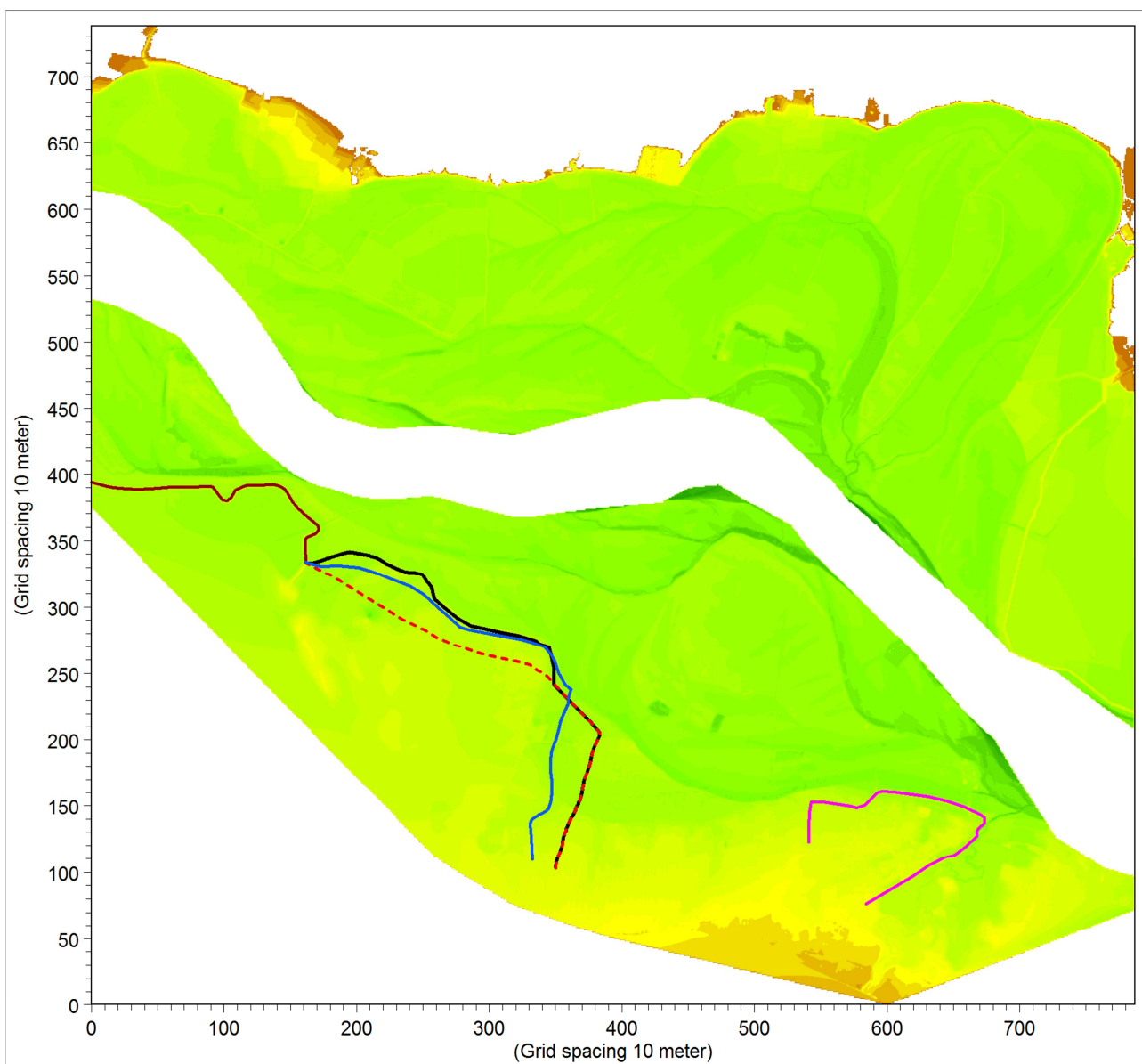


Figura 14 - Batimetria di progetto con le ipotesi di tracciato arginale analizzate nelle simulazioni: SCENARIO 3 (—), SCENARIO 4 (—) e SCENARIO 5 (—).

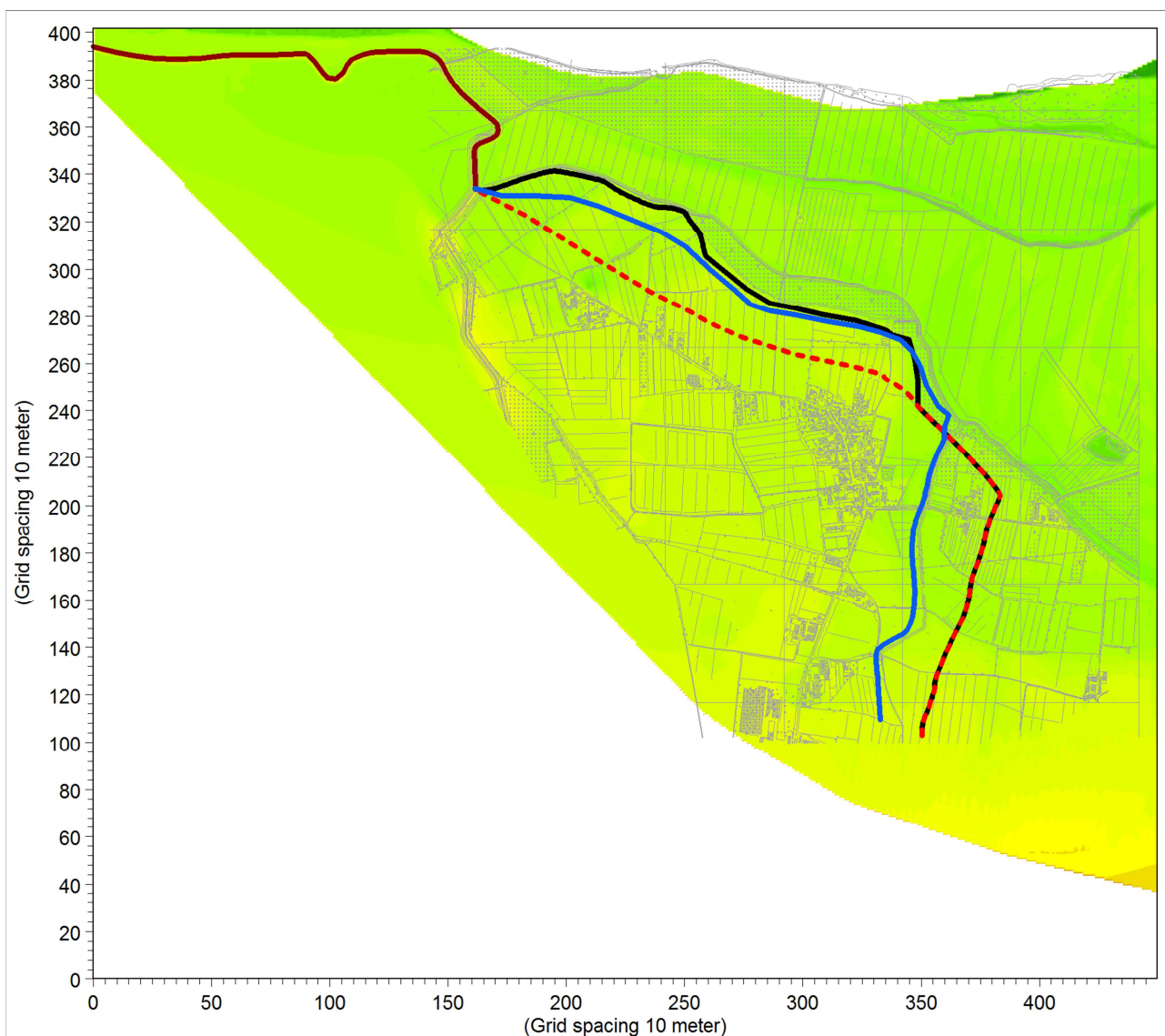


Figura 15 - Rappresentazione di maggior dettaglio della batimetria di progetto riferita alla carta tecnica del comune di San Cipriano Po, con rappresentate le tre ipotesi di tracciato dell'argine in progetto analizzate nelle simulazioni idrauliche: SCENARIO 3 (—), SCENARIO 4 (—) e SCENARIO 5 (---).

4.5 Parametri idrodinamici del modello

Il modello 2D, oltre alla descrizione geometrica e alle condizioni al contorno descritte nei paragrafi precedenti, ha bisogno di un'altra serie di parametri che sono: passo di tempo di integrazione del sistema, coefficienti di scabrezza e coefficiente di viscosità turbolenta ("eddy viscosity").

Come passo di tempo di integrazione è stato utilizzato un valore pari a 1,0 secondi, che, in relazione alla dimensione delle celle di calcolo, può supportare numeri di Courant adeguati anche per velocità di deflusso dell'ordine di 8-10 m/s.

La viscosità turbolenta è legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità e viene simulata nel modello tramite il coefficiente di “eddy viscosity”. Nel caso in esame al coefficiente di eddy viscosity è stato assegnato un valore costante pari a $1 \text{ m}^2/\text{s}$ sull'intera estensione del modello.

Per la descrizione dei parametri di scabrezza utilizzati si rimanda al paragrafo 4.6.

4.6 Simulazione dell'evento dell'ottobre 2000 - SCENARIO 1 (taratura del modello)

La simulazione dell'evento del 2000 è stata eseguita nelle condizioni di stato attuale e ha avuto la finalità di calibrare il modello idrodinamico 2D, in modo da ricostruire le altezze idrometriche al colmo misurate e l'estensione delle aree golenali aperte inondate.

Sulla piena del 2000 sono stati eseguiti numerosi studi che hanno approfondito nel dettaglio la dinamica dell'evento:

- studi ed elaborazioni specifiche dell'Autorità di bacino del fiume Po svolte nell'anno 2001, che hanno rappresentato l'evoluzione dell'onda di piena lungo l'asta da valle della confluenza del Tanaro (Isola Sant'Antonio) fino a Pontelagoscuro;
- *“Studio idraulico a supporto della progettazione degli interventi di sistemazione idraulica del fiume Po a difesa dei comuni di Arena Po, Portalbera e San Cipriano Po”* (AIPO - Agosto 2002);
- *“Realizzazione di un sistema di previsione in tempo reale delle piene”*, sull'intero bacino del Po (DHI-Italia per conto di AIPO e delle Agenzie ARPA Piemonte ed Emilia Romagna - anni 2009 e 2010).

Tali studi hanno messo in evidenza come la piena del 2000 costituisca un evento che ha circa uguagliato nel tratto il massimo storico. Il livello idrometrico al colmo misurato nelle 2 stazioni di Becca (alla confluenza del Ticino) e di Spessa (circa 11,7 km a valle) è stato infatti rispettivamente di 62,91 m s.m. e di 61,06 m s.m.; la piena massima storica del 1951 ha raggiunto a Becca (la stazione di Spessa non era ancora attiva) il valore di 62,95 m s.m.

La stazione idrometrica di Becca è stata inoltre sostituita da quella di Spessa per la misura della portata associata alle altezze idrometriche in quanto non risulta particolarmente affidabile la relativa scala delle portate soprattutto in condizioni di piena a causa di fenomeni di instabilità morfologica e di uniformità delle condizioni di deflusso che risentono in realtà ancora delle diversità tra i contributi del Ticino e del Po. Per questa stazione non è quindi disponibile una scala di deflusso aggiornata che consenta di correlare le altezze idrometriche misurate con i valori della corrispondente portata defluente. Di questo aspetto occorre evidentemente tenere conto nel momento in cui per gli eventi di piena si assumono i valori di portata rispetto a quelli relativi alle altezze idrometriche.

Per l'evento 2000, la portata al colmo stimata in corrispondenza di Becca nel “Rapporto sull'evento alluvionale del 13-16 ottobre 2000 (versione 5.0)” di ARPA- Piemonte è pari a circa $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Per lo stesso evento il SIMN ha stimato una portata al colmo di circa $11.600 \text{ m}^3/\text{s}$ a Becca e di circa $11.250 \text{ m}^3/\text{s}$ nella stazione di Spessa, che detto sopra è poco più a valle.

Gli approfondimenti sull'evento del 2000 eseguiti tramite il modello di previsione in tempo reale gestito da AIPO e ARPA-Piemonte considerano come stazioni idrometriche di riferimento quelle di Isola Sant'Antonio e Spessa. Le simulazioni di taratura del modello eseguite su un periodo compreso tra gli anni 2000 e 2008 indicano peraltro una possibile sottostima, anche fino a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, della scala di deflusso di Spessa per le

portate alte. Si potrebbe pertanto ipotizzare un colmo dell'evento nella stazione di Spessa prossimo a 12.000 m³/s, che tenendo conto di un modesto effetto di laminazione che si può manifestare immediatamente a valle della confluenza del Ticino, porterebbe il valore del colmo a Becca non troppo discosto da quello stimato nel rapporto di evento di ARPA-Piemonte.

Va comunque riconosciuta la difficoltà di determinare con precisione il valore della portata al colmo associata all'evento del 2000 per il tratto in esame, in ragione del fatto che esse sono effettuate sulla base di scale di deflusso sprovviste di punti di misura per i valori idrometrici più elevati.

Sulla base delle considerazioni esposte, la taratura del modello idrodinamico 2D è stata eseguita riferendosi ai seguenti dati di riferimento:

1. scala di deflusso dell'idrometro di Spessa (vedi Figura 16, Figura 17 e Figura 18);
2. idrogramma di piena dell'evento dell'ottobre 2000 misurato alla stazione di Spessa (in termini di livelli idrometrici e di corrispondenti portate);
3. rilievi topografici dei livelli idrici massimi raggiunti dalla piena eseguiti da AIPO lungo le arginature presenti nel tratto (vedi Tabella 2).

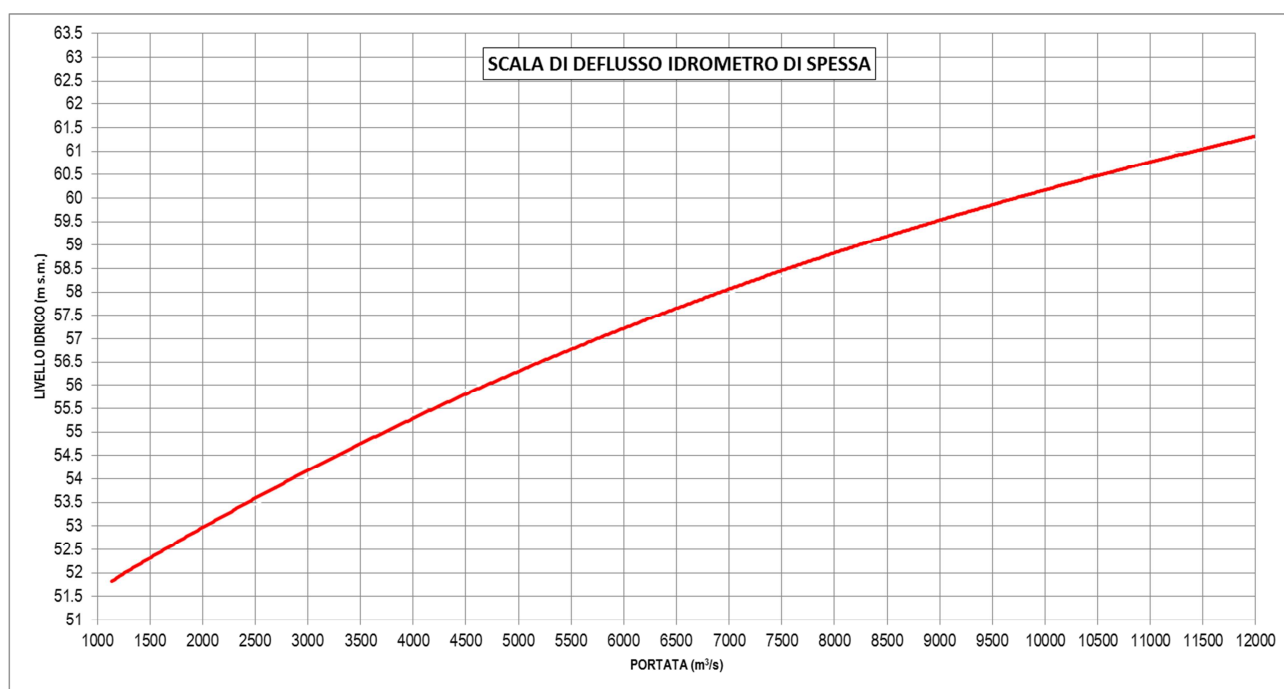


Figura 16 - Scala di deflusso della stazione di misura di Spessa.

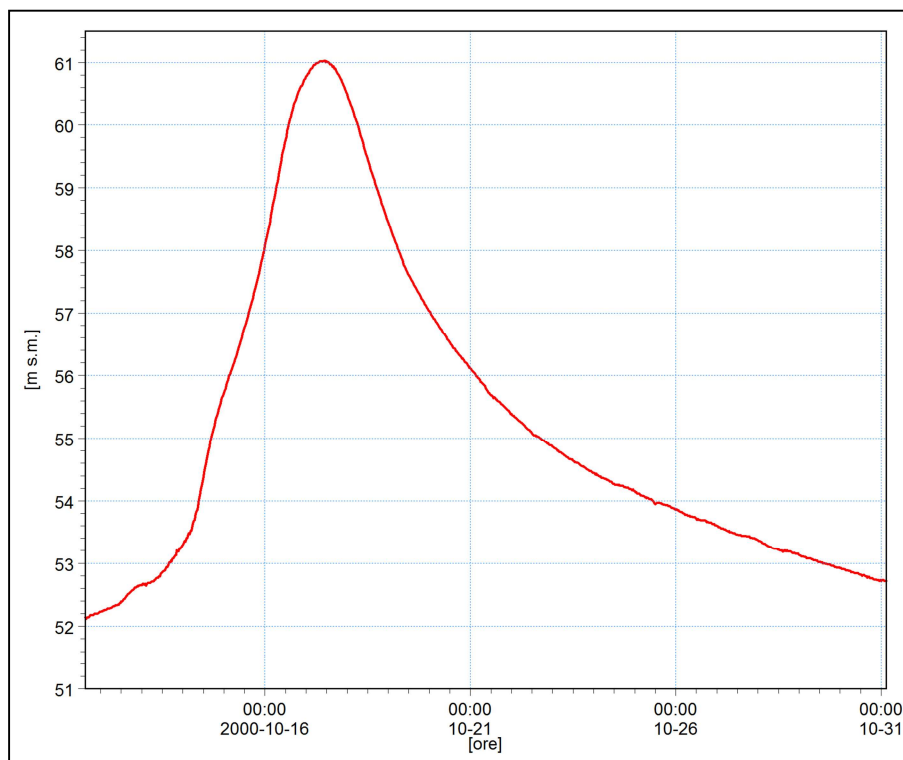


Figura 17 - Livelli idrometrici misurati relativi all'evento dell'ottobre 2000 alla stazione di Spessa.

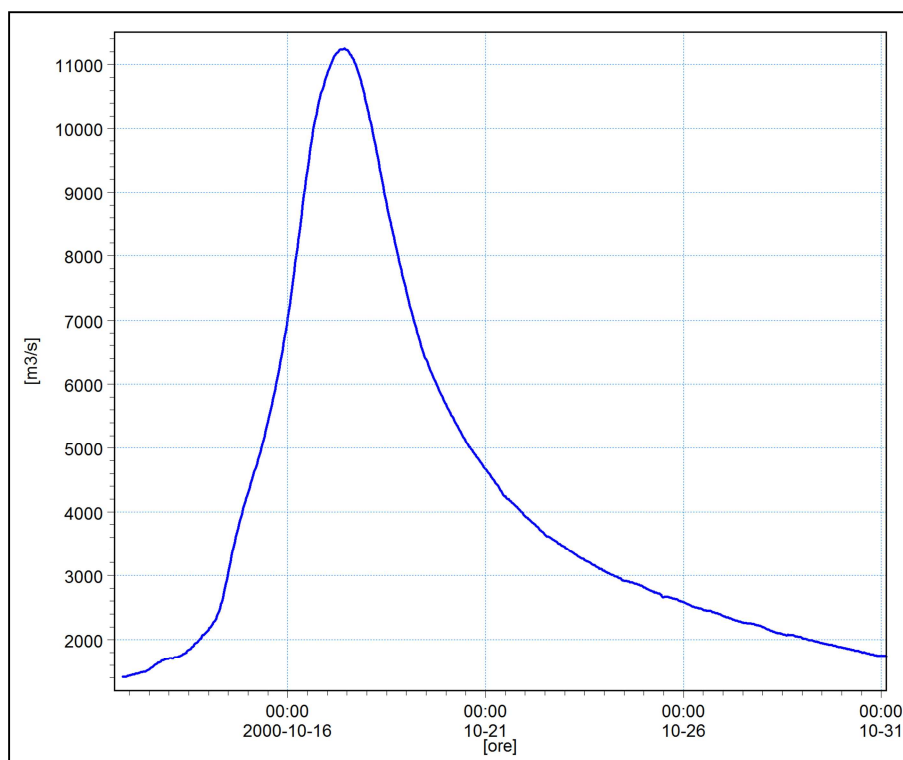


Figura 18 - Portata risultanti dalla scala di deflusso relative all'evento dell'ottobre 2000 alla stazione di Spessa.

Nome sezione rilievo 2005	Livello in destra idrografica (m s.m.)	Livello in sinistra idrografica (m s.m.)
Sez.7	61,80	61,82
Sez.7a	61,69	-
Sez.7b	61,65	-
Sez.7c	60,84	-

Tabella 2 - Rilievi topografici delle tracce dei livelli idrici massimi raggiunti dalla piena del 2000 lungo le sponde destra e sinistra.

Il modello idrodinamico messo a punto è di estremo dettaglio dal punto di vista topografico e pertanto fornisce un elevato grado di precisione nella definizione della geometria dell'alveo interessato da un evento di piena caratterizzato da elevato tempo di ritorno.

Le condizioni al contorno assegnate al modello sono le seguenti:

- idrogramma di portata in entrata nella sezione di monte del modello monodimensionale (sez.5C) alla progressiva 268.557,88 m;
- scala di deflusso in corrispondenza dell'idrometro di Spessa (sez. 7D) alla progressiva 280.662,00 m.

La taratura è avvenuta imponendo per iterazioni successive idrogrammi di portata a monte del nodo di confluenza Ticino-Po (sezione di ingresso del modello) e verificando la congruenza dei risultati con i dati registrati relativi all'evento di piena considerato.

L'idrogramma di portata assegnato alla stazione di Becca è riportato in Figura 19, avente valore al colmo di circa 11.600 m³/s.

I parametri di resistenza assunti nel modello sono stati espressi in funzione della mappa di uso del suolo delle aree golenali prodotta dalla Regione Lombardia nell'anno 2007. In particolare i valori di scabrezza di Strickler assunti (coerenti e congruenti con quelli utilizzati negli studi di settore citati nel presente paragrafo) sono risultati i seguenti:

- variabili da 25 a 30 m^{1/3}/s per l'alveo inciso (MIKE 11); essi tengono conto sia delle caratteristiche granulometriche del materiale d'alveo che di quelle morfologiche e geometriche (grado di sinuosità dell'alveo e variazioni di geometria della sezione) nonché della vegetazione presente sulle sponde;
- variabili da 12 a 18 m^{1/3}/s per le aree golenali (MIKE 21) che nel tratto sono prevalentemente interessate da coltivazioni arboree (pioppeti) e da coltivazioni intensive (seminativi semplici);
- 40 m^{1/3}/s per le aree urbanizzate di San Cipriano Po e Portalbera (MIKE 21).

Le opere di contenimento dei livelli presenti sono costituite in sponda destra del Po da un'arginatura maestra a carattere continuo che da valle del ponte della Becca si estende fino in corrispondenza del canale denominato "il Roggiolo" (località Buffalora), ad una quota (variabile da circa 64,60 a 64,40 m s.m.) in grado di contenere piene di gravosa entità in termini di tempo di ritorno; da valle del Roggiolo fino a Portalbera non vi sono più opere di contenimento dei livelli a carattere continuo e pertanto in condizioni di piena il contenimento dei livelli è assicurato da elementi morfologici naturali che si trovano a quota variabile da 58,0 a 60,0 m s.m, valori superiori a quelli dell'abitato di San Cipriano Po, che infatti in occasione dell'evento dell'ottobre 2000 fu completamente allagato.

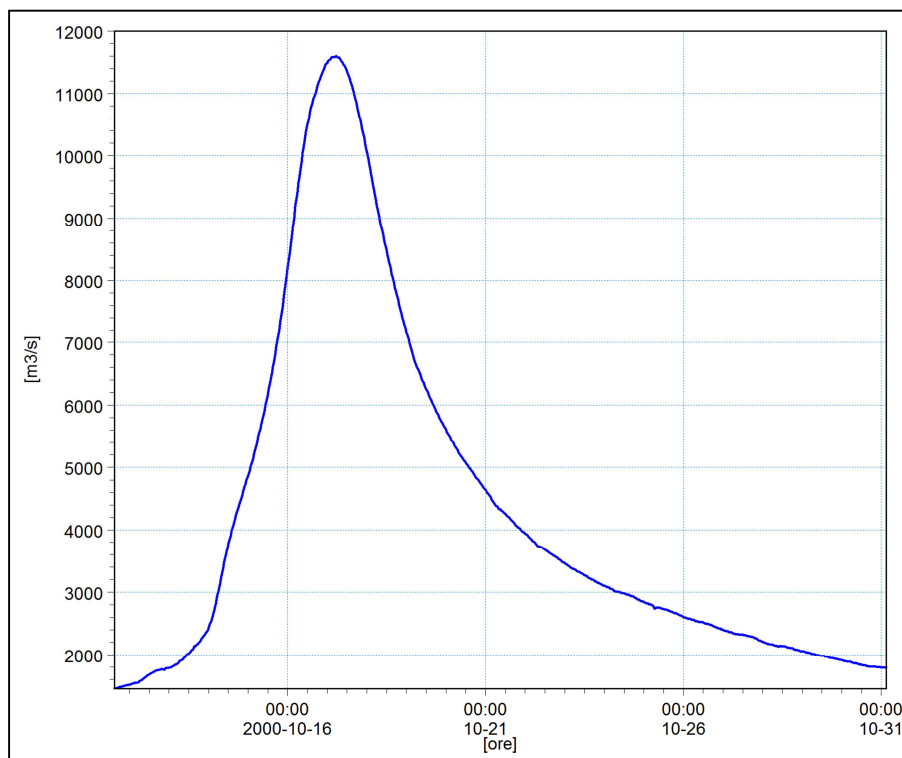


Figura 19 - Idrogramma in entrata nel modello a monte della Becca (sez.5C).

Le simulazioni eseguite riproducono in modo coerente i livelli massimi raggiunti nel corso della piena e le aree di esondazione da essi generate. In particolare:

- in corrispondenza della sezione 7 in sponda destra, la quota idrometrica massima rilevata nel corso della piena è risultata pari a 61,80 m s.m. e il modello idrodinamico restituisce una quota media di 61,86 m s.m.;
- sempre in corrispondenza della sezione 7 ma in sponda sinistra, la massima quota di piena rilevata è risultata pari a 61,82 m s.m. e per contro il modello restituisce un livello idrico di 61,94 m s.m.;
- in corrispondenza della sezione 7A, la massima quota rilevata in destra idraulica è risultata pari a 61,69 m s.m. e il modello idrodinamico restituisce un livello idrico medio di circa 61,70 m s.m.;
- in corrispondenza della sezione 7B in sponda destra, la massima quota raggiunta dalla piena è risultata pari a 61,65 m s.m. e il modello idrodinamico fornisce un livello idrico medio di 61,63 m s.m.;
- in corrispondenza della sezione 7C la massima quota rilevata è risultata pari a 60,84 m s.m. contro una quota idrometrica calcolata dal modello pari a 61,34 m s.m.; va però specificato che la quota idrica rilevata nel corso della piena in corrispondenza di questa sezione è di dubbia attendibilità in quanto risulta inferiore a quella dell'idrometro di Spessa, localizzato a valle di essa di circa 1765 m.

Di seguito si riportano le mappe di esondazione dell'evento 2000 generate dal modello idrodinamico, ottenute come inviluppo delle massime quote idrometriche, dei tiranti idrici e delle velocità; nelle figure sono rappresentate inoltre le fasce fluviali del PAI dell'Autorità di bacino del Po: in colore nero il limite di fascia B e in colore rosa il limite di fascia B di progetto. Sulle mappe prodotte si sono inoltre localizzate, per la parte incisa dell'alveo, le sezioni trasversali di rilievo eseguite da AIPO nel 2005, inserite nel modello monodimensionale simulato con MIKE 11. Nell'allegato 3 sono riportate alcune mappe delle aree di esondazione a diversi istanti nel corso dell'evento di piena dell'ottobre 2000 che ne evidenziano l'evoluzione. In esse sono rappresentate le altezze d'acqua e il campo dei vettori velocità.

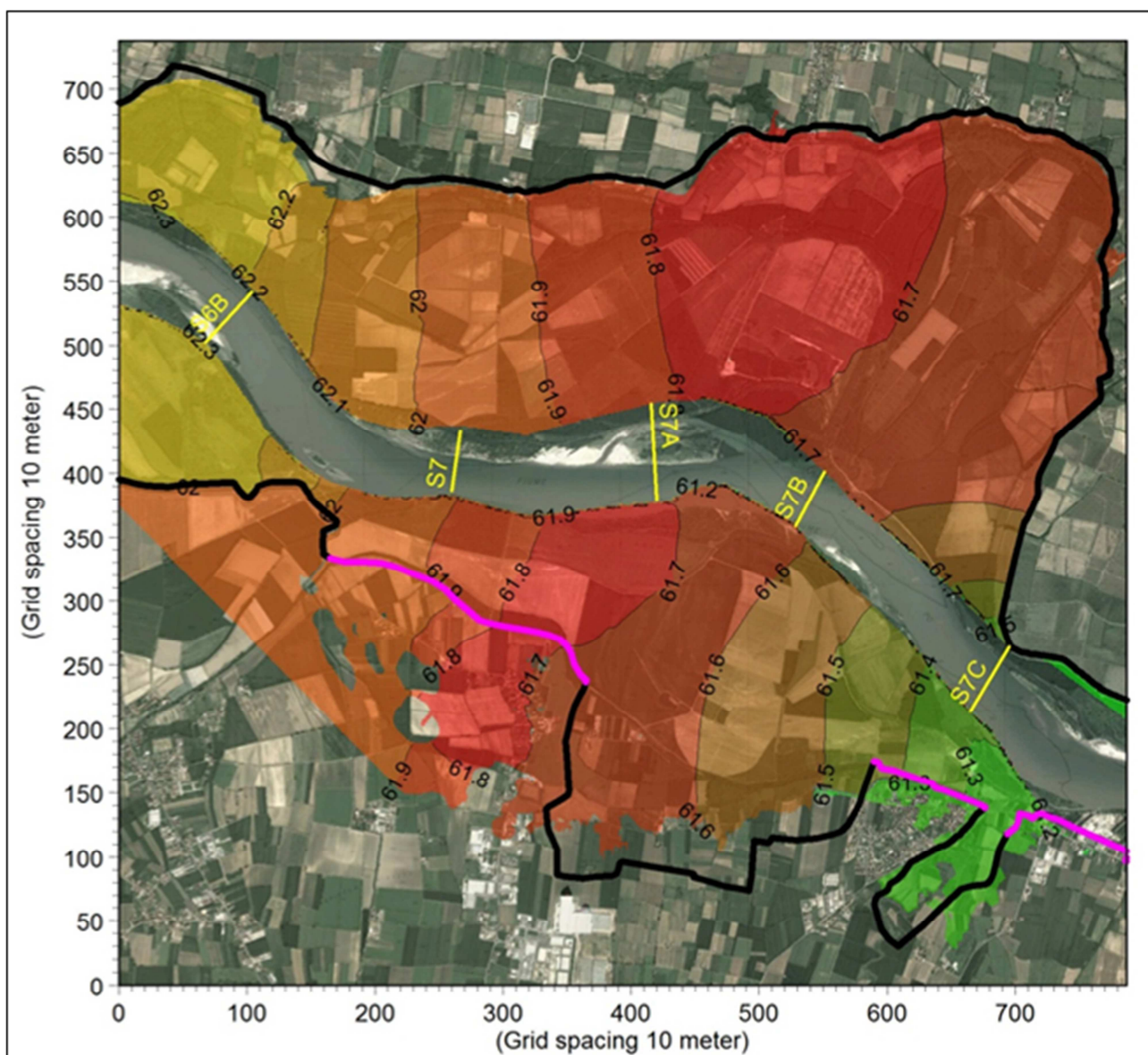


Figura 20 - SCENARIO 1 (piena ottobre 2000/assetto attuale): inviluppo delle quote idrometriche massime.

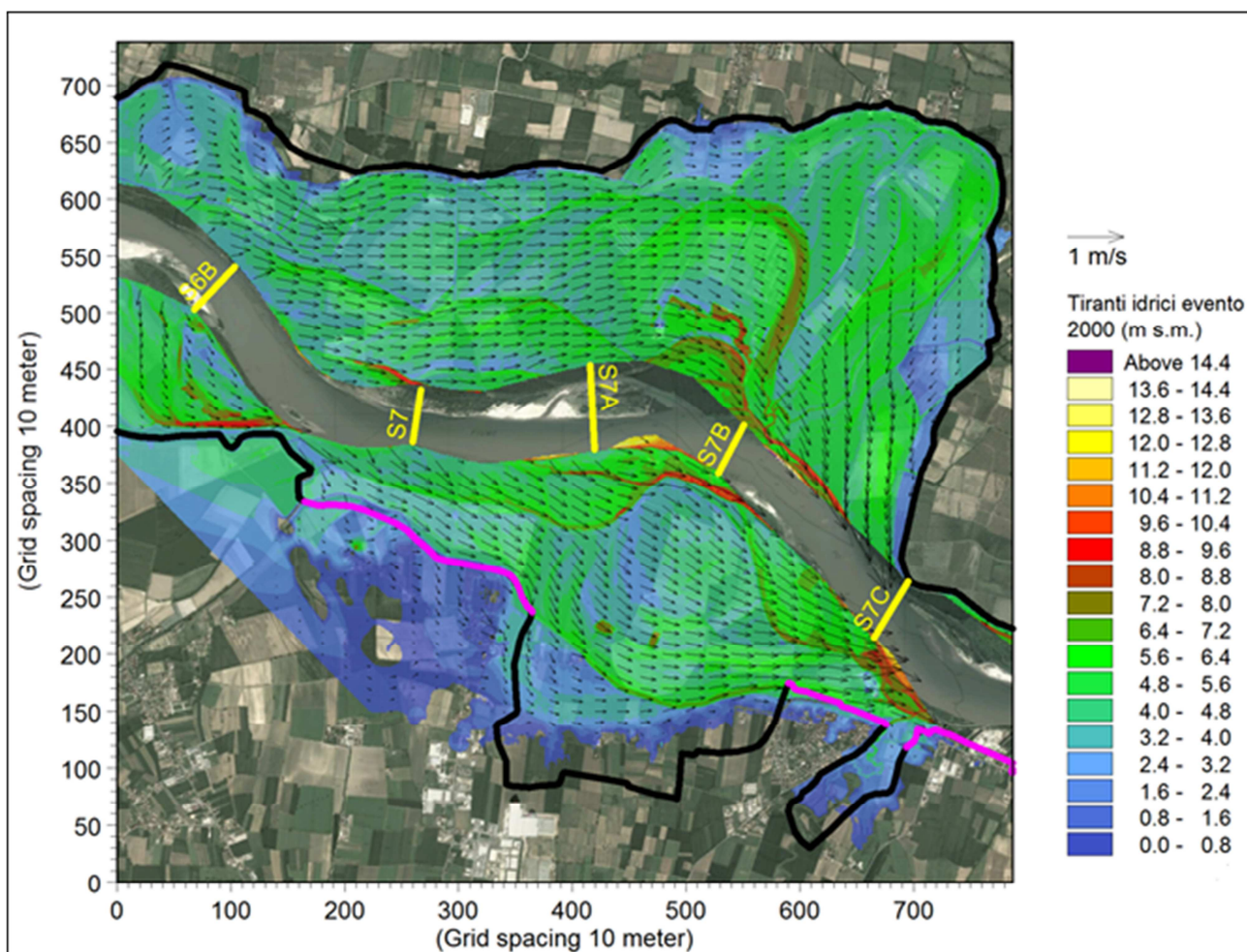


Figura 21 - SCENARIO 1 (piena ottobre 2000/assetto attuale): involuppo dei massimi tiranti idrici, con rappresentazione dei vettori velocità.

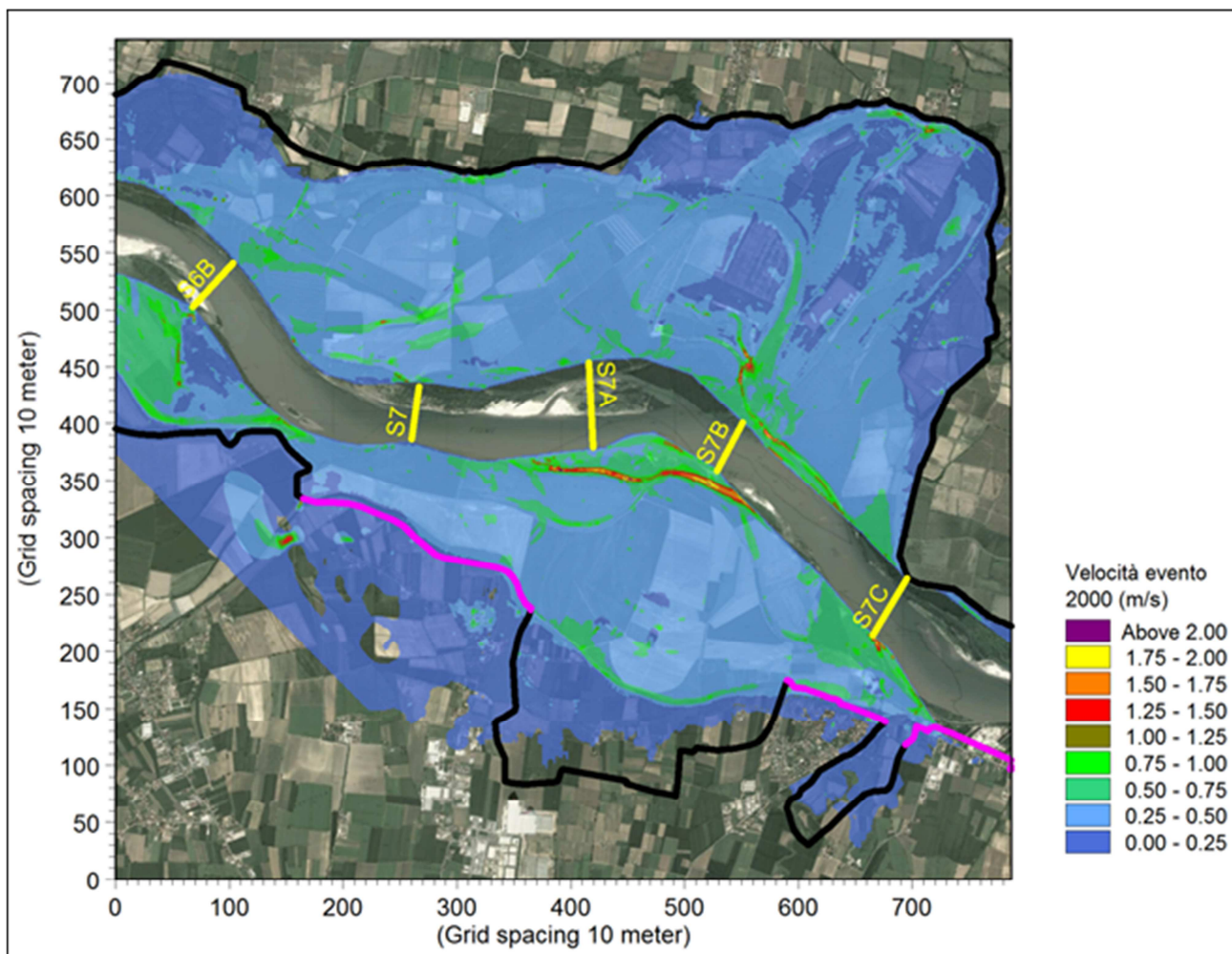


Figura 22 - SCENARIO 1 (piena ottobre 2000/assetto attuale): inviluppo delle massime velocità.

Circa i risultati della simulazione, che confermano naturalmente la dinamica dell'evento storico, si può osservare come i livelli idrici massimi nel tratto di Po che interessa l'abitato di San Cipriano raggiungano quote comprese tra 62,0 m s.m. all'estremo di monte, in corrispondenza della chiavica, e 61,6 m s.m. a quello di valle, all'altezza della c.na Costa. Tali altezze idriche comportano un limite di inondazione in destra che supera abbondantemente la S.P. 55 in tutto il tratto compreso tra la chiavica stessa e il centro urbano e si attesta in posizione circa parallela alla stessa strada, a una distanza di oltre 1.500 m dal ciglio del terrazzo morfologico che individua l'alveo di piena del corso d'acqua.

Il concentrico di San Cipriano e quello della frazione Costa sono dunque completamente inondati con altezze d'acqua che raggiungono al colmo valori compresi tra 0,5 e 1,5 m; va osservato inoltre che tra il concentrico del capoluogo e l'insediamento di fraz. Costa si instaura un ramo secondario di deflusso di larghezza significativa con altezze idriche più consistenti (2,5÷3,5 m), anche se le velocità di deflusso si mantengono limitate.

Osservando infine la dinamica di inondazione della golena destra, si può osservare che le condizioni di incipiente allagamento dell'area si determinano proprio nel tratto compreso tra il concentrico e fraz. Costa, in corrispondenza del punto dove la roggia Bado sfocia nel Lancone e, poco dopo, in corrispondenza della

chiavica di monte, da cui l'inondazione si propaga successivamente sia verso valle (l'abitato di San Cipriano) sia per rigurgito verso monte, andando ad occupare l'area alle spalle dell'argine maestro che giunge alla chiavica stessa. Le velocità di corrente si mantengono ovunque su valori piuttosto contenuti, decisamente inferiori a 0,5 m/s distinguendo in questo modo nettamente la porzione di golenale alta da quella posta oltre il terrazzo morfologico più volte citato, dove si instaurano altezze idriche massime molto più consistenti (ovunque superiori ai 3,5 m) con velocità di deflusso che raggiungono e superano i 0,5 m/s.

4.7 Simulazione della piena con tempo di ritorno 200 anni nelle condizioni attuali - SCENARIO 2

La portata di riferimento per le fasce fluviali del PAI è quella con tempo di ritorno 200 anni, determinata nella sezione di ponte Becca secondo quanto descritto al paragrafo 3, caratterizzata da un valore al colmo di 13.600 m³/s; l'idrogramma utilizzato in input al modello idrodinamico - ottenuto dalla combinazione dell'onda del novembre 1994 a Isola Sant'Antonio e degli apporti, ipotizzati costanti nel tempo, degli affluenti successivi aventi valori al colmo pari a quelli del 1951 - è quello riportato nella Figura 10.

Al fine di valutare gli effetti del solo intervento in progetto relativo alla difesa dell'abitato di San Cipriano, le condizioni attuali sono state considerate come rappresentate dalla sola mancanza dell'argine corrispondente alla fascia B di progetto prevista dal PAI per l'abitato in questione e sono state considerate già realizzate le opere di contenimento nel tratto a valle preso in considerazione nel modello di simulazione 2D; si tratta dei tratti di fascia B di progetto a difesa dell'abitato di Portalbera e della località San Pietro (vedi Figura 23 e seguenti, rispettivamente argine rappresentato con linee di colore giallo di colore rosa in destra idraulica). L'ipotizzata presenza dell'argine corrisponde nel modello di simulazione all'inserimento di un limite di contenimento dei livelli insormontabile rispetto alla piena di progetto con tempo di ritorno di 200 anni. L'argine che circonda l'abitato di Portalbera segue il tracciato dell'argine esistente rappresentato nel rilievo Lidar come discontinuo, completato con l'estensione verso monte lungo la sponda sinistra del Versa (tratto rigurgitato).

Le condizioni al contorno di calcolo inserite nel modello monodimensionale, più esteso sia a monte che a valle di quello bidimensionale, sono le seguenti:

- idrogramma con tempo di ritorno 200 anni imposto in ingresso a monte alla progressiva 268.557,88 m (sez.5C);
- scala di deflusso nella sezione di misura di Spessa (vedi Figura 16) alla progressiva 280.662,00 m (sez. D).

I risultati della simulazione mettono in evidenza un comportamento idrodinamico complessivo dell'evento lungo il tronco di corso d'acqua in esame del tutto analogo a quello riscontrato per la piena dell'ottobre 2000.

Il più elevato valore della portata di colmo dell'onda di piena rispetto all'evento dell'ottobre 2000 (13.600 m³/s a fronte di 11.600 m³/s) comporta altezze idriche generalmente superiori di 0,9 -1,0 m.

Rispetto al profilo di progetto del PAI ("Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica"), il confronto nella sezione 7 (vedi Figura 8) che rappresenta l'unico punto di calcolo all'interno del tronco (tab. 33 - "Profilo di piena per il Po nel tratto da Isola Sant'Antonio al Delta" della Direttiva) permette di riscontrare un valore dell'altezza idrica risultante dalla simulazione del modello 2D inferiore di circa 0,35 m. Tale differenza è da ricondurre alla minore approssimazione della modellazione a suo tempo impiegata per la costruzione del profilo di progetto, appoggiata a un modello quasi-bidimensionale che non è in grado di descrivere nel dettaglio i fenomeni di inondazione delle aree golenali e a una rappresentazione della geometria dell'alveo semplificata.

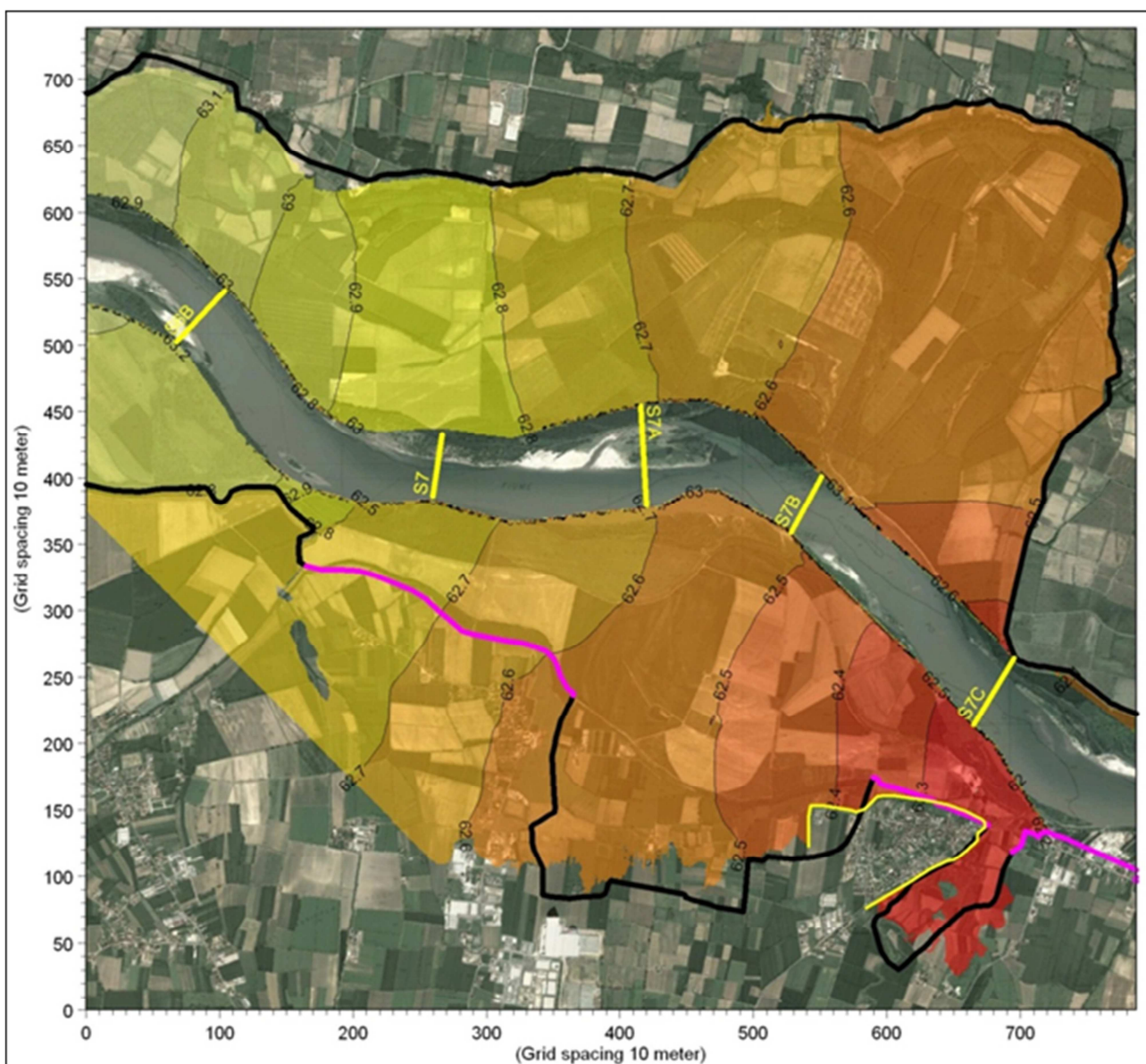


Figura 23 - SCENARIO 2 (piena con tempo di ritorno 200 anni/ assetto attuale): inviluppo delle quote idrometriche massime.

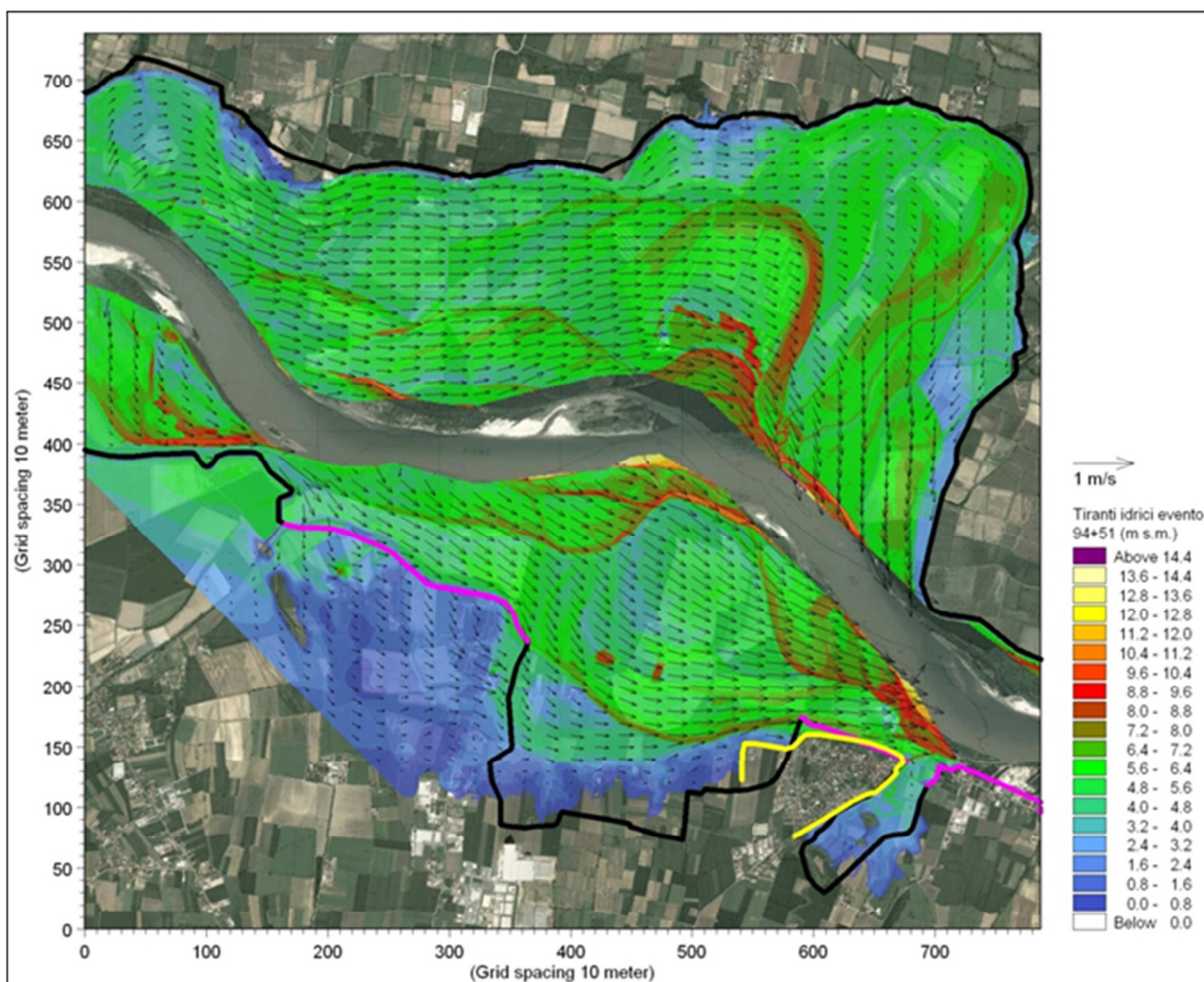


Figura 24 - SCENARIO 2 (piena con tempo di ritorno 200 anni/ assetto attuale): inviluppo dei massimi tiranti idrici, con rappresentazione dei vettori velocità.

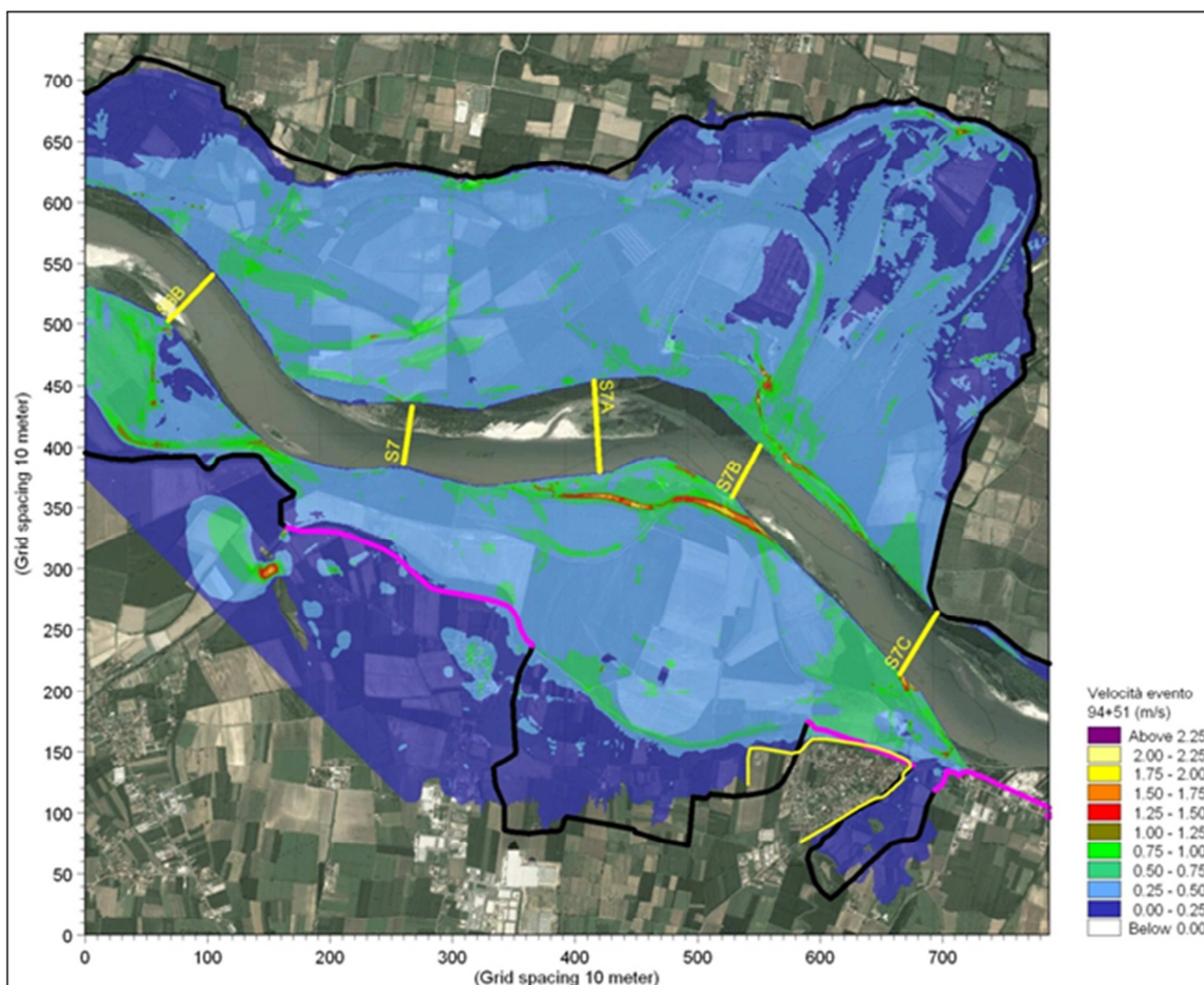


Figura 25 - SCENARIO 2 (piena con tempo di ritorno 200 anni/ assetto attuale): involucro delle massime velocità.

4.8 Simulazione della piena con tempo di ritorno 200 anni nelle condizioni di progetto, con tracciato arginale coincidente con la fascia B di progetto - SCENARIO 3

Le simulazioni relative al presente scenario di progetto, e a quelli successivi presentate nel seguito, hanno lo scopo di evidenziare gli effetti dell'inserimento dell'argine a difesa dell'abitato di San Cipriano sulle modalità di deflusso della piena di progetto sia all'interno del tronco oggetto di simulazione sia sulle condizioni a valle.

Oltre alla variazione del profilo di piena all'interno del tronco simulato, dovuta alla presenza dell'argine che preclude l'inondazione della golena destra in corrispondenza dell'abitato, gli effetti idrodinamici correlati alla presenza dell'opera sono rappresentati dalla seguenti grandezze:

- variazione del volume massimo invasato all'interno del tronco rispetto alla situazione attuale;
- variazione del valore della portata di colmo nella sezione di uscita del tronco rispetto alla situazione attuale.

Il tracciato planimetrico dell'argine in progetto a difesa dell'abitato di San Cipriano è stato assunto meccanicamente coincidente con il limite di fascia B di progetto definito nel PAI; il tracciato è stato esteso

verso sud, oltre il termine della B-Pr, lungo la fascia B, fino a trovare quote del terreno golenale superiori a quelle di piena, al fine di assicurare il contenimento dei livelli idrici di valle (vedi in Figura 26 linea di colore giallo). L'argine in progetto inizia pertanto in corrispondenza della chiavica Cassino a monte, segue il percorso della fascia B di progetto, prosegue lungo la fascia B naturale e termina intestandosi sul lato campagna a quote superiori rispetto ai livelli di piena. Non viene incluso nella parte protetta dall'arginatura l'insediamento di fraz. Costa.

Si ricorda che, anche nello scenario considerato come pure nei successivi scenari 4 e 5, sono ipotizzati presenti gli argini indicati dalla fascia B di progetto in corrispondenza dell'abitato di Portalbera già considerati nello SCENARIO 2 rappresentativo della situazione attuale. In questo modo, la differenza tra i due scenari rappresentano esclusivamente gli effetti correlati alla realizzazione dell'argine di San Cipriano in progetto.

Di seguito si riportano le mappe rappresentative delle condizioni di deflusso della piena TR200 anni ("94+51") che rappresentano l'involuppo delle massime quote idrometriche, dei tiranti idrici e delle velocità per lo scenario analizzato; nella Figura 29 è inoltre rappresentata una mappa che riporta la differenza tra le massime quote idrometriche ottenute con il presente SCENARIO 3 e quelle ottenute, a parità di condizioni idrologiche, con lo SCENARIO 2 rappresentativo dello stato attuale. Si può osservare che l'innalzamento dei livelli massimi indotto dalla presenza dell'argine è in tutto il tronco dell'ordine di alcuni centimetri; per gran parte della sezione di piena è contenuto tra 4 e 6 cm, per una parte più modesta a monte raggiunge valori tra 6 e 8 cm, con un massimo locale di circa 10 cm in corrispondenza del punto di attacco dell'argine in prossimità della chiavica. L'estensione dell'area allagata in destra, nel tratto tra gli abitati di San Cipriano e Portalbera, risulta praticamente invariata; il confronto dei campi della velocità massima in golena destra mostra come non vi siano modifiche sostanziali delle caratteristiche di deflusso rispetto allo stato attuale.

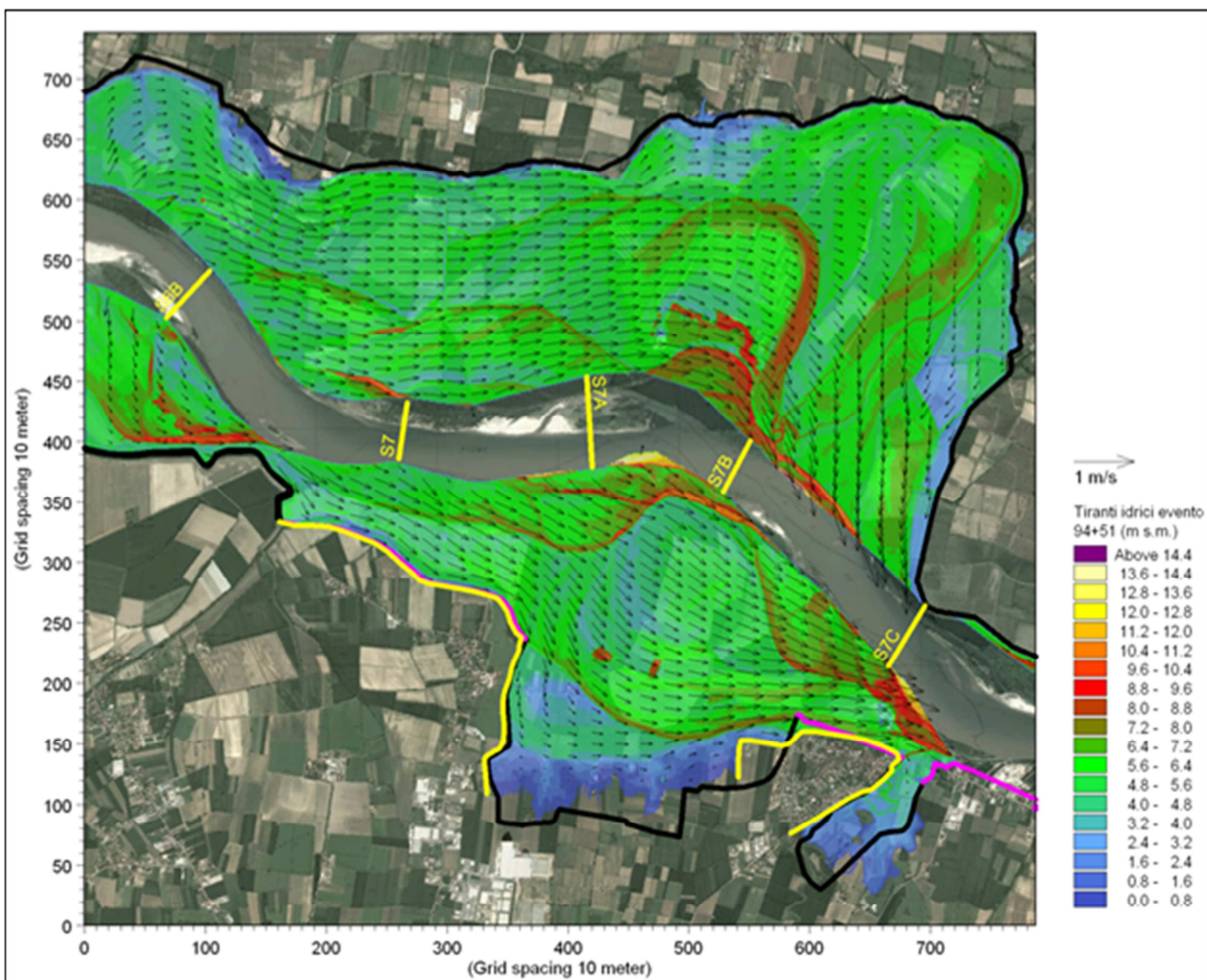


Figura 27 - SCENARIO 3 (piena TR 200 anni/ argine su B-Pr). involucro dei massimi tiranti idrici, con rappresentazione dei vettori velocità.

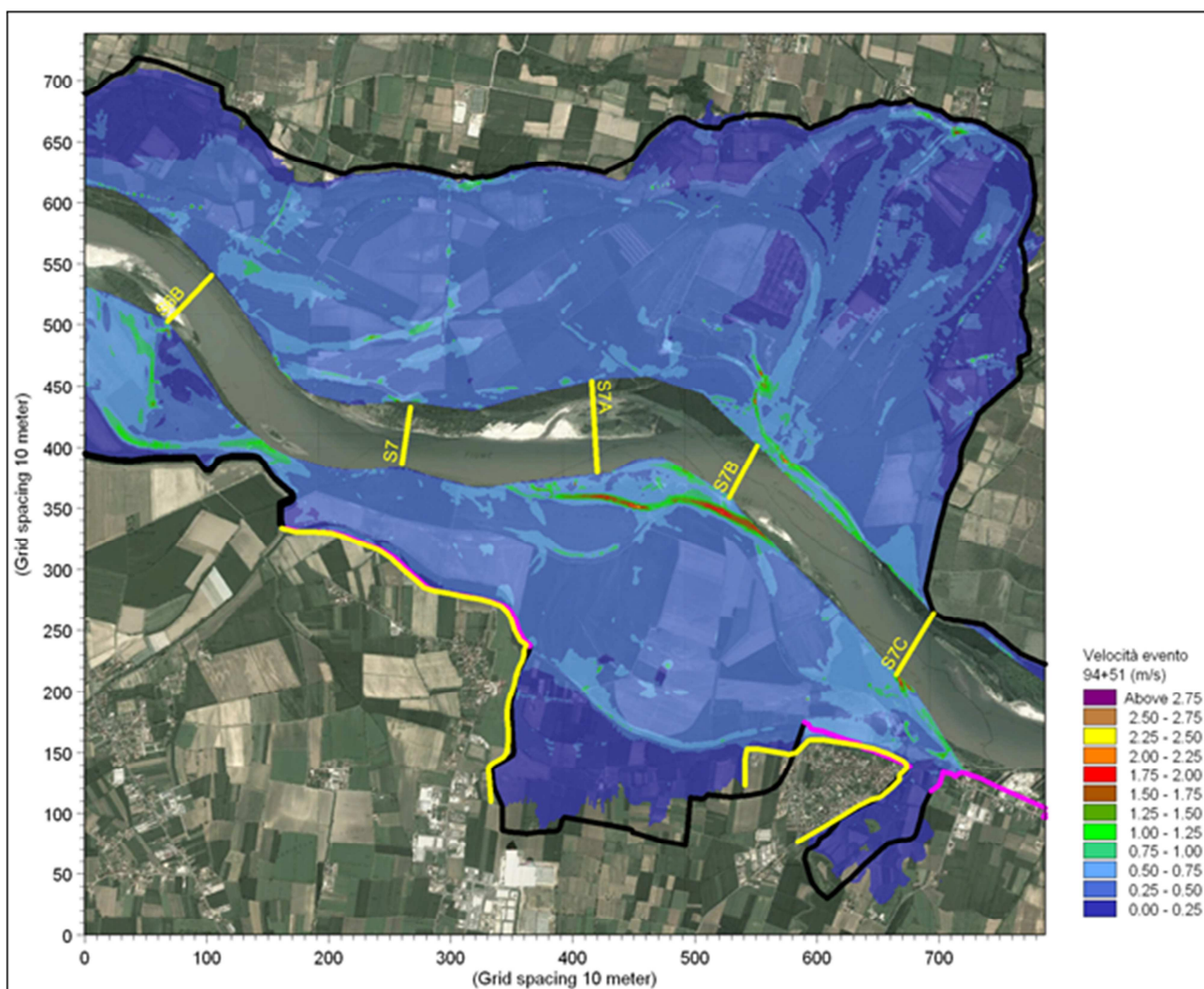


Figura 28 - SCENARIO 3 (piena TR 200 anni/ argine su B-Pr): involucro delle massime velocità.

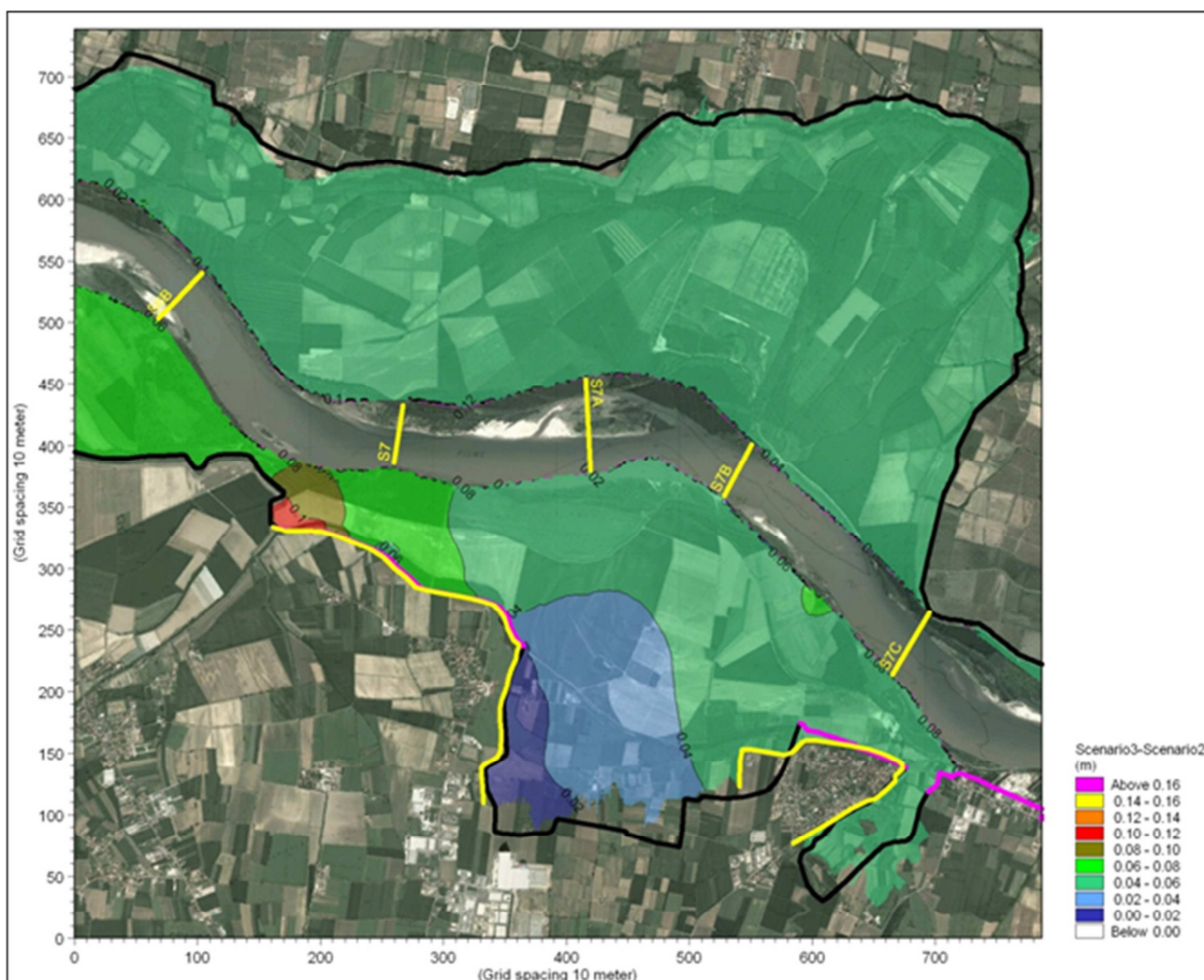


Figura 29 - SCENARIO 3 (piena TR 200 anni/ argine su B-Pr): differenze delle quote idrometriche massime rispetto allo SCENARIO 2 (attuale).

4.9 Simulazione della piena con tempo di ritorno 200 anni nelle condizioni di progetto, con tracciato arginale in avanzamento rispetto alla fascia B di progetto - SCENARIO 4

La simulazione fa riferimento a uno scenario di progetto in cui il tracciato dell'argine è stato definito sulla base di una analisi più dettagliata delle caratteristiche morfologiche dell'area interessata. Inoltre, tra le opzioni possibili, lo scenario rappresenta quella contraddistinta dal più marcato avanzamento compatibile verso fiume relativo alla posizione dell'opera di contenimento dei livelli idrici. In questo modo l'argine in progetto comporta la minore interferenza possibile con le aree agricole coltivate che costituiscono la golena destra posta al di sopra del terrazzo morfologico che delimita più propriamente l'alveo di piena.

Il tracciato ipotizzato dell'argine in progetto parte a monte dalla chiavica Cassino, segue l'arginello esistente in destra del colatore Canale Nuovo (in posizione leggermente avanzata verso fiume rispetto alla fascia B di progetto) e prosegue in sostanziale coincidenza con la stessa fascia fino in corrispondenza del concentrico di San Cipriano; successivamente l'argine si prolunga verso valle, attraversando con una chiavica la roggia Bado, e raggiunge la frazione di C.na Costa, per consentirne la protezione degli insediamenti presenti; infine

piega verso sud e si collega al tracciato della fascia B in modo da contenere i livelli idrici di valle (vedi Figura 30, argine in giallo, fascia B di progetto in rosa e fascia B in nero).

Rispetto alla situazione attuale (scenario 2), l'argine di San Cipriano induce a monte e a valle innalzamenti di livello idrico equivalenti a quelli dello Scenario 3, precedentemente analizzato.

Il limite di inondazione in destra idraulica nel tratto tra gli abitati di San Cipriano e Portalbera, risulta praticamente invariato; il confronto tra le mappe dei tiranti idrici, su cui sono rappresentati i vettori velocità, in golena destra mostrano come non vi sia alcuna modifica apprezzabile delle caratteristiche di deflusso rispetto allo stato attuale.

Di seguito si riportano le mappe per la piena "94+51" che rappresentano l'involuppo delle massime quote idrometriche, dei tiranti idrici e delle velocità; viene inoltre allegata una mappa che riporta la differenza delle quote idrometriche massime tra lo Scenario 4 e lo stato attuale. Nelle figure sono rappresentate le fasce fluviali del PAI (in colore nero la B e in colore rosa la B di progetto), i tracciati dell'argine in progetto a difesa di San Cipriano e di Portalbera (colore giallo) e le sezioni trasversali di rilievo eseguite da AIPO nel 2005.

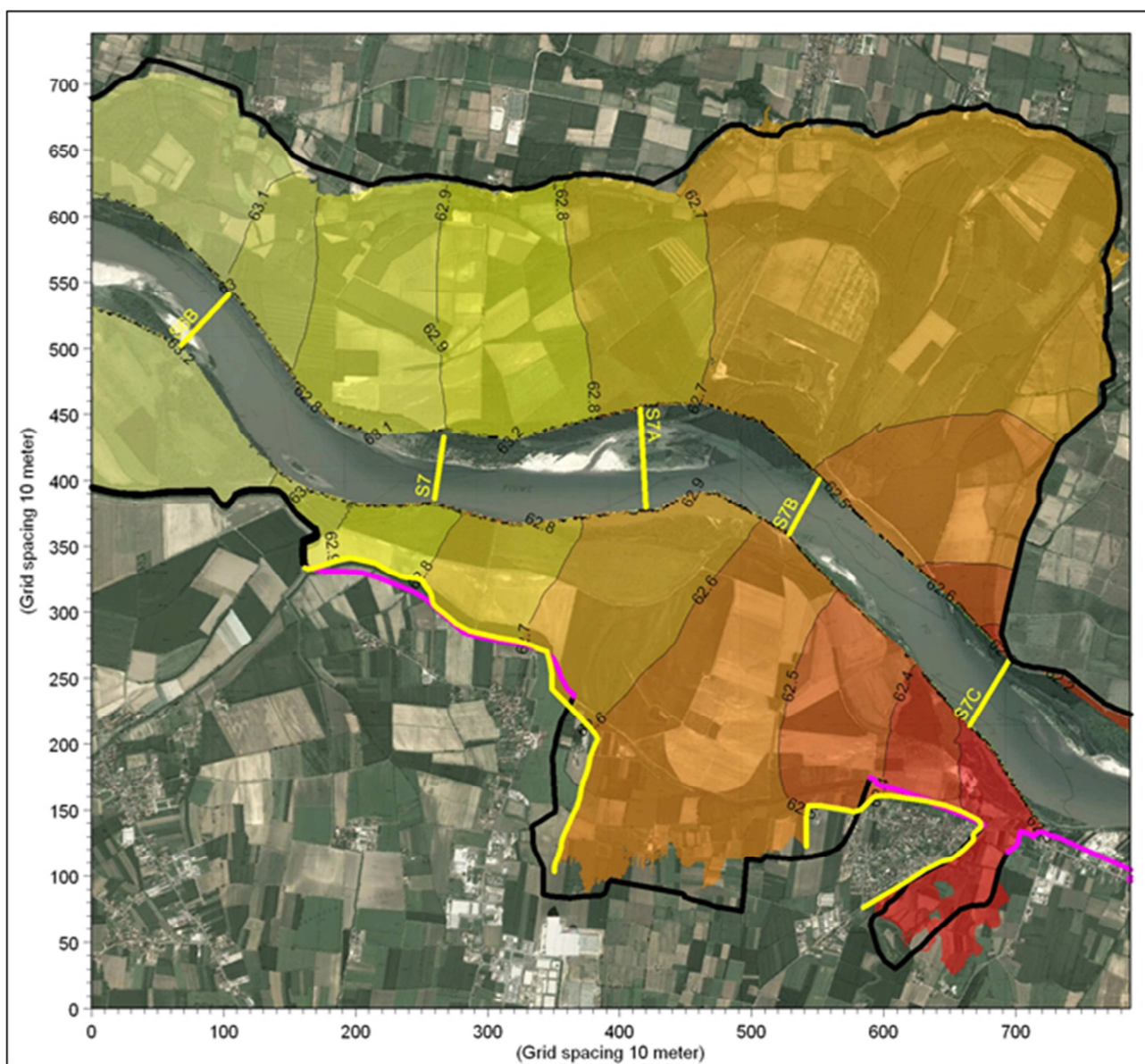


Figura 30 - SCENARIO 4 (piena TR 200 anni/ argine in avanzamento): inviluppo delle massime quote idrometriche.

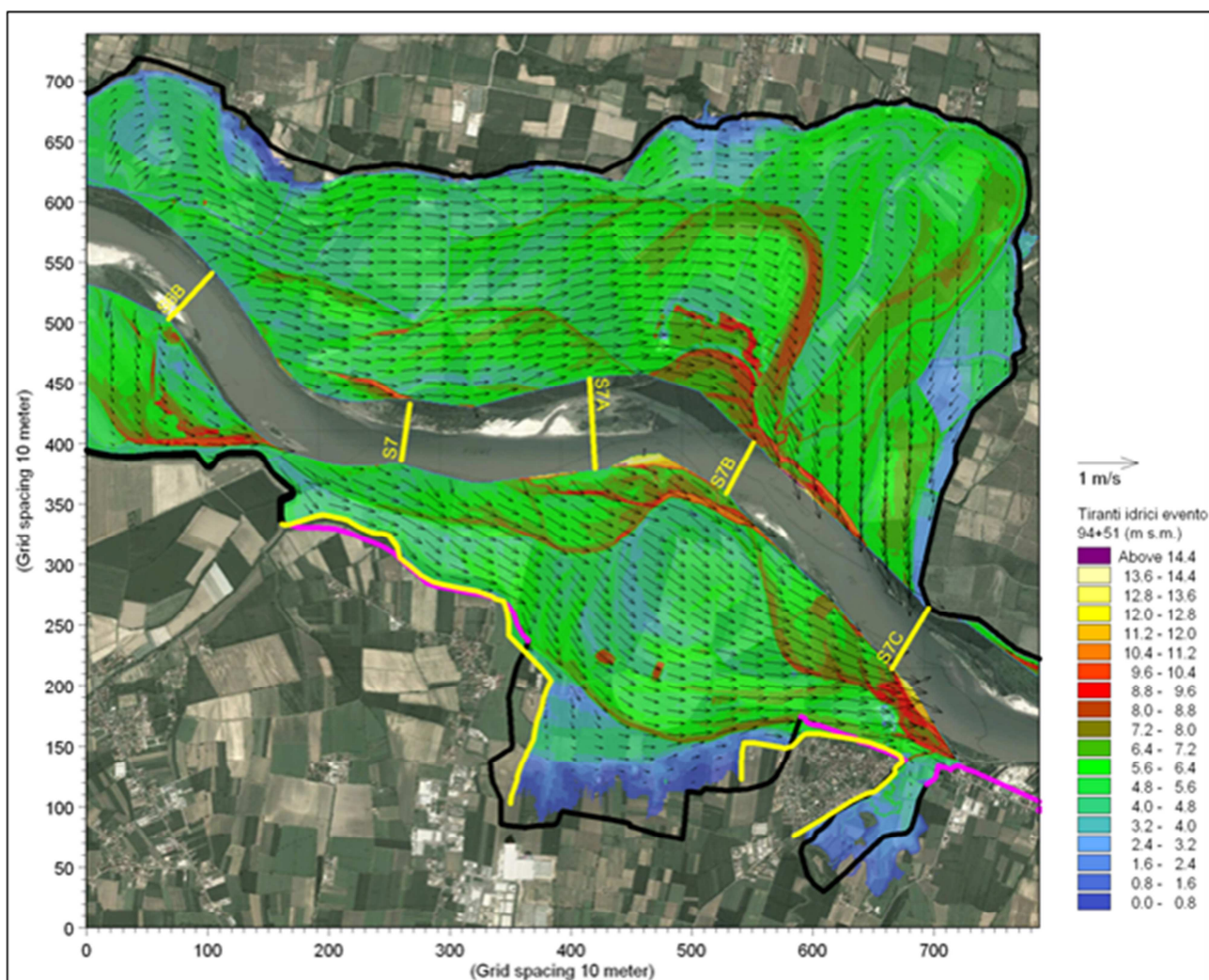


Figura 31 - SCENARIO 4 (piena TR 200 anni/ argine in avanzamento): involucro dei massimi tiranti idrici, con rappresentazione dei vettori velocità.

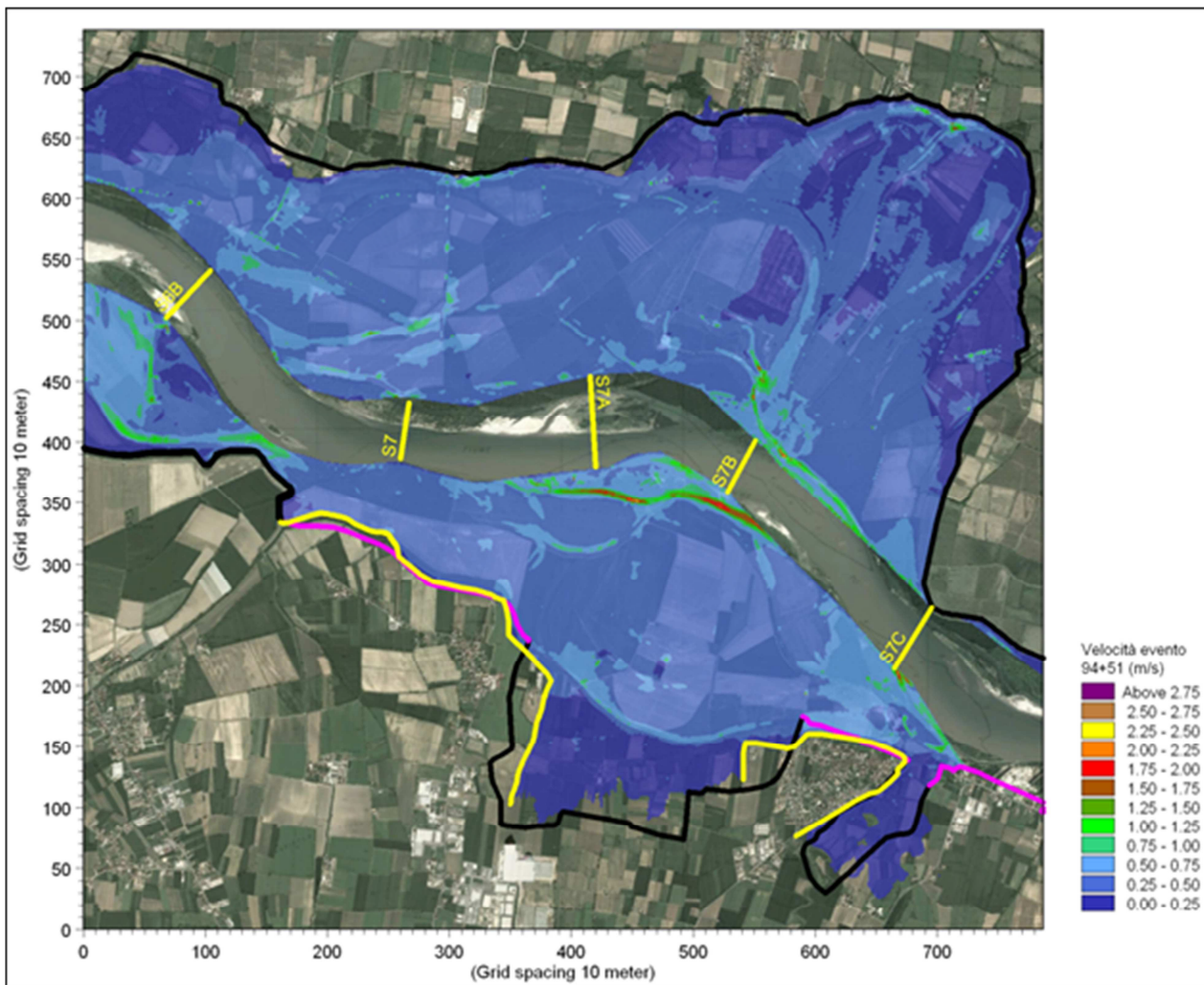


Figura 32 - SCENARIO 4 (piena TR 200 anni/ argine in avanzamento): inviluppo delle massime velocità.

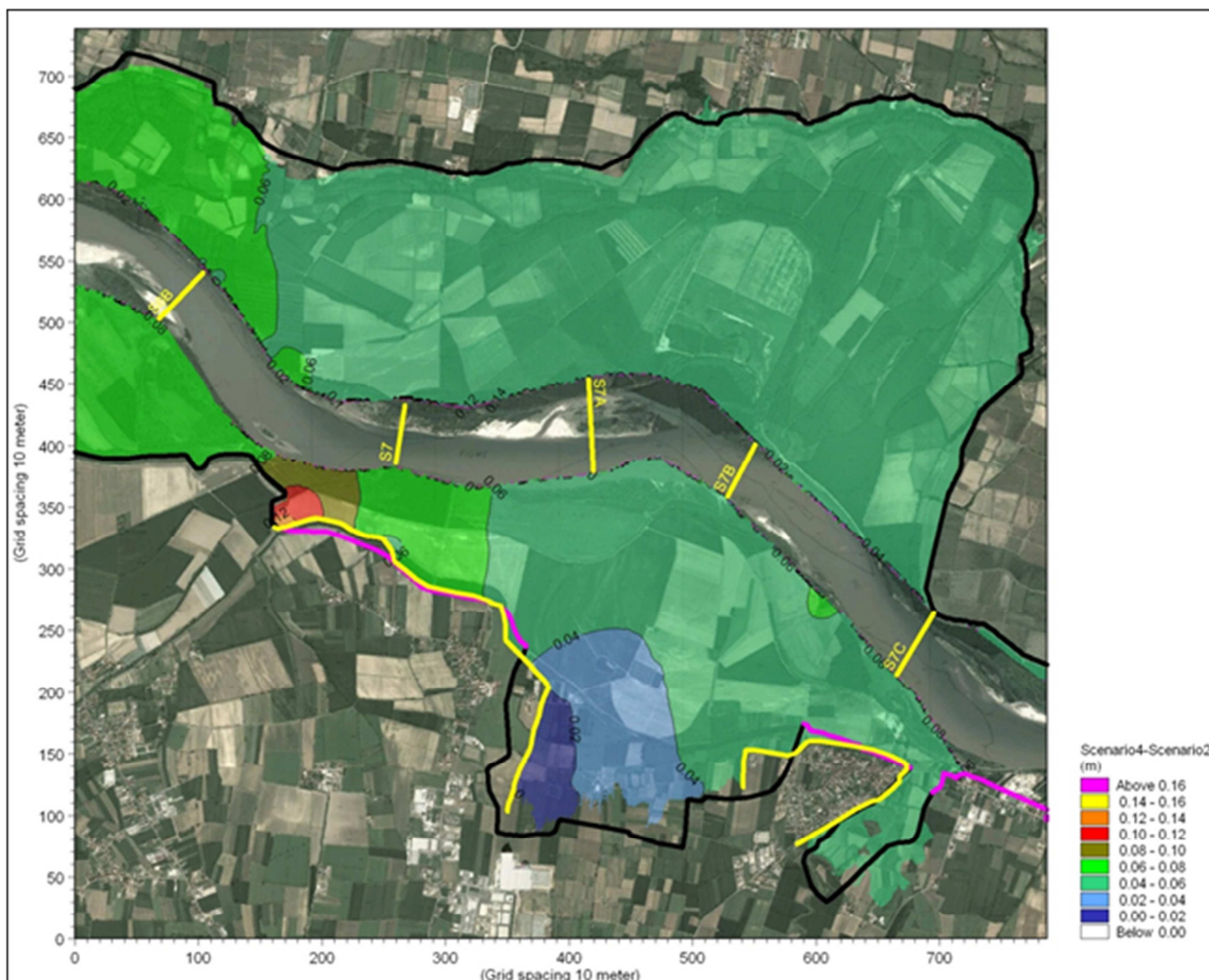


Figura 33 - SCENARIO 4 (piena TR 200 anni/ argine in avanzamento): differenze tra le quote idrometriche massime rispetto allo SCENARIO 2.

4.10 Simulazione della piena con tempo di ritorno 200 anni nelle condizioni di progetto, con tracciato arginale in arretramento rispetto alla fascia B di progetto - SCENARIO 5

La simulazione fa riferimento a uno scenario in cui il tracciato dell'argine, che tiene conto di una analisi più dettagliata delle caratteristiche morfologiche dell'area, è posto in modo da ottenere il massimo arretramento compatibile rispetto alla fascia B di progetto, posizionato al limite degli abitati da proteggere fino a poco oltre il concentrico del Comune; successivamente il percorso è sostanzialmente coincidente con quello dello SCENARIO 4 per tutto il resto del tratto che raggiunge C.na Costa e ripiega a chiudere verso sud (vedi Figura 34, dove il tracciato dell'argine in progetto è in giallo, la fascia B è in nero e la fascia b di progetto è in rosa).

Rispetto alla situazione attuale, l'inserimento dell'argine di San Cipriano secondo il tracciato ipotizzato induce a monte e a valle innalzamenti di livello idrico di poco inferiori a quelli indotti dagli scenari analizzati in precedenza; in particolare in corrispondenza dell'innesto dell'arginatura in progetto con l'argine maestro di monte si assiste ad un abbassamento di livello pari a circa 0,06 m rispetto allo Scenario 4 e di circa 0,04 m

rispetto allo Scenario 3. Nella parte restante del tratto gli innalzamenti di livello rispetto allo stato attuale sono equivalenti per tutti gli Scenari simulati.

Di seguito si riportano le mappe rappresentative delle modalità di deflusso della piena "94+51" che rappresentano l'inviluppo delle massime quote idrometriche, dei tiranti idrici e delle velocità; viene inoltre allegata una mappa che riporta la differenza di quota idrometrica tra lo Scenario 5 e lo stato attuale (Scenario 2).

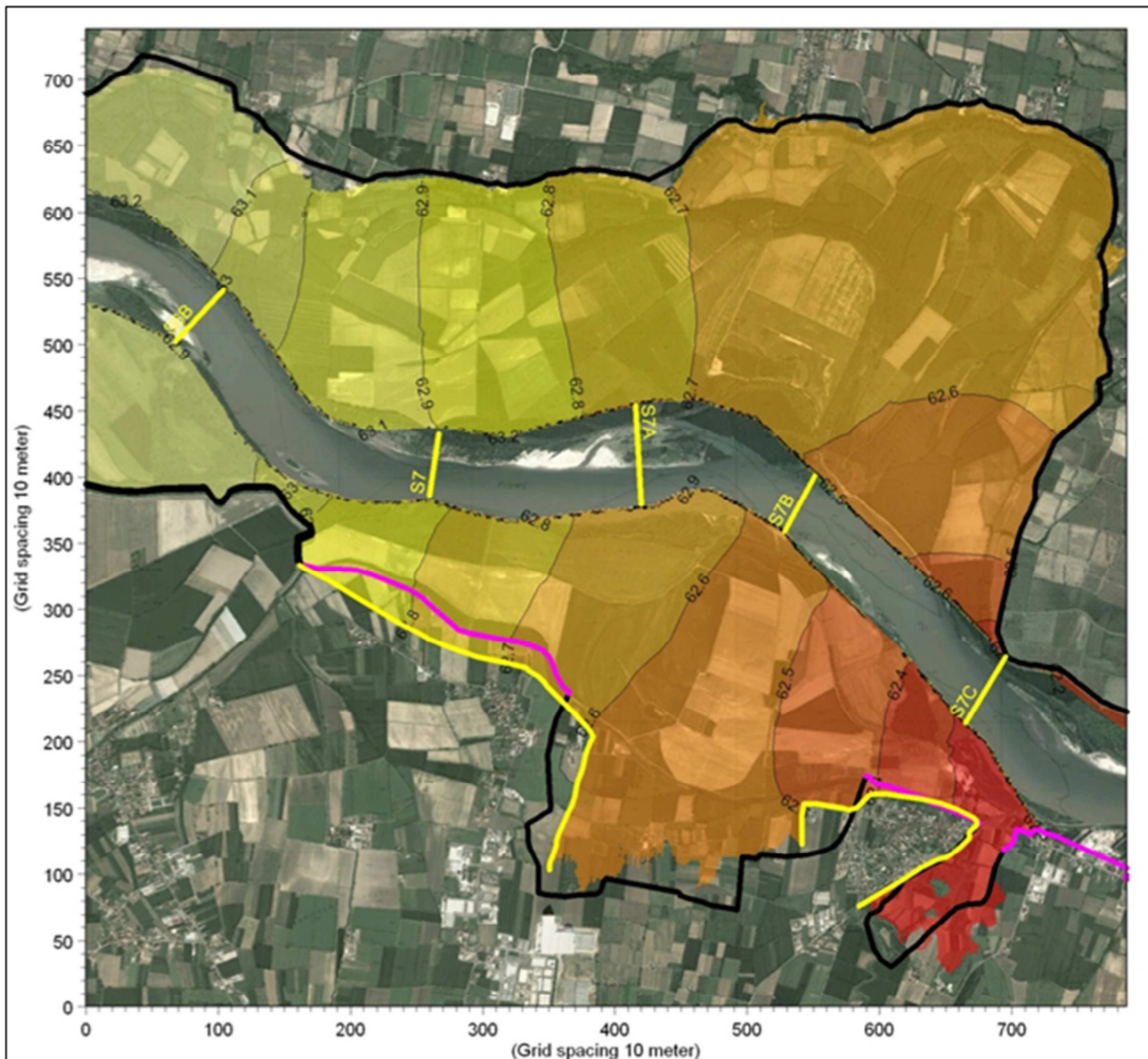


Figura 34 - SCENARIO 5 (piena TR 200 anni/ argine in arretramento): inviluppo delle massime quote idrometriche.

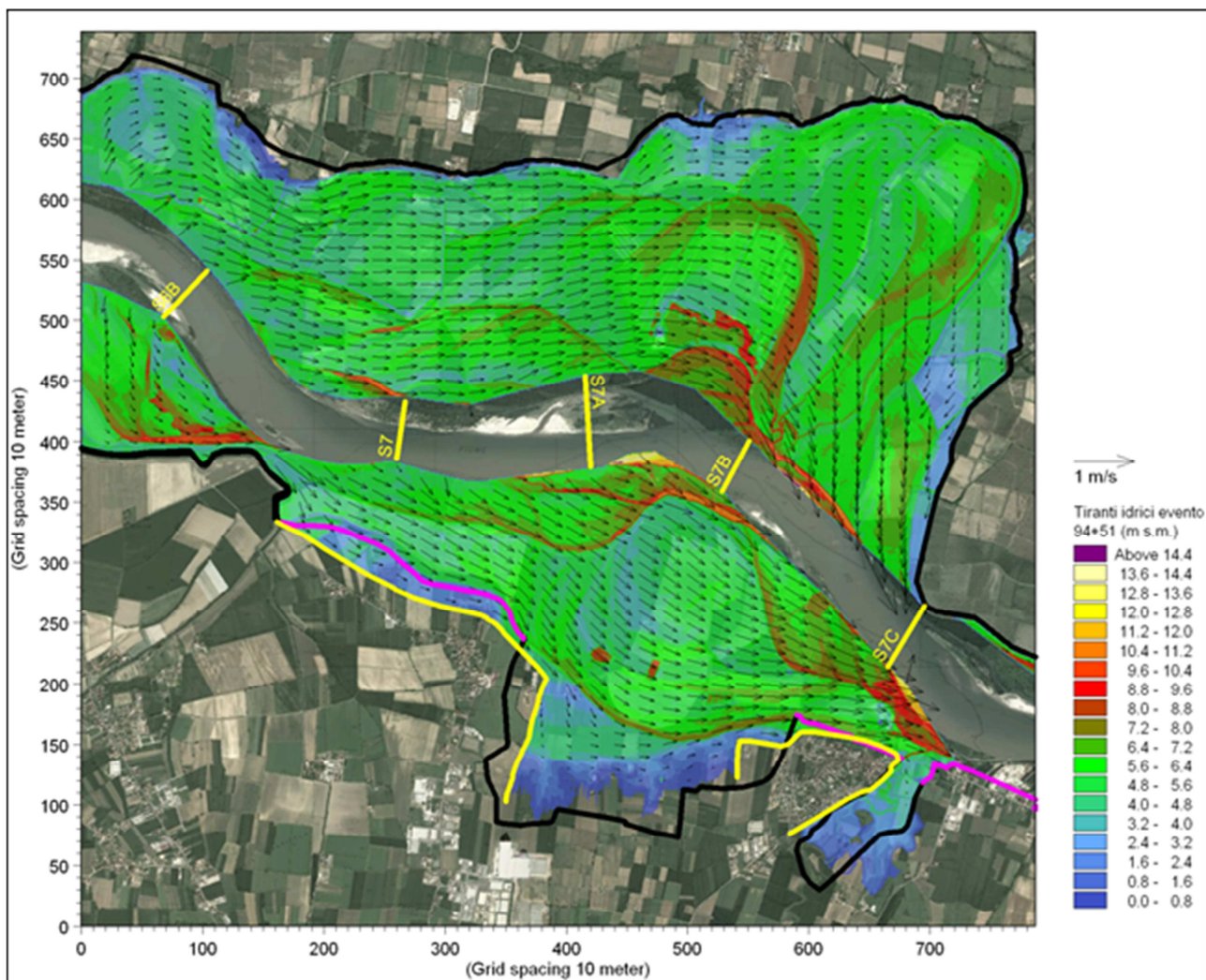


Figura 35 - SCENARIO 5 (piena TR 200 anni/ argine in arretramento): inviluppo dei massimi tiranti idrici, con rappresentazione dei vettori velocità.

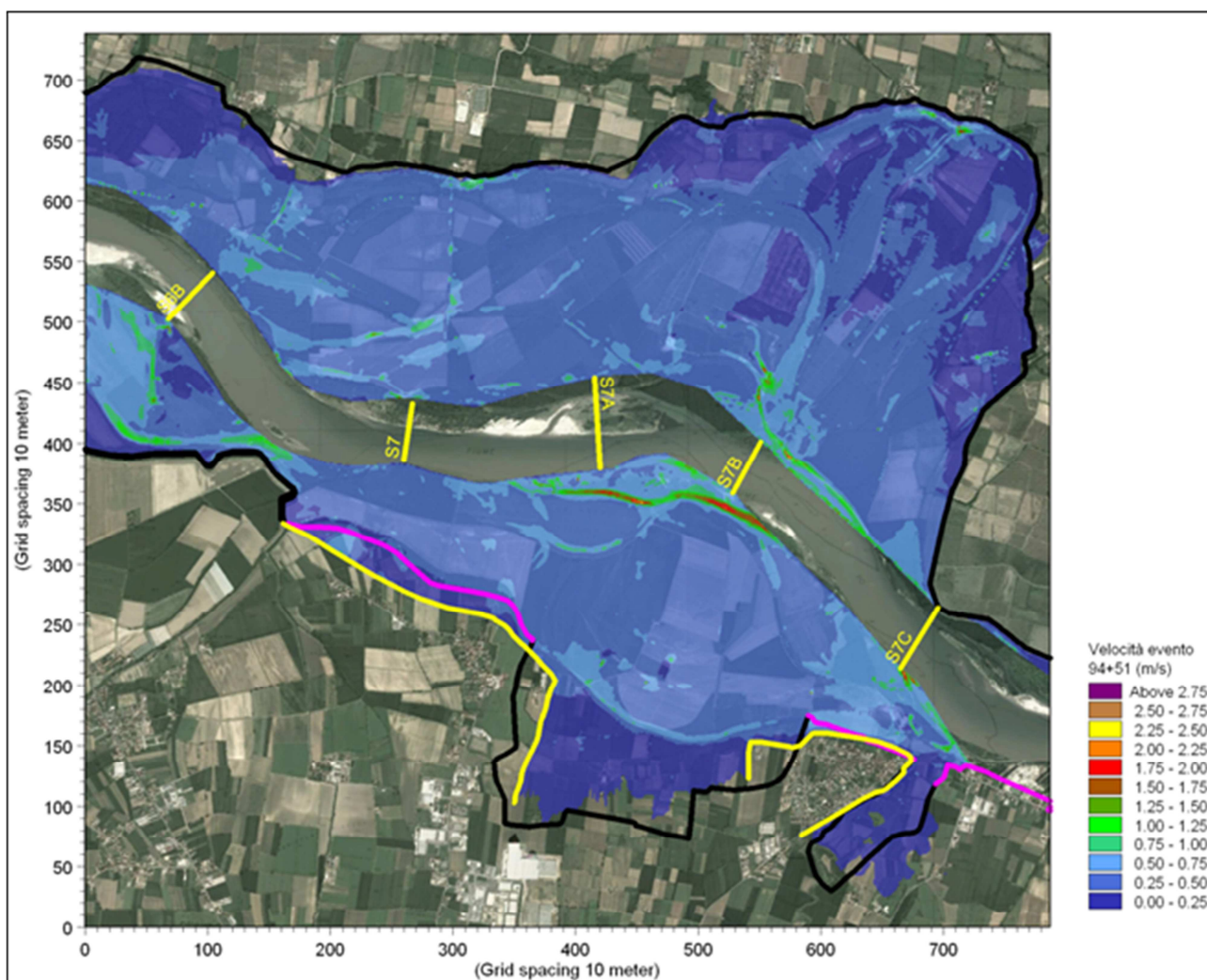


Figura 36 - SCENARIO 5 (piena TR 200 anni/ argine in arretramento): involucro delle massime velocità.

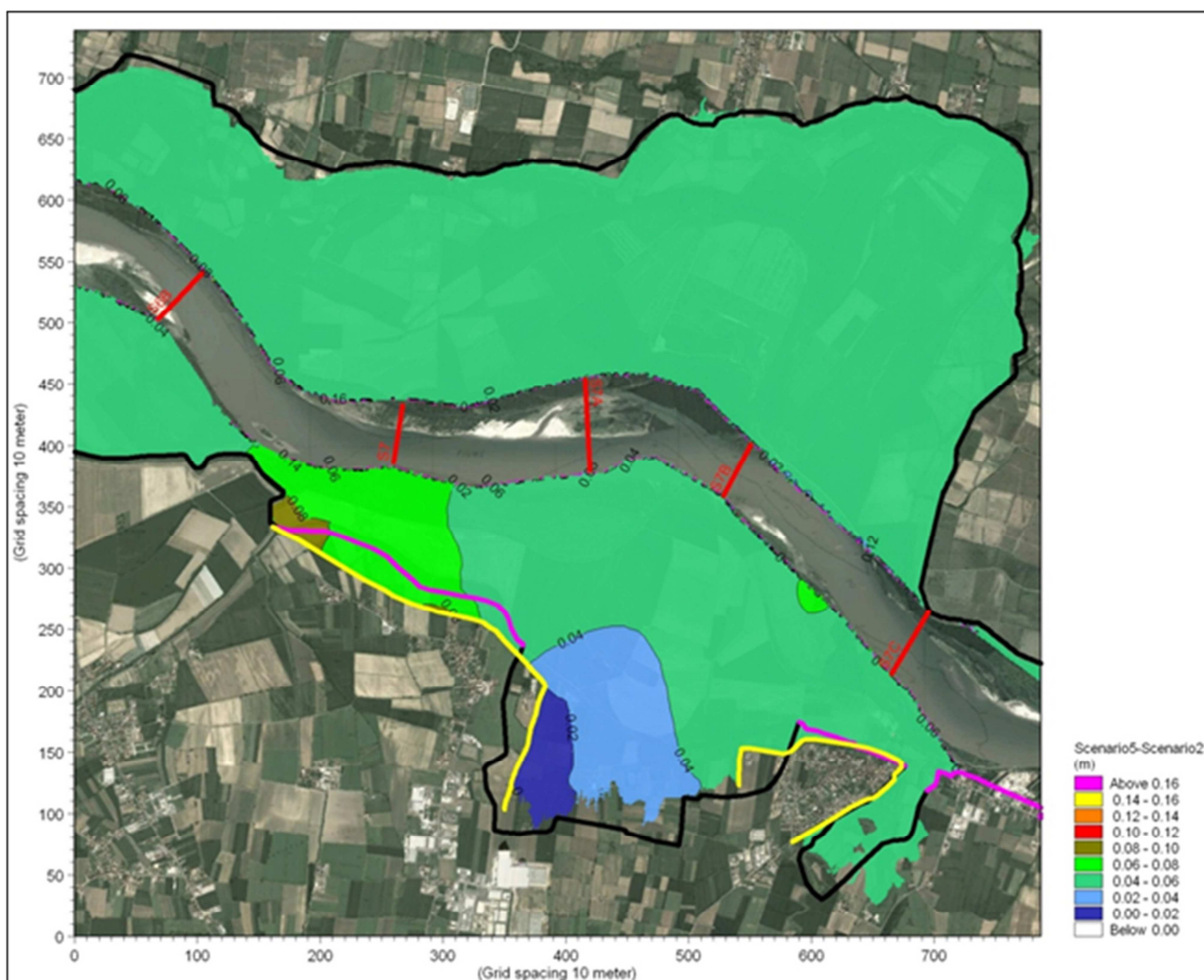


Figura 37 - SCENARIO 5 (piena TR 200 anni/ argine in arretramento): differenze delle quote idrometriche massime rispetto allo SCENARIO 2.

5. QUANTIFICAZIONE DEI VOLUMI DI INVASO E DELL'EFFETTO DI LAMINAZIONE

A partire dai risultati delle simulazioni relative ai diversi scenari, si sono effettuati alcuni confronti specifici utili a quantificare gli effetti indotti dalle diverse ipotesi di intervento considerate.

Nella Tabella 3, per ogni scenario, sono indicati:

- il numero complessivo di celle allagate nelle aree golenali del Po incluse nel modello MIKE 21;
- il valore medio (hmed) delle massime altezze d'acqua raggiunte nel corso della simulazione sulle celle del modello 2D;
- il volume massimo invasato nelle aree golenali incluse nel modello MIKE 21;
- la differenza assoluta di volume invasato rispetto allo SCENARIO 2 (m³) ovvero la situazione attuale;
- la differenza relativa di volume invasato rispetto allo SCENARIO 2 (%);
- la differenza assoluta di volume invasato rispetto allo SCENARIO 3 (m³) ovvero la situazione di progetto con tracciato arginale coincidente con il limite di fascia B di progetto PAI;
- la differenza relativa di volume invasato rispetto allo SCENARIO 3 (%).

Scenario	N° celle	hmed (m)	Volume (m ³)	ΔV su scenario2 (m ³)	ΔV su scenario2 (%)	ΔV su scenario3 (m ³)	ΔV su scenario3 (%)
1	303933	4,127180	125438619,9	-	-		
2	311954	4,876008	152109020,0	-	-		
3	269477	5,289354	142535924,8	-9573095,2	-6,29%	-	-
4	266072	5,322784	141624378,4	-10484641,5	-6,89%	-911546,3	-0,64%
5	270535	5,273997	142680077,8	-9428942,1	-6,20%	144153,1	0,10%

Tabella 3 - Volumi massimi di invaso nelle aree golenali e confronti tra i risultati dei vari scenari esaminati.

L'intervento di arginatura in progetto determina una riduzione di volume massimo invasato riferito alla piena di progetto "95+51" pari a circa $9,4 \div 10,5 \cdot 10^6$ m³, corrispondente a una riduzione di circa il 6,2÷6,9 % del volume massimo complessivamente invasato nelle condizioni attuali. La riduzione di volume è ovviamente maggiore per lo SCENARIO 4 che prevede un tracciato arginale in avanzamento rispetto alla fascia B di progetto e minore per lo SCENARIO 5 in cui il tracciato arginale è previsto invece in arretramento.

Rispetto allo SCENARIO 3 (argini su limiti di fascia B di progetto PAI), lo SCENARIO 4 (argine in avanzamento) comporta una riduzione di volume pari a circa $0,91 \cdot 10^6$ m³ (-0,64%) mentre lo SCENARIO 5 (argine in arretramento) determina un aumento di volume pari a circa $0,14 \cdot 10^6$ m³ (+0,10%).

Nella Figura 38 è rappresentato il confronto tra il colmo dell'idrogramma con tempo di ritorno 200 anni in ingresso al modello (13600 m³/s) e i colmi degli idrogrammi in uscita dal modello a Spessa nei vari scenari di simulazione considerati, che risultano rispettivamente pari a circa:

- 13.142 m³/s nella situazione attuale (SCENARIO 2) in cui si riscontra il massimo effetto di laminazione dell'onda di piena, pari al 3,37%;
- 13.229 m³/s nella situazione di progetto con argine coincidente con il limite di fascia B di progetto PAI (SCENARIO 3), cui corrisponde un effetto di laminazione pari al 2,73%;
- 13.240 m³/s nella situazione di progetto con argine in avanzamento rispetto al limite di fascia B di progetto (SCENARIO 4), cui corrisponde un effetto di laminazione pari al 2,65%;
- 13.226 m³/s nella situazione di progetto con argine in arretramento rispetto al limite di fascia B di progetto (SCENARIO 5), cui corrisponde un effetto di laminazione pari al 2,75%.

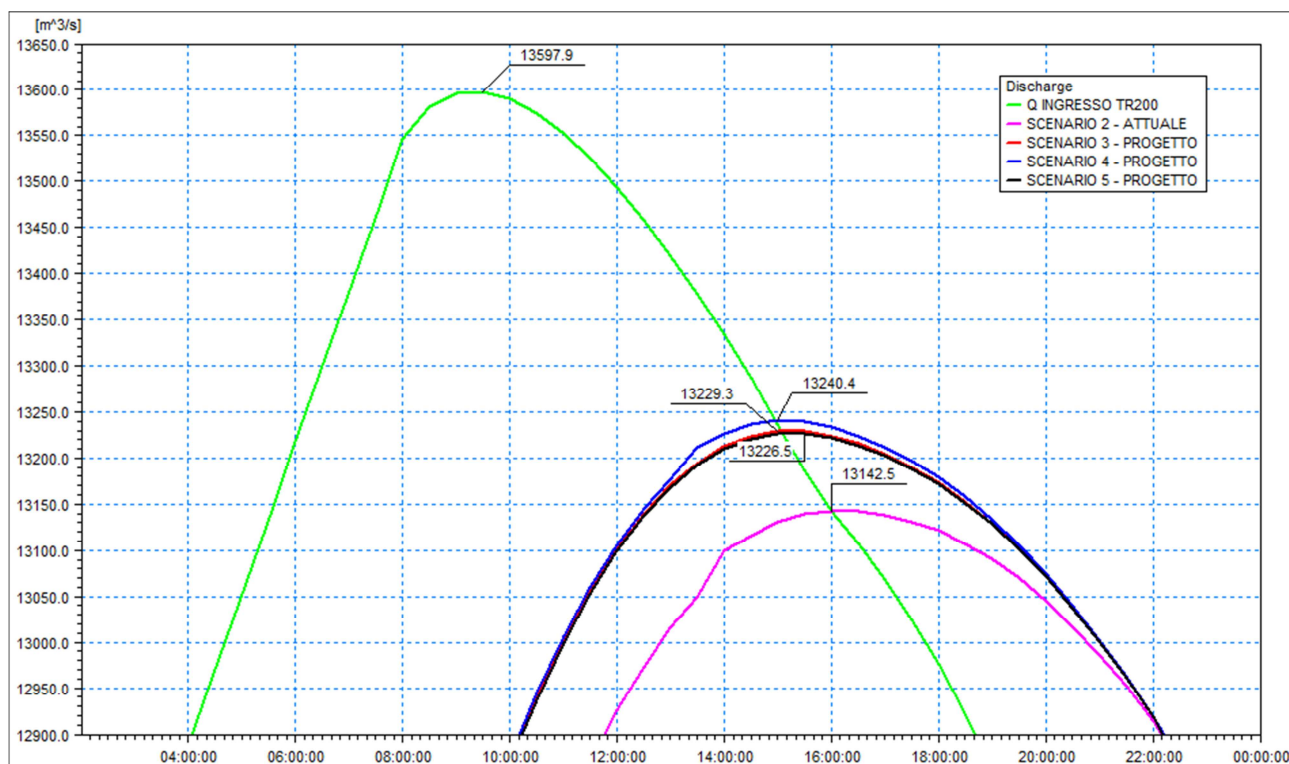


Figura 38 - Confronto tra il colmo dell'idrogramma in ingresso al modello e il colmo degli idrogrammi in uscita dal modello a Spessa nei vari scenari di simulazione considerati.

La realizzazione dell'argine di San Cipriano determina pertanto una riduzione della laminazione del colmo di piena duecentennale pari a circa $85 \div 100 \text{ m}^3/\text{s}$ rispetto alla situazione attuale mentre le variazioni di laminazione tra le varie ipotesi di tracciato arginale risultano contenute e poco apprezzabili.

Nella Figura 40 è infine riportato un confronto tra i profili longitudinali dei massimi livelli di piena con tempo di ritorno 200 anni lungo l'asse dell'alveo inciso del Po nei vari scenari di simulazione considerati, in cui sono evidenziate le tracce delle sezioni trasversali d'alveo di rilievo introdotte nel modello.

In corrispondenza della sezione S7, ubicata in posizione intermedia al tracciato arginale in progetto, le quote massime raggiunte dalla superficie libera in centro alveo sono le seguenti:

- 62,88 m s.m. nella situazione attuale (SCENARIO 2);
- 62,94 m s.m. nella situazione di progetto con argine coincidente con il limite di fascia B di progetto PAI (SCENARIO 3);
- 62,95 m s.m. nella situazione di progetto con argine in avanzamento rispetto al limite di fascia B di progetto (SCENARIO 4);
- 62,94 m s.m. nella situazione di progetto con argine in arretramento rispetto al limite di fascia B di progetto (SCENARIO 5).

Si può osservare come i livelli di piena calcolati in alveo con il modello MIKE 11 risultino circa $0,10 \div 0,15 \text{ m}$ maggiori di quelli determinati in golena lungo il prolungamento delle sezioni trasversali d'alveo con il modello MIKE 21 collegato dinamicamente al precedente, a causa del maggiore carico idraulico presente in alveo che origina la tracimazione delle sponde e l'alimentazione delle golene stesse con i flussi di esondazione.

Nella tavola allegata alla presente relazione (elaborato 2) sono riportati a confronto i risultati dei tre scenari di progetto considerati su un ingrandimento di dettaglio centrato in corrispondenza dell'abitato di San Cipriano: lungo le varie ipotesi di tracciato del rilevato arginale sono evidenziati in particolare le curve dei massimi livelli di piena raggiunti nel corso del transito dell'evento con tempo di ritorno 200 anni e il corrispondente campo dei vettori velocità di flusso.

6. SINTESI DELLO STUDIO IDRAULICO – SCELTA DEL TRACCIATO DI PROGETTO

L'analisi idrodinamica è stata eseguita mediante la messa a punto e l'applicazione di un modello numerico in grado di combinare dinamicamente l'approccio monodimensionale lungo l'alveo inciso del Po (codice di calcolo MIKE 11) e quello bidimensionale sulle aree golenali (codice di calcolo MIKE 21).

Le verifiche idrauliche di dettaglio eseguite a supporto della progettazione hanno analizzato i seguenti scenari preliminari di implementazione del modello:

- SCENARIO 1: simulazione del deflusso della piena massima storica transitata nell'ottobre del 2000 nelle condizioni di stato attuale, finalizzata alla taratura del modello idrodinamico;
- SCENARIO 2: simulazione del deflusso della piena di riferimento con tempo di ritorno 200 anni (denominata "94+51") nelle condizioni di stato attuale, utilizzata come termine di confronto per le simulazioni di progetto.

La simulazione dell'evento 2000 ha riprodotto in modo coerente i livelli massimi osservati nel corso della piena storica e le aree di esondazione da essi generate, mentre la simulazione della piena di progetto con tempo di ritorno 200 anni nelle condizioni attuali ha fornito massime altezze d'acqua superiori di $0,9 \div 1,0$ m rispetto a quelle dell'evento dell'ottobre 2000, con buona corrispondenza rispetto ai valori del profilo di progetto del PAI (pubblicati nella *"Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica"*), con differenze legate unicamente alla diversa schematizzazione numerica impiegata nei due studi: di tipo "quasi-2D" nel PAI, riferita alle sole sezioni trasversali d'alveo del 2005, e di maggiore dettaglio, di tipo 2D, basata sul rilievo LIDAR, nel presente studio.

Le successive simulazioni sono state condotte con lo scopo di analizzare opzioni alternative di intervento che si sono concentrate sulle possibili scelte di tracciato del rilevato arginale.

Sono stati costruiti tre possibili scenari di progetto:

- tracciato dell'argine coincidente, per estensione e posizione planimetrica, con quello della fascia B di progetto del PAI (SCENARIO 3);
- tracciato dell'argine in progetto che, partendo a monte dalla chiavica Cassino, segue l'arginello esistente in sponda destra del colatore Canale Nuovo (in posizione leggermente avanzata verso fiume rispetto alla fascia B di progetto) e prosegue in sostanziale coincidenza con la fascia B di progetto fino in corrispondenza del concentrico di San Cipriano; successivamente l'argine si prolunga verso valle e raggiunge la frazione di C.na Costa per consentirne la protezione degli insediamenti presenti; infine piega verso sud e si collega al tracciato della fascia B in modo da contenere i livelli idrici di valle (SCENARIO 4); al fine di evitare l'inserimento di una nuova chiavica in corrispondenza della roggia Bedo, è previsto la deviazione della roggia stessa, spostando l'alveo della stessa verso valle, al di fuori dell'area protetta dall'arginatura in progetto in modo da consentire lo scarico libero nella lanca esistente poco a valle del punto di confluenza attuale;

- tracciato dell'argine in arretramento rispetto alla fascia B di progetto, posizionato al limite degli abitati da proteggere fino a poco oltre il concentrico del Comune; successivamente il percorso è sostanzialmente coincidente con quello dello SCENARIO 4 per tutto il resto del tratto che raggiunge C.na Costa e ripiega a chiudere verso sud (SCENARIO 5).

Oltre alla variazione del profilo di piena all'interno del tronco simulato, dovuta alla presenza dell'argine che preclude l'inondazione della golena destra in corrispondenza dell'abitato, gli effetti idrodinamici correlati alla presenza dell'opera sono rappresentati dalle seguenti grandezze:

- variazione del volume massimo invasato all'interno del tronco rispetto alla situazione attuale;
- variazione del valore della portata di colmo nella sezione di uscita del tronco rispetto alla situazione attuale.



Figura 39 - Stralcio planimetrico con rappresentazione delle tre soluzioni di tracciato alternative analizzate per la realizzazione dell'argine a difesa dell'abitato di San Cipriano Po: SCENARIO 3 (in blu), SCENARIO 4 (in rosso), SCENARIO 5 (in verde).

In funzione dei parametri sopra indicati è stato possibile valutare per ciascuna opzione alternativa gli effetti idraulici connessi all'inserimento dell'opera rispetto alle attuali condizioni del corso d'acqua e a quelle di progetto definite, a scala di pianificazione, dal PAI.

In relazione ai risultati ottenuti, è stata adottata come soluzione da realizzare quella corrispondente allo SCENARIO 5, a cui corrisponde un tracciato dell'argine posto in modo da ottenere il massimo arretramento compatibile rispetto alla fascia B di progetto e quindi posizionato al limite degli abitati da proteggere fino a poco oltre il concentrico del comune; successivamente il percorso raggiunge C.na Costa e ripiega a chiudere verso sud.

Al di là dei parametri quantitativi di natura strettamente idraulica, la soluzione adottata consente di mantenere la massima dimensione dell'area golenale destinata all'espansione del deflusso dei piena del fiume e di posizionare il rilevato arginale in una configurazione che comporta le minime sollecitazioni idrodinamiche rispetto al deflusso della corrente. Complessivamente pertanto la scelta comporta il minimo di modifiche introdotte sulle condizioni di deflusso del sistema fluviale e le migliori condizioni di sicurezza per le aree abitate protette a tergo, avendo un argine che, in quanto arretrato, risulta meno sollecitato dalla corrente.

Sotto l'aspetto del profilo involuppo di piena al colmo, le tre opzioni di intervento non differiscono tra loro in misura significativa (Figura 40).

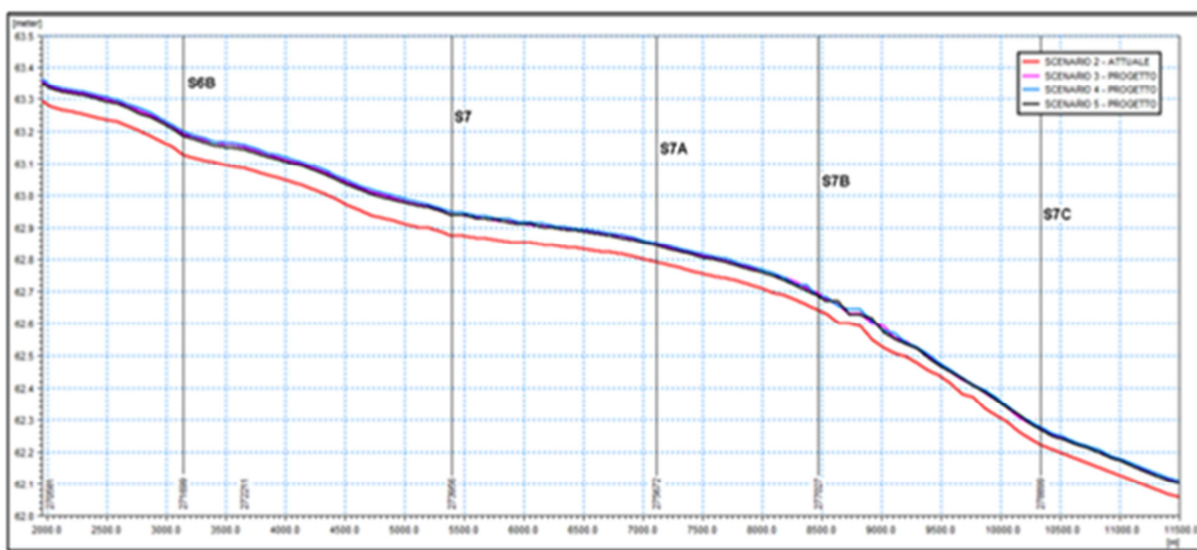
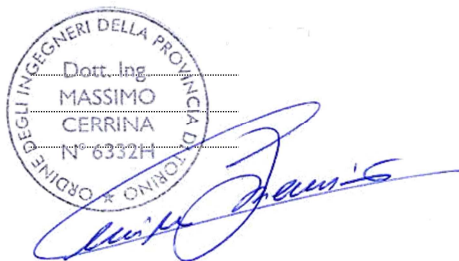


Figura 40 - Confronto tra i profili longitudinali dei livelli di piena con TR 200 anni lungo l'alveo inciso del Po (risultati del modello MIKE 11) nei vari scenari di simulazione considerati.

7. RESPONSABILITÀ NELLO SVILUPPO DEGLI ELABORATI

Con riferimento al sistema di qualità di Hydrodata ISO 9001 Vi precisiamo che la responsabilità nello sviluppo degli elaborati è in capo alle seguenti persone:

redazione	M.Cerrina
verifica	R. Dutto
autorizzazione	I. Fresia



ALLEGATO 1 - Descrizione del modello idraulico
MIKE11 HD

1. PREMESSA

Il programma MIKE 11 è stato realizzato dal DHI (Danish Hydraulic Institute) a partire dal programma SYSTEM 11 che dal 1972, anno della sua messa a punto, ad oggi, è stato usato in un grande numero di applicazioni in tutto il mondo con ottimi risultati e riconoscimenti.

MIKE 11 è un programma generale per la simulazione del flusso idrico a pelo libero in estuari, fiumi, sistemi di irrigazione e simili corpi idrici. MIKE 11 simula il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. E' possibile tenere conto di:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e convergenti).

L'adozione del programma di simulazione MIKE 11, consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

2. DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.

Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità e attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle, cioè simulare i fenomeni di rigurgito.

Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati sia reti idrauliche con maglie chiuse.

3. EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE 11 mediante il terzo tipo di formulazione risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- a) il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità.
- b) la pendenza del fondo è piccola.

- c) le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

dove:

A = area della sezione bagnata (m²);

C = coefficiente di attrito di Chezy (m^{1/2}s⁻¹);

g = accelerazione di gravità (m s⁻²);

h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);

Q = portata (m³/s);

R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale addotta (m²/s).

4. SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce è applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

5. APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare tutti i termini legati alla quantità di moto nelle equazioni generali di De Saint Venant:

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine $\partial h / \partial x$. Per ragioni di stabilità questo termine nella soluzione è smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

6. DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. In MIKE 11 la descrizione di ogni struttura viene effettuata in un segmento di corso d'acqua.

Tipi di strutture simulate

Tipo 1. Stramazzo a larga soglia

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

Tipo 2. Relazione Q-h

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi della struttura "tipo 1".

Tipo 3. Tombino

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". Il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso. Deve essere inserita una relazione Q-h che contempli tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

Tipo 4. Relazione Q-t

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Tipo 5. Relazione $Q = A(Z_{j1}) \cdot Z_{j2}$

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

Tipo 6. Strutture mobili

E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

7. RESISTENZA D'ATTRITO

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler.

Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{C^2 AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{M^2 AR^{4/3}}$$

dove M è il coefficiente di Strickler, pari a $1/n$, essendo n il coefficiente di Manning.

8. CONDIZIONI INIZIALI

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

9. METODO DI SOLUZIONE

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).

La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

10. CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne, attrito indotto dal vento. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

11. DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

La scelta ottimale dei passi di calcolo Dx (spazio) e Dt (tempo) da utilizzare nell'ambito di una simulazione è molto importante perché questi parametri possono condizionare pesantemente la stabilità del calcolo numerico e quindi i risultati stessi della simulazione.

Esistono due differenti criteri per determinare correttamente i passi di calcolo Dx e Dt. Essi sono descritti nel seguito.

1) Criterio di Courant

$$Cr = \frac{\sqrt{g \cdot d} + V}{Dx} \cdot Dt$$

dove:

Cr = numero di Courant;
d = altezza d'acqua media;
V = velocità media della corrente;
g = accelerazione di gravità;
Dt, Dx = passi di calcolo.

Il numero di Courant esprime quanti Dx vengono percorsi da un'onda, causata da una piccola perturbazione, che si muove in un intervallo di tempo Dt unitario.

Per correnti lente ($Fr < 1$), il valore massimo del numero di Courant deve essere inferiore a 20.

2) Criterio della velocità

Il criterio della velocità stabilisce che i passi Dx e Dt di calcolo siano definiti in modo tale che la corrente si muova di uno spazio Dx in un tempo maggiore di Dt, e cioè:

$$V \cdot Dt < Dx$$

dove V è velocità media della corrente.

In definitiva entrambi i criteri esprimono il concetto che, per un dato passo di tempo Δt , Δx deve essere maggiore di un valore definito; contemporaneamente sia Δt che Δx devono essere inferiori a valori prestabiliti, in modo da descrivere correttamente il fenomeno in esame.

Il modello DHI/MIKE 11 genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la distanza tra due sezioni sia maggiore di Δx , vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro Δx o meno.

In osservanza ai menzionati criteri è possibile definire unicamente intervalli di valori per Δx e Δt e non valori univoci per ogni simulazione.

ALLEGATO 2 - Descrizione del codice di calcolo MIKE
21 - HD

Il codice di calcolo MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile approssimare il comportamento con l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei: il numero "21" che contraddistingue il codice sta proprio ad indicare la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il modulo idrodinamico risolve le equazioni complete del moto di de St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema di de St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega q - f V V_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega p - f V V_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$	=	profondità dell'acqua;
$\zeta(x,y,t)$	=	quota del pelo libero;
$p,q(x,y,t)$	=	portate unitarie nelle direzioni x e y;
$C(x,y)$	=	coefficiente di scabrezza di Chezy;
g	=	accelerazione di gravità;
$f(V)$	=	fattore d'attrito del vento;
$V, V_x, V_y(x,y,t)$	=	velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

$\Omega(x,y)$	= parametro di Coriolis;
$p_a(x,y,t)$	= pressione atmosferica;
ρ_w	= densità dell'acqua;
x,y	= coordinate spaziali;
t	= tempo;
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	= componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;
S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}	= componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y . La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hE \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

tali due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_s è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

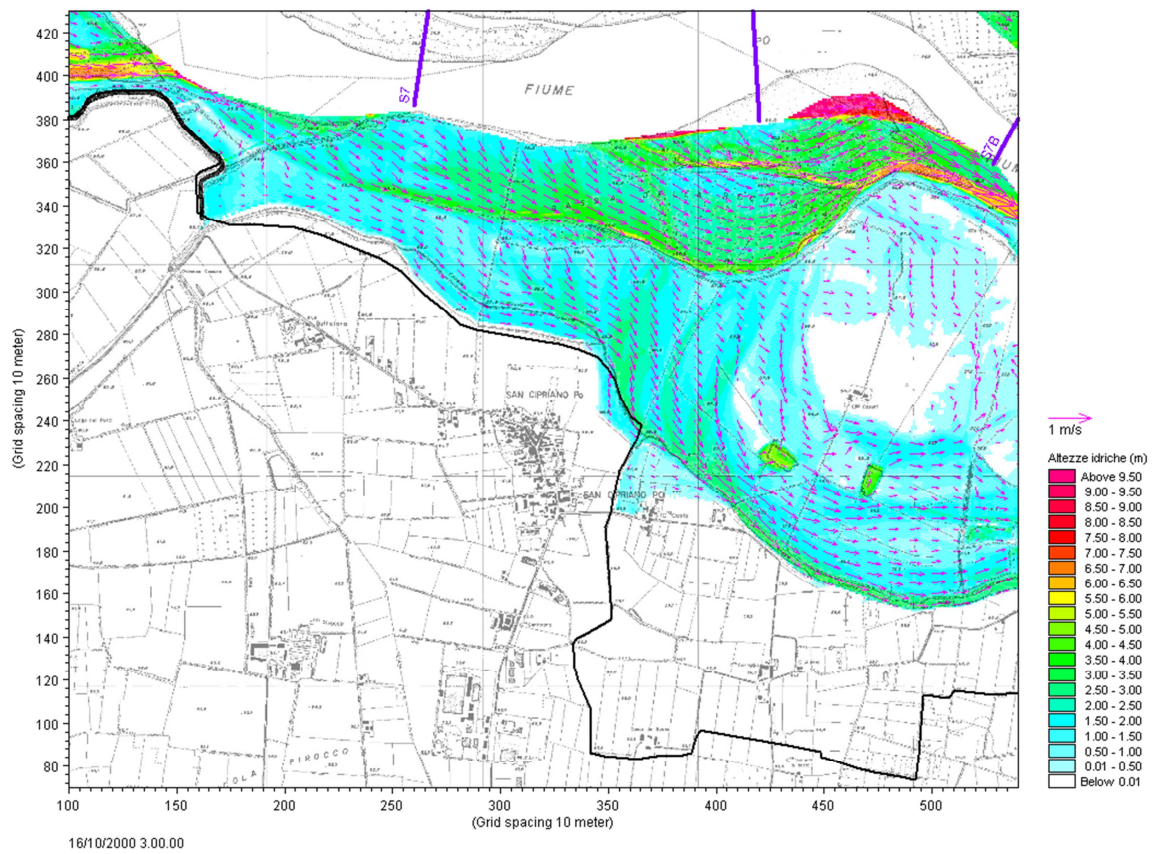
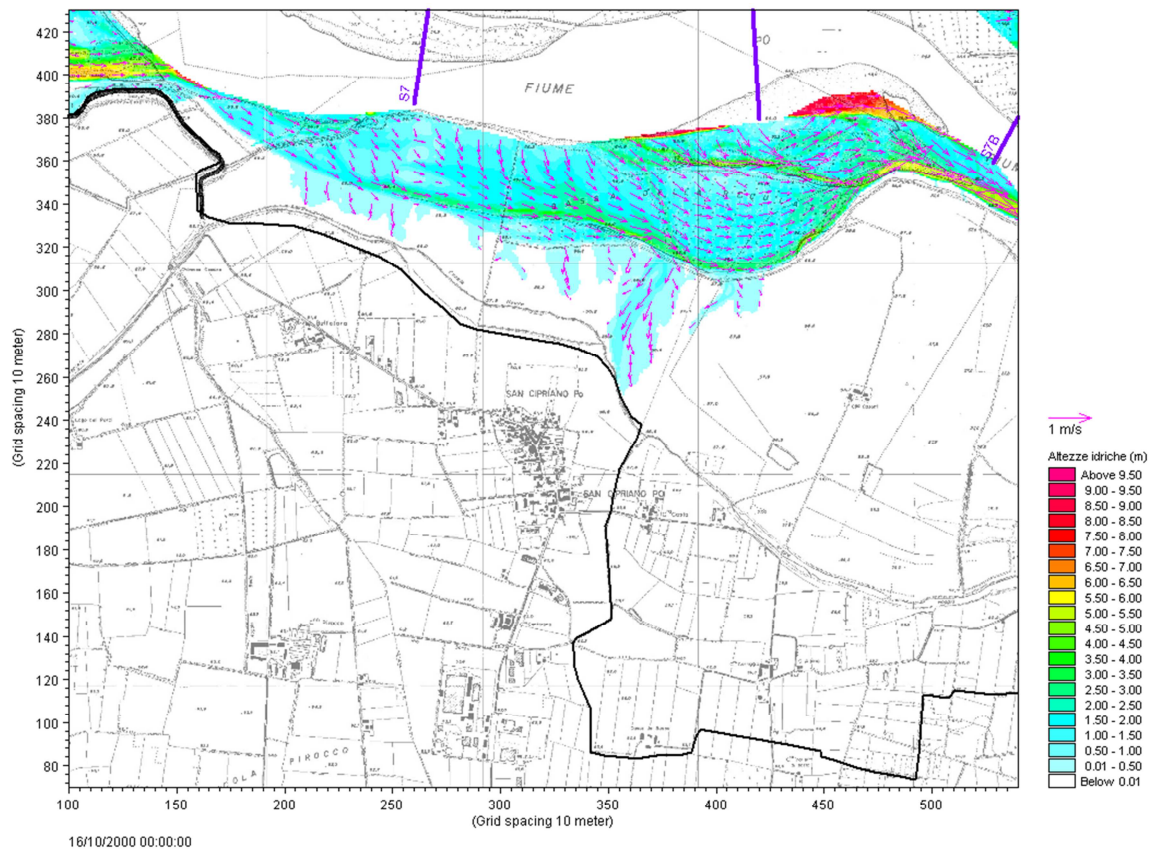
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} hE \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

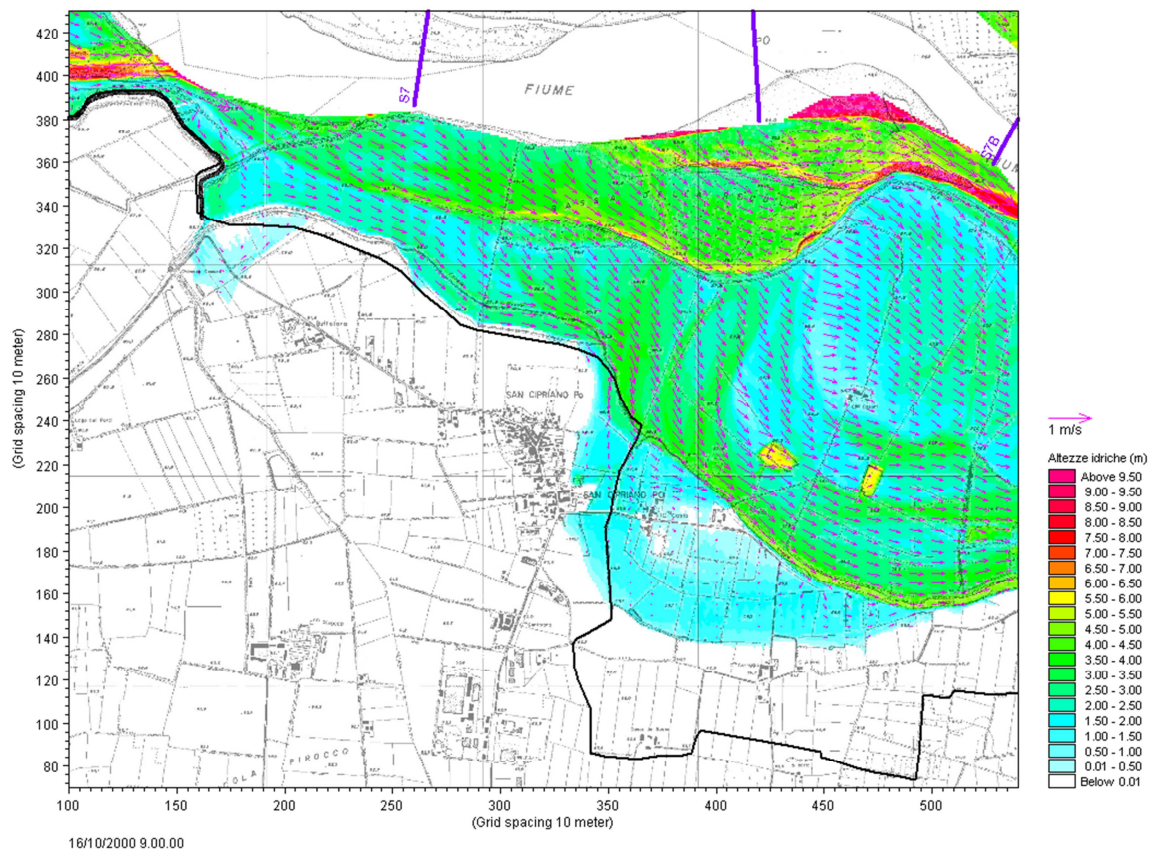
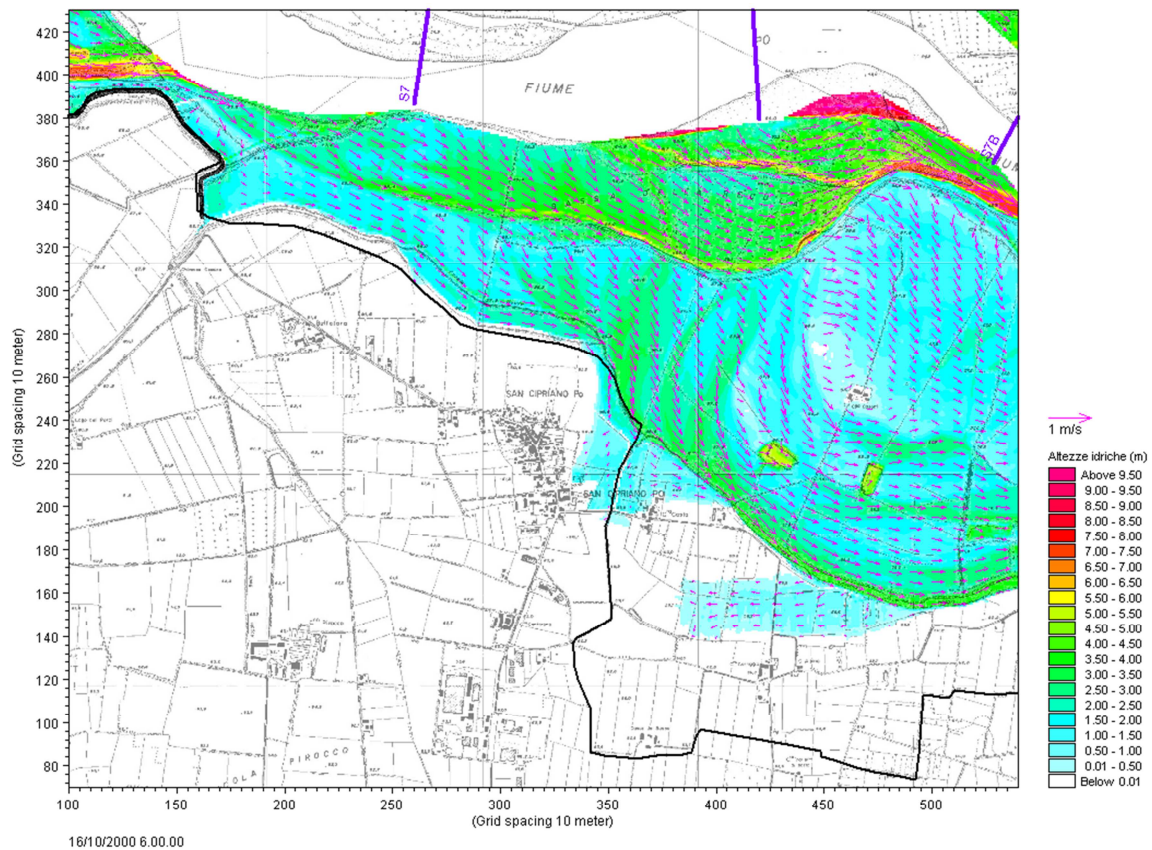
La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ($m^3/s/m$) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m^3/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

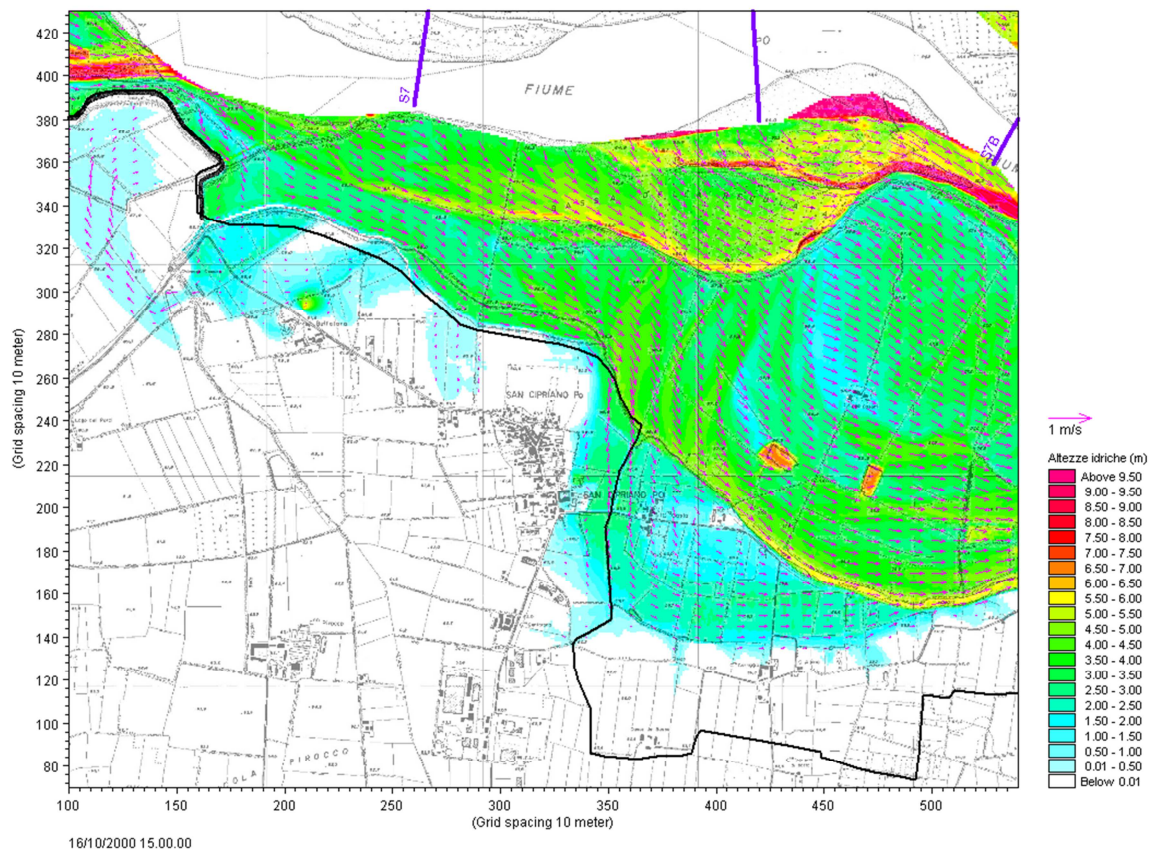
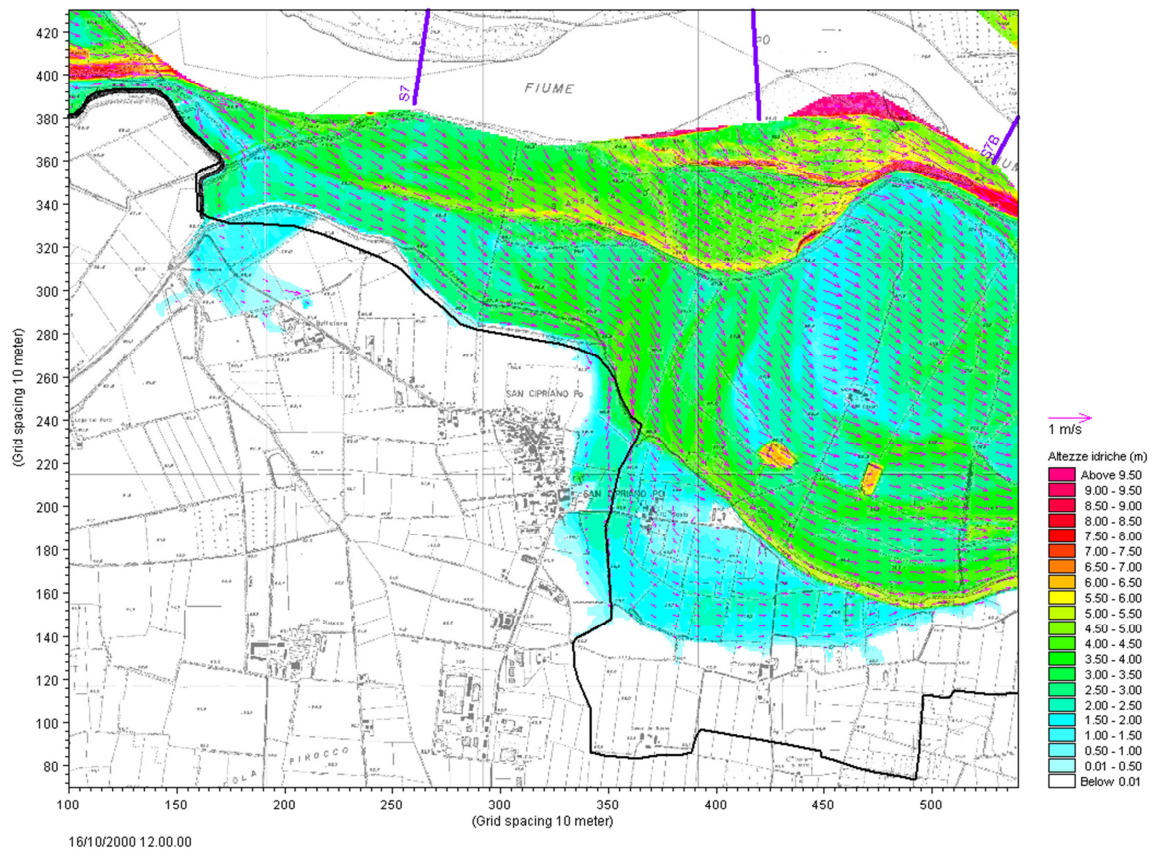
La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" si verifica che la situazione ottenuta sia di effettiva stazionarietà.

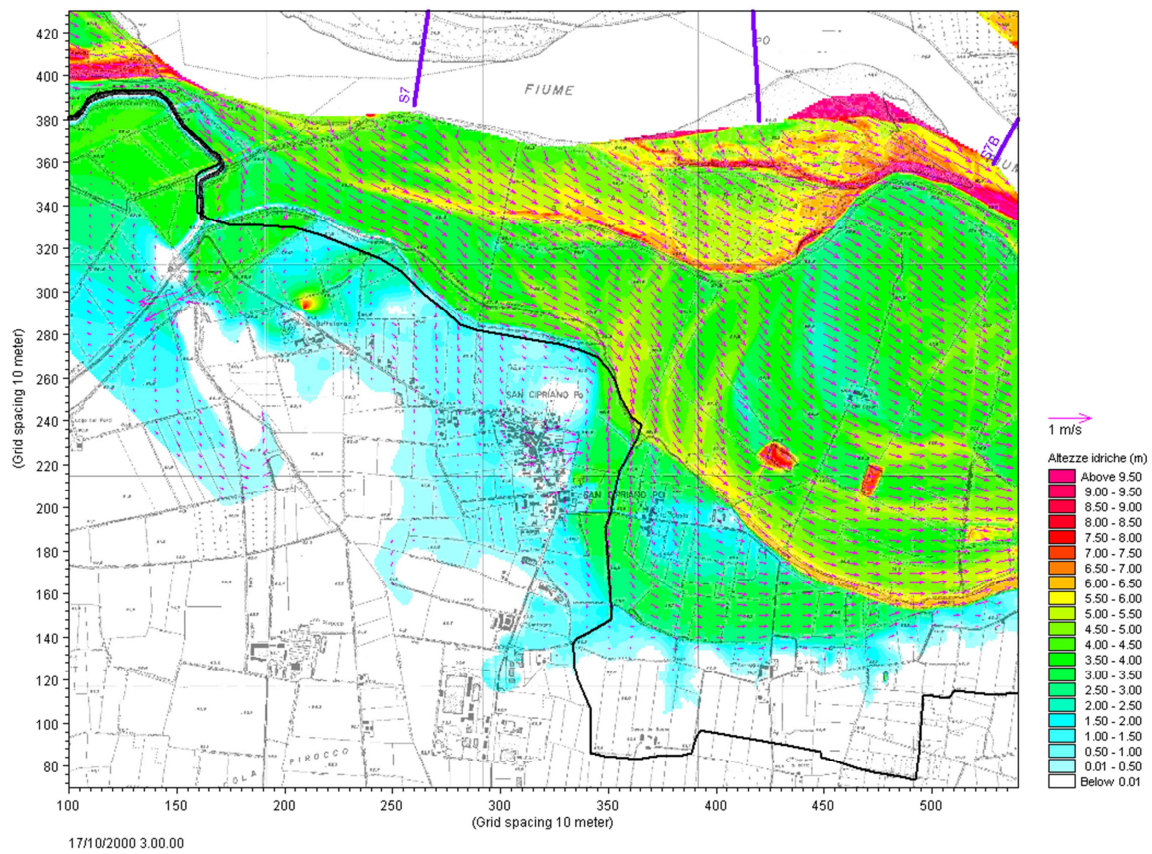
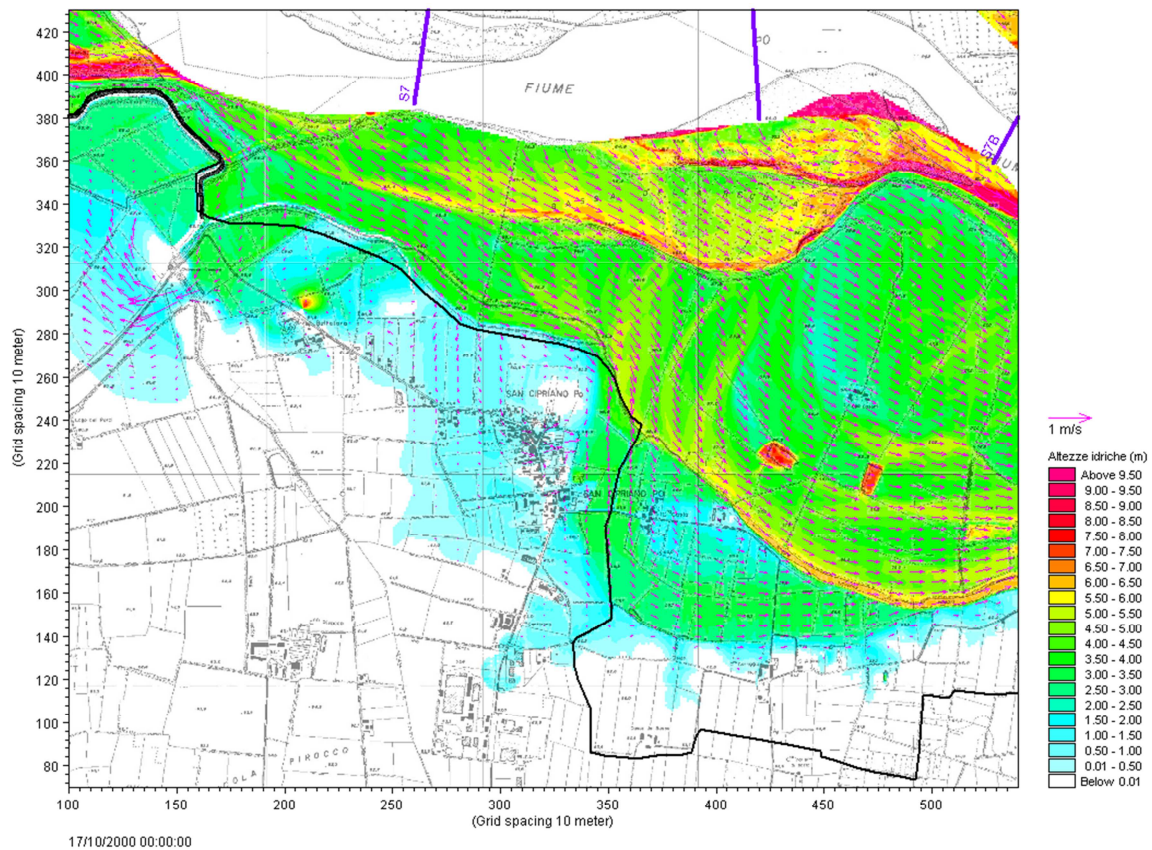
Le equazioni del modello sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).

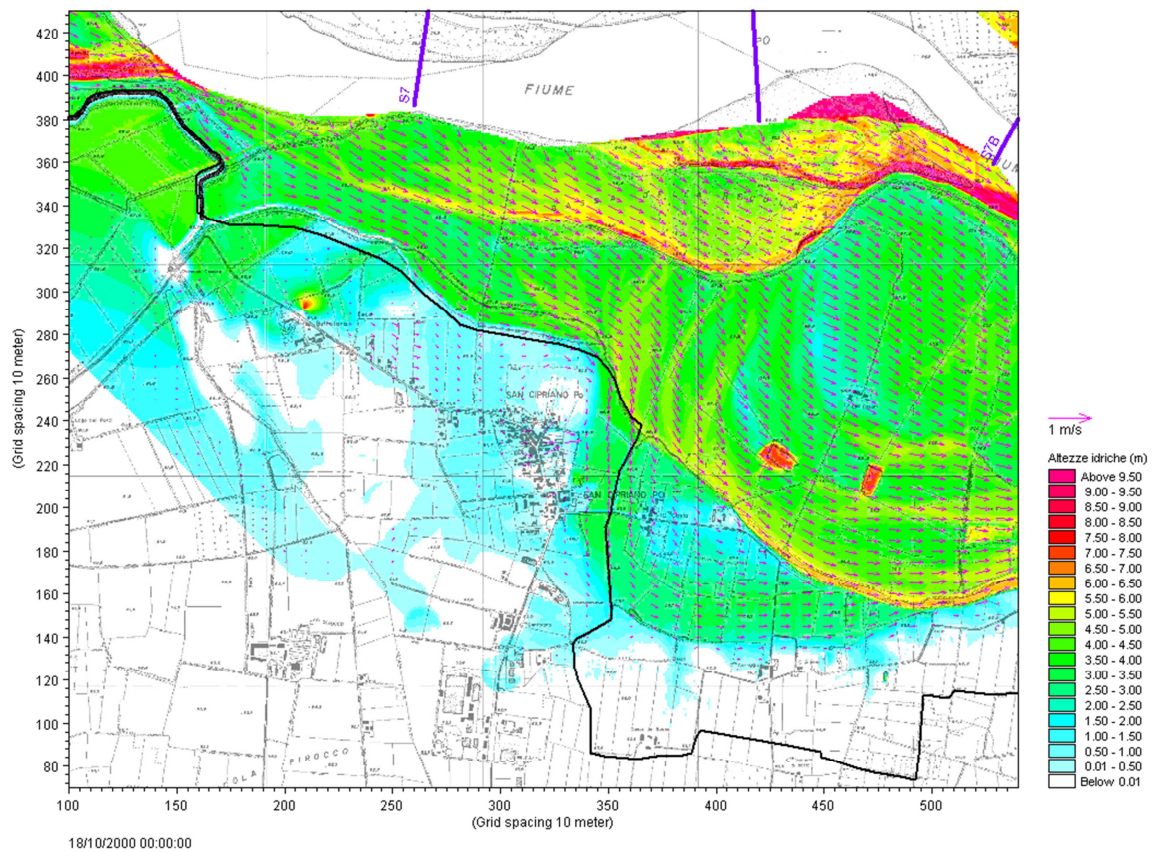
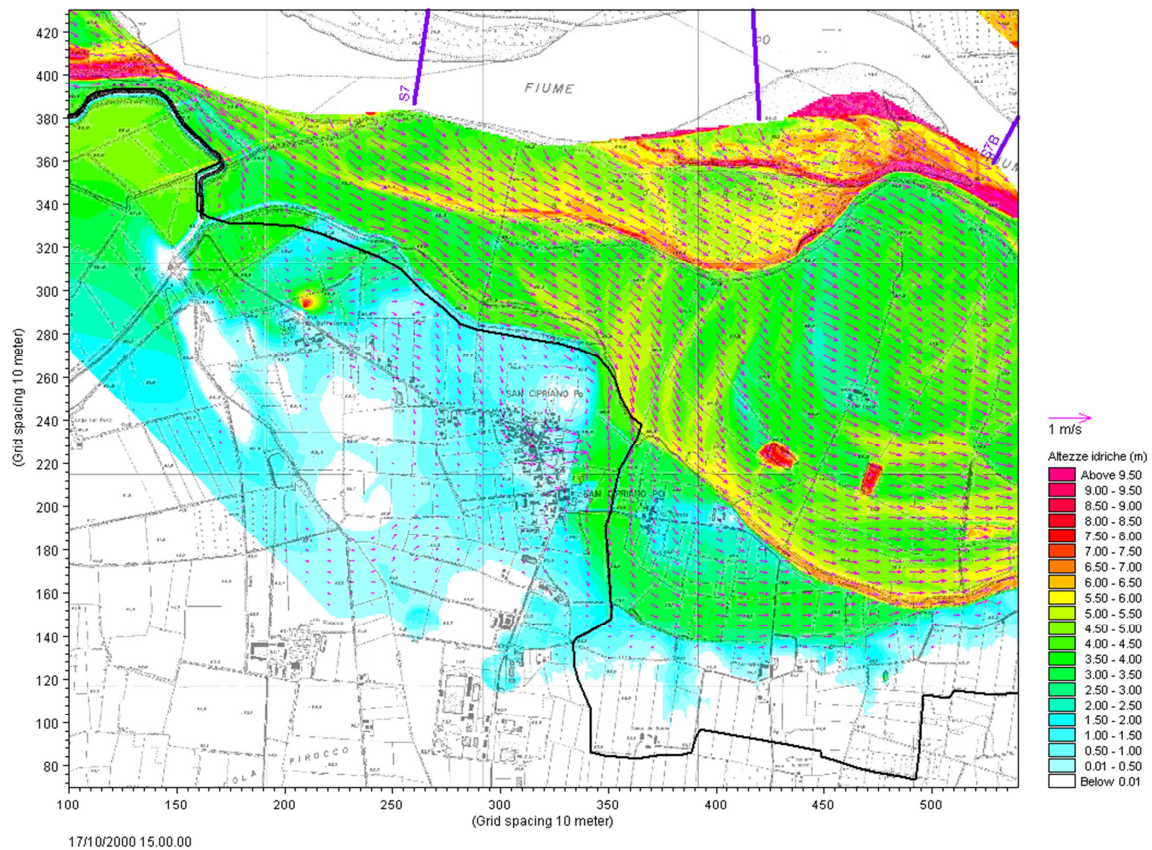
ALLEGATO 3 - SCENARIO 1 - Mappe delle aree di
esondazione a diversi istanti nel
corso dell'evento di piena dell'ottobre
2000

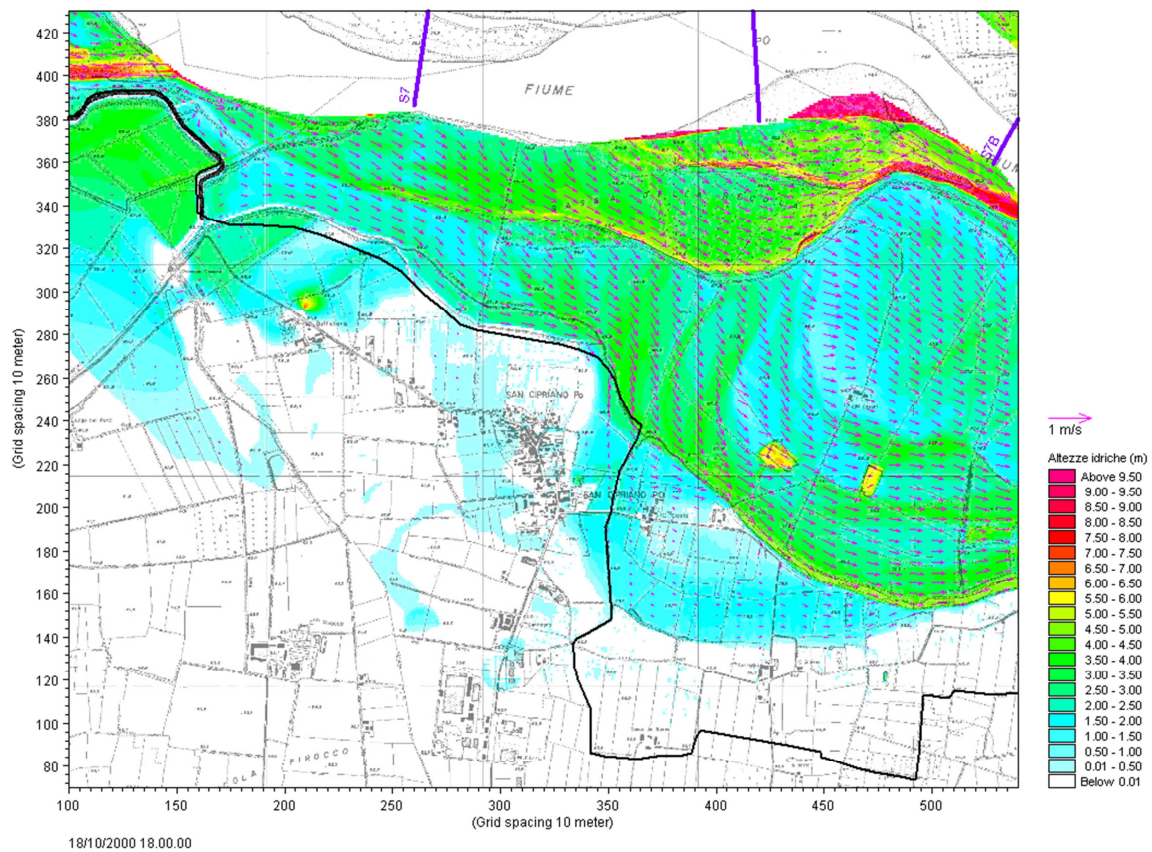
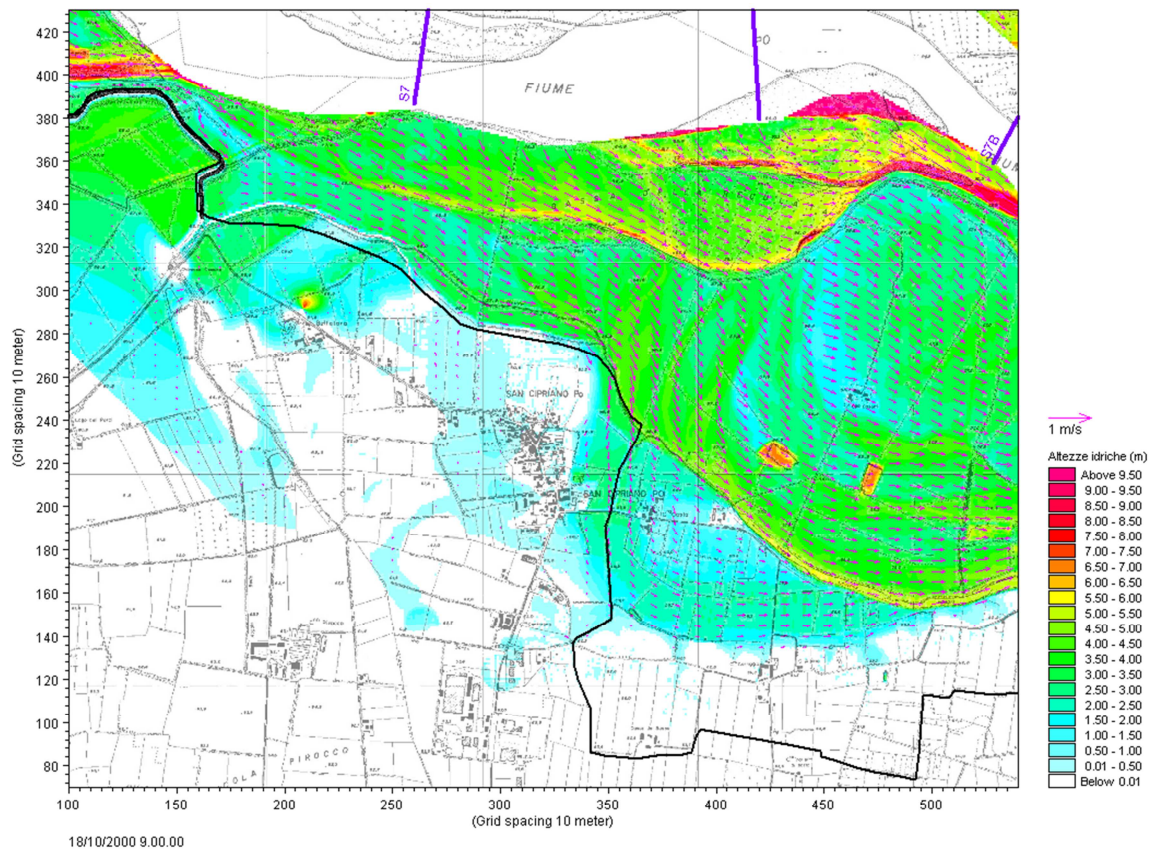












ALLEGATO 4 - Risultati delle simulazioni con tempo di
ritorno 200 anni negli scenari di progetto