



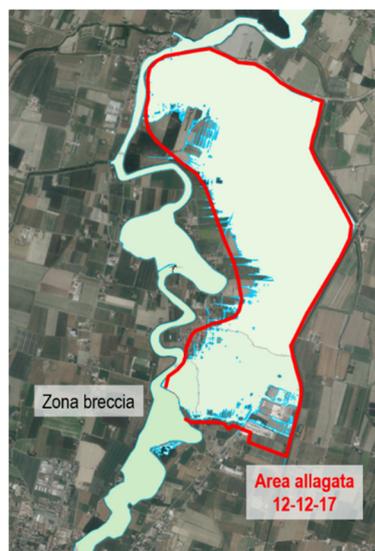
**UNIVERSITÀ
DI PARMA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
E ARCHITETTURA**



**Autorità di bacino distrettuale del
fiume Po**

***APPROFONDIMENTO TECNICO-SCIENTIFICO DELLE
CONDIZIONI DI SICUREZZA IDRAULICA DEI
TERRITORI DI PIANURA LUNGO L'ASTA DEL FIUME
PO E DEI SUOI PRINCIPALI AFFLUENTI.
ASTA DEL TORRENTE ENZA***



Responsabile scientifico UniPr: Prof. Paolo Mignosa, Ing. Renato Vacondio

Gruppo di lavoro:

UniPr: Ing. Susanna Dazzi, Prof.ssa. Francesca Aureli, Ing. Marco D'Oria

AdBPo: Ing. Andrea Colombo, Ing. Cinzia Merli, Ing. Piero Tabellini

Parma, maggio 2019

Sommario

1	Realizzazione e taratura preliminare di un modello 1D del torrente Enza dalla traversa di Guardasone alla confluenza in Po e simulazione dell'evento del 12 dicembre 2017	2
1.1	L'asta fluviale di interesse	2
1.2	Analisi preliminari alla traversa di Guardasone.....	11
1.3	Modello HEC-RAS fornito da AIPo.....	20
1.4	Modifiche apportate alla geometria del modello.....	21
1.4.1	Geometria delle sezioni	21
1.4.2	Storage Areas per descrivere le aree golenali	27
1.4.3	Geometria dei manufatti nella zona delle casse.....	28
1.4.4	Curve dei volumi delle casse.....	31
1.5	Affinamento nella taratura della scabrezza nel tratto a valle delle casse (piena del marzo 2018)	32
1.6	Ricostruzione dell'evento del dicembre 2017	37
1.6.1	Dati disponibili.....	37
1.6.2	Descrizione dell'apertura della breccia nel modello 1D	38
1.6.3	Funzionamento dei manufatti delle casse.....	39
1.6.4	Ricostruzione dell'idrogramma di portata a Guardasone	42
1.6.5	Verifica della scala delle portate di Sorbolo	48
1.6.6	Valutazione dell'incertezza nella ricostruzione.....	49
2	Realizzazione e taratura di un modello 2D del torrente Enza da valle casse di espansione alla confluenza in Po e simulazione dell'evento del 12 dicembre 2017	51
2.1	Premessa	51
2.2	Costruzione e calibrazione del modello 2D dell'asta del torrente Enza a valle delle casse di espansione.....	51
2.2.1	Batimetria.....	51
2.2.2	Scabrezza	53
2.3	Taratura (evento del dicembre 2017)	53
2.4	Verifica (evento del marzo 2018).....	58
3	Analisi dell'officiosità idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casse d'espansione	61
3.1	Metodologia utilizzata	61
3.2	Portata compatibile con franco prefissato.....	66
3.3	Franchi per prefissati valori di portata	69
3.4	Influenza del livello in Po sul tratto terminale dell'asta	74
3.5	Valutazione dell'incertezza.....	79
3.6	Considerazioni conclusive sui risultati	87
4	Valutazione degli scenari per onde di piena con tempo di ritorno assegnato	89

4.1	Acquisizione degli idrogrammi con assegnato tempo di ritorno	89
4.2	Modellazione 1D della propagazione degli idrogrammi sintetici lungo l'asta fluviale	89
4.2.1	Propagazione lungo l'asta fluviale nel tratto compreso tra la confluenza Termina-Masdone e le casce	92
4.2.2	Analisi del funzionamento delle casce.....	93
4.2.3	Propagazione lungo l'asta fluviale a valle delle casce (esondazioni impedito).	98
4.2.4	Propagazione lungo l'asta fluviale tra Guardasone e la confluenza Termina- Masdone con modello 1D	99
4.3	Modellazione 2D della propagazione delle onde di piena sintetiche lungo l'asta a valle delle casce (esondazioni consentite, senza rotte).....	101
4.4	Valutazione dell'incidenza del cambiamento climatico sulle analisi d'asta	115
5	<i>Idrogrammi derivati dalle copule</i>	118
5.1	Scelta delle configurazioni da simulare	118
5.2	Idrogrammi con tempo di ritorno pari a 50 anni.....	122
5.3	Idrogrammi con tempo di ritorno pari a 100 anni	125
5.4	Idrogrammi con tempo di ritorno pari a 200 anni	129
5.5	Massime quote idriche lungo l'asta.....	131
5.6	Considerazioni conclusive e stima del tempo di ritorno dell'evento del dicembre 2017	134
6	<i>Scenari di progetto.....</i>	136
6.1	Premessa	136
6.2	Riduzione della scabrezza	136
6.3	Abbassamento dei piani golenali.....	137
6.4	Arretramento delle arginature in corrispondenza di alcuni meandri	139
6.5	Commenti ai risultati e indicazioni su approfondimenti futuri.....	142
7	<i>Conclusioni.....</i>	144
8	<i>Ringraziamenti.....</i>	149
9	<i>Bibliografia.....</i>	150
	<i>APPENDICE A. MODELLO NUMERICO.....</i>	151
	<i>APPENDICE B. DESCRIZIONE DELL'ALGORITMO DI SCAVO DELL'ALVEO INCISO SULLA BASE DI SEZIONI NOTE.....</i>	152

Introduzione

Si riporta di seguito la relazione finale sulle attività svolte nell'ambito del piano operativo annuale di attuazione del protocollo d'intesa tra l'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po (AdBPo) e il Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università degli Studi di Parma (DIA) per "l'approfondimento tecnico-scientifico delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta del fiume po e dei suoi principali affluenti."

L'incarico prevedeva lo svolgimento delle seguenti attività:

1. Realizzazione e taratura preliminare di un modello 1D del torrente Enza dalla traversa di Guardasone alla confluenza in Po e simulazione dell'evento del 12 dicembre 2017. A questo scopo è stato acquisito, modificato e tarato il modello HEC-RAS 1D messo a disposizione dall'AdBPo. Le risultanze sono riportate nel Capitolo 1 della presente relazione tecnica. Nel medesimo Capitolo si rende conto di una serie di analisi, effettuate con un modello 2D, per definire la portata transitata a Guardasone in occasione dell'evento del 12 dicembre 2017;
2. Realizzazione e taratura di un modello 2D del torrente Enza da valle casse di espansione alla confluenza in Po e simulazione dell'evento del 12 dicembre 2017. È stato implementato e tarato un modello 2D ad altissima risoluzione spaziale (2 m), utilizzato poi per valutare l'officiosità idraulica del torrente (ad esondazioni impedito). Le risultanze sono riportate nel Capitolo 2 e nel Capitolo 3 della presente relazione tecnica;
3. Verifica di dettaglio del modello 1D e suo utilizzo per le analisi di asta. Il modello 1D di cui al punto 1 è stato utilizzato, unitamente agli idrogrammi sintetici forniti da ARPAE, per simulare la propagazione nel tratto Guardasone-ingresso casse di espansione, il funzionamento e l'efficienza delle casse di espansione stesse e la propagazione nel tratto di valle, fino alla confluenza in Po (Capitolo 4). Si è anche analizzata l'influenza della scelta dell'idrogramma di progetto sui risultati (Capitolo 5). Nel Capitolo 4 si è anche utilizzato il modello 2D di cui al punto 1 (ad esondazioni impedito) per valutare i franchi arginali e i tratti più soggetti a sormonto. Sono poi stati analizzati alcuni scenari di progetto (riduzione di scabrezza, abbassamento dei piani golenali, arretramento di argini in frodo) e verificati i miglioramenti ottenibili rispetto all'assetto attuale (Capitolo 6).

Le conclusioni e alcuni approfondimenti suggeriti sono riportati nel Capitolo 7.

1 Realizzazione e taratura preliminare di un modello 1D del torrente Enza dalla traversa di Guardasone alla confluenza in Po e simulazione dell'evento del 12 dicembre 2017

1.1 L'asta fluviale di interesse

Oggetto di studio è l'asta del torrente Enza che si estende per oltre 50 km a partire dalla traversa di Guardasone fino alla confluenza in Po. In questo tratto il torrente lambisce gli abitati di San Polo d'Enza, Montecchio Emilia, Sant'Ilario d'Enza, Sorbolo, Lentigione e Coenzo. Chiuso alla sezione di Sorbolo il bacino dell'Enza copre una superficie di circa 650 km² di cui poco più di 100 km² sono relativi alle aree contribuenti dei torrenti Termina e Masdone che si immettono in sinistra idraulica poco a monte di Montecchio (Figura 1-1).

In località Guardasone è presente un'opera trasversale dovuta alla presenza del canale della Spelta che attraversa in sub-alveo il torrente Enza mediante un manufatto a sifone. In considerazione della notevole importanza del manufatto per l'approvvigionamento irriguo di una vasta area caratterizzata da produzioni agricole di rilevante qualità, il manufatto in anni recenti ha subito un intervento di consolidamento, volto a garantirne la funzionalità futura, la stabilità nei confronti degli eventi di piena, la durabilità nei confronti dei fenomeni erosivi. Tale intervento di consolidamento è stato attuato in modo rispettoso delle esigenze paesaggistiche e naturali, ripristinando la possibilità di risalita dei pesci. L'entità dell'evento del 12 dicembre 2017 è stata tuttavia tale da causare importanti fenomeni di erosione in vicinanza dell'opera sia nella parte centrale, con rimozione di una cospicua porzione di un'isola densamente vegetata che si estende per un centinaio di metri in centro alveo ortogonalmente al manufatto immediatamente a monte del salto (Figura 1-2), sia in sponda sinistra ove la corrente, erodendo la sponda ed aggirando la struttura in calcestruzzo ove è ubicata la stazione idrometrica, ha portato alla luce il cielo del sifone e dato luogo alla formazione di un percorso secondario (Figura 1-2 e Figura 1-3).

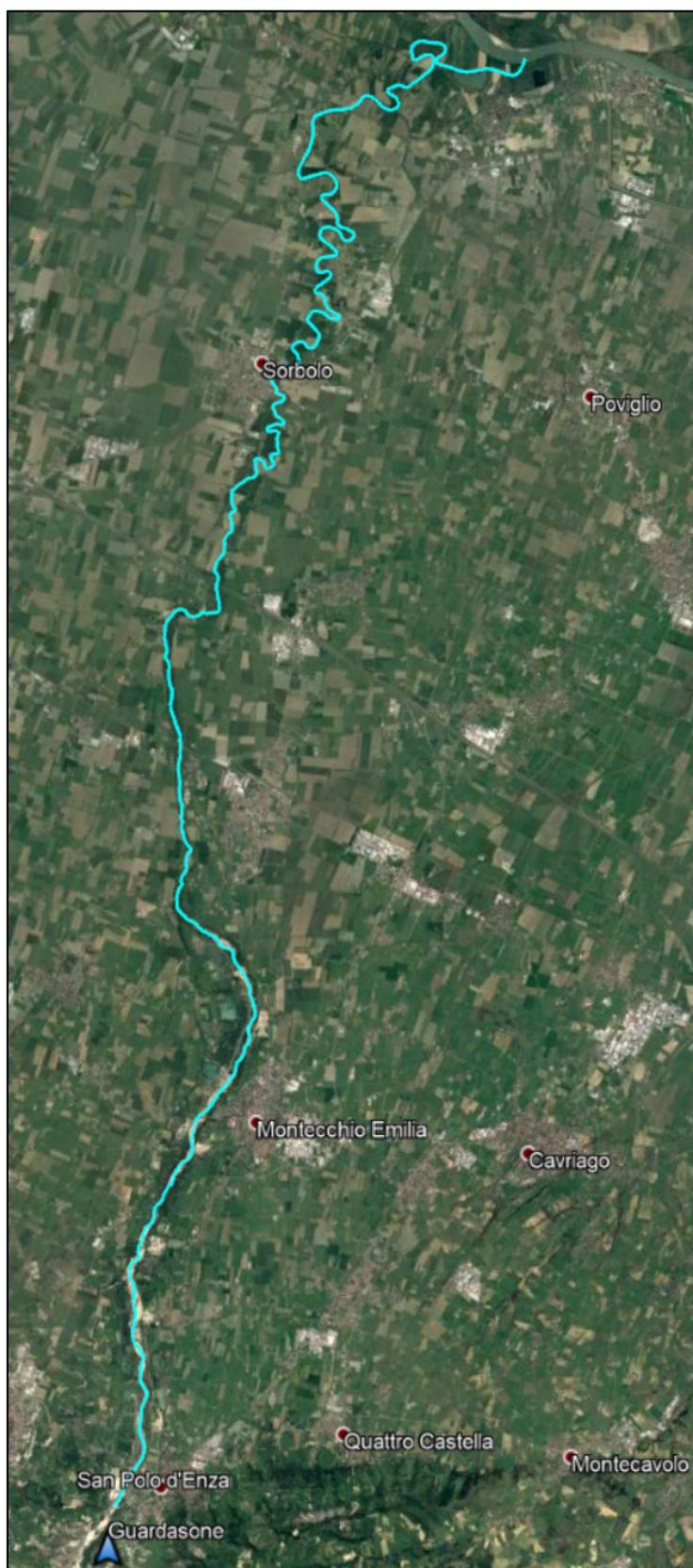


Figura 1-1. Area oggetto di studio.

Realizzazione e taratura preliminare di un modello 1D del torrente Enza dalla traversa di Guardasone alla confluenza in Po e simulazione dell'evento del 12 dicembre 2017



Figura 1-2. Area soggetta ad erosione durante l'evento del 12 dicembre 2017: condizioni dell'opera nel luglio 2017 (prima della piena, in alto) e 2018 (dopo la piena, in basso).



Figura 1-3. Area soggetta ad erosione durante l'evento del 12 dicembre 2017: aggiramento in sinistra della stazione idrometrica e scopertura del sifone.

Lungo il tratto oggetto di studio sono presenti numerosi manufatti trasversali interferenti con il corso d'acqua (da Figura 1-4 a Figura 1-13). In località Montecchio Emilia, è presente un sistema di casse di espansione costituito da due invasi fuori linea posti in serie, il cui imbocco avviene grazie a due sistemi partitori gemelli configurati ad Y (Figura 1-6). Di tale sistema si dirà meglio in seguito.



Figura 1-4. Ponte presso San Polo.



Figura 1-5. Ponte presso Montecchio.

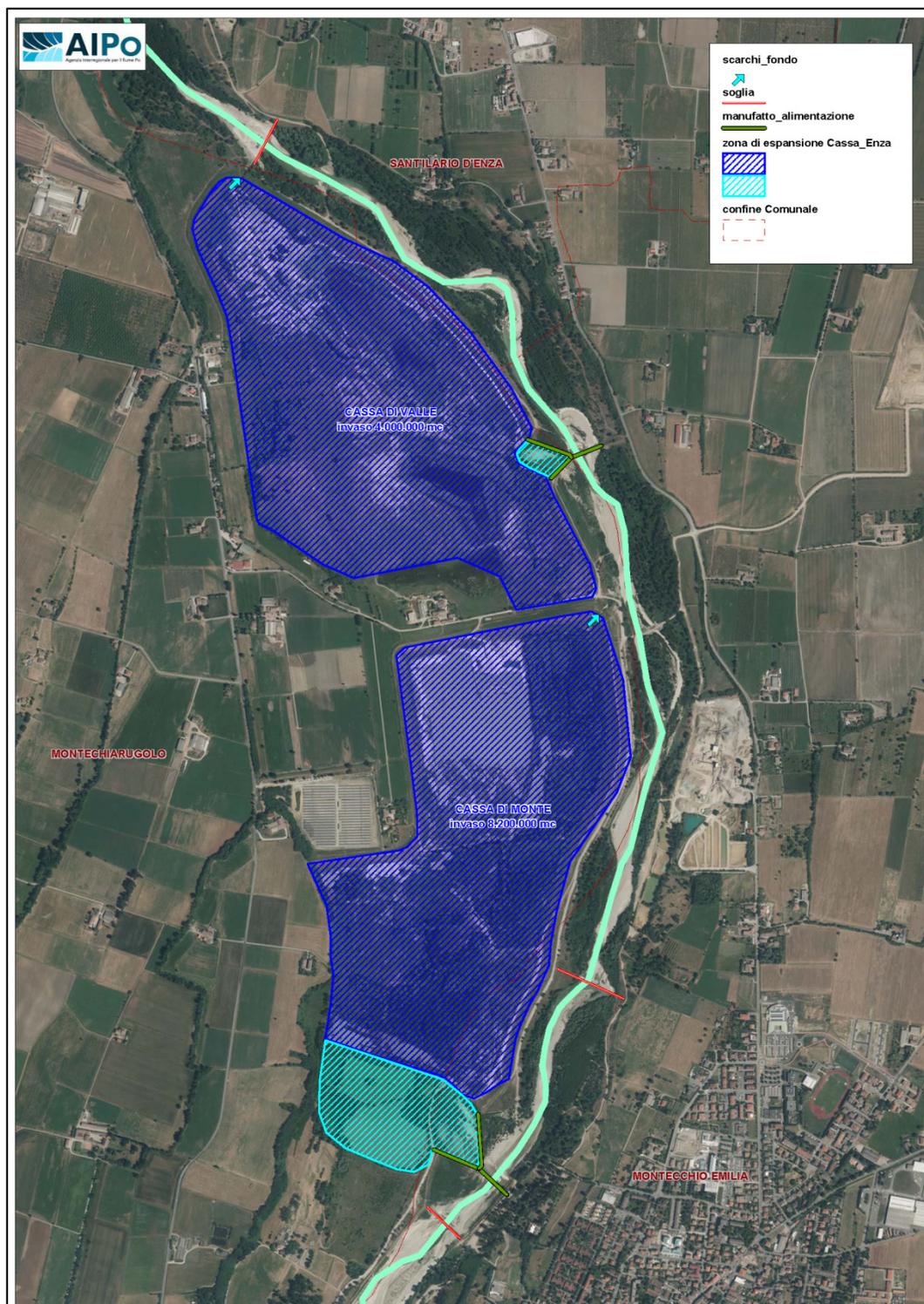


Figura 1-6. Sistema di casse di espansione del torrente Enza in località Montecchio Emilia.



Figura 1-7. Ponte sul torrente Enza a Sant'Ilario.



Figura 1-8. Ponte della linea ferroviaria MI-BO in località Sant'Ilario.



Figura 1-9. Traversa a valle del ponte della ferrovia in località Sant'Ilario.



Figura 1-10. Ponte dell'Autostrada A1 in località Casalbaroncolo.



Figura 1-11. Ponte della linea ad alta velocità in località Casalbaroncolo.



Figura 1-12. Ponte di Sorbolo.



Figura 1-13. Ponte della strada provinciale a Coenzo.

1.2 Analisi preliminari alla traversa di Guardasone

Tra gli obiettivi preliminari dello studio vi era quello dell'individuazione di una scala delle portate alla traversa di Guardasone al fine di pervenire direttamente alla conoscenza dell'onda in ingresso all'asta fluviale, mediante la conversione dei livelli ivi registrati alla stazione idrometrica in occasione dell'evento del 12 dicembre 2017 (Figura 1-14). Preceduto da un evento che, sebbene avesse fatto registrare solo superamenti della soglia 1 lungo tutto il corso d'acqua, aveva mantenuto un deflusso iniziale sostenuto nelle sezioni vallive, ed un notevole livello di saturazione dei suoli [1], l'evento in esame si è sviluppato presentando un repentino incremento dei livelli da 0.12 m a 0.85 m tra le ore 21 del 10 dicembre e le ore 4 dell'11, raggiungendo il valore massimo di 1.21 m alle ore 2 del 12 dicembre ed iniziando quindi a decrescere pressoché linearmente nel tempo fino al valore di 0.23 m alle ore 20 del 12 dicembre per tornare ai livelli pre-evento circa alle 12 del 13 dicembre.

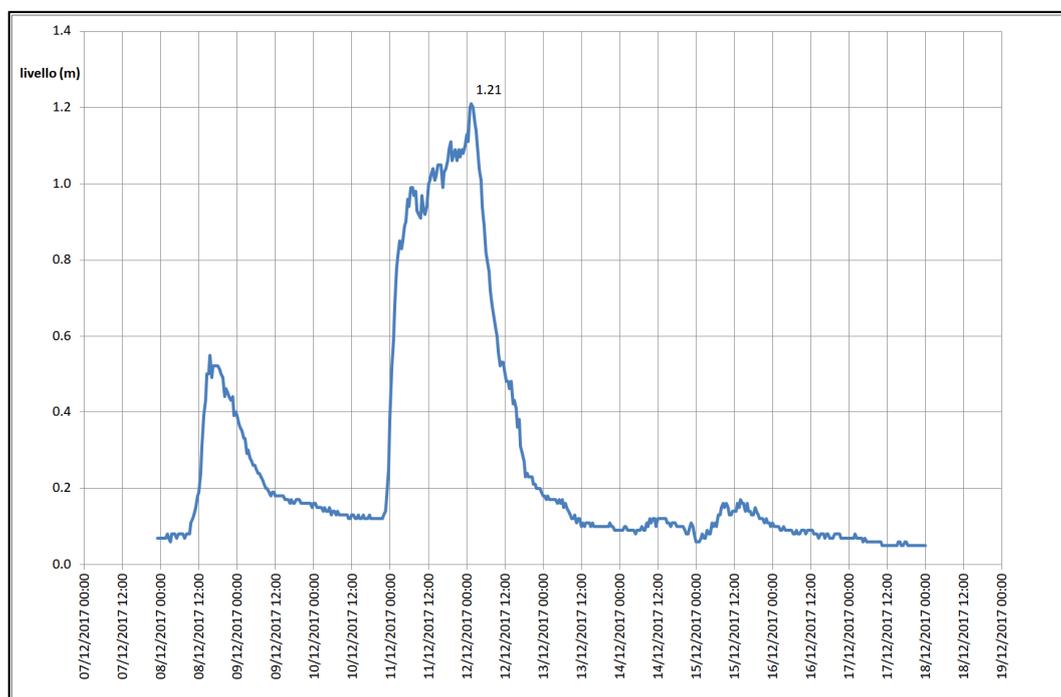


Figura 1-14. Livelli registrati alla stazione idrometrica di Guardasone.

Come è possibile osservare dalla Figura 1-14, l'escursione di livello dell'intero idrogramma è di poco superiore ad un metro. Ciò è essenzialmente dovuto all'ampiezza della sezione del corso d'acqua in corrispondenza della botte a sifone di Guardasone che si estende infatti per oltre 160 m. Tale estensione non comprende, tra l'altro, il canale apertosi per erosione alla sinistra dell'idrometro in corso d'evento. La presenza di tale ulteriore alveo, di ampiezza pari a circa 40 m, ha senz'altro favorito in maniera non trascurabile il transito delle portate di piena, contribuendo al contenimento dell'escursione dei livelli idrometrici.

Al fine di determinare la scala delle portate della sezione di interesse si è proceduto ad allestire un modello bidimensionale (cfr. APPENDICE A) di estremo dettaglio (1 m × 1 m) di un breve tratto di torrente, a monte e a valle dell'attraversamento della botte a sifone che dovrebbe costituire, almeno per le portate medio basse, una sconnessione idraulica. Sulla base del modello del terreno disponibile (LiDAR 2014) si è quindi proceduto ad allestire le simulazioni idrauliche, inizialmente condotte per due differenti valori del coefficiente di scabrezza k_s di Strickler pari a 20 e 30 $m^{1/3}s^{-1}$.

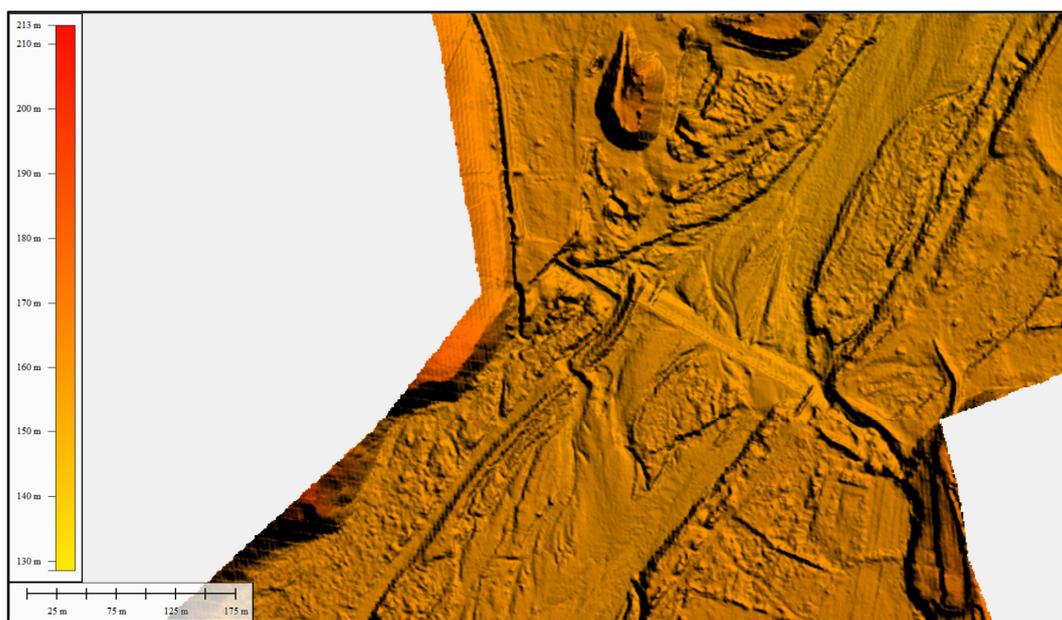


Figura 1-15. Particolare della batimetria utilizzata nelle simulazioni 2D volte ad individuare la scala delle portate a Guardasone (LiDAR 2014).

Le prime simulazioni effettuate, al variare della portata in ingresso tra 5 e 1000 m^3/s , hanno evidenziato come solo per il valore del coefficiente di scabrezza k_s di Strickler pari a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ fosse possibile individuare una scala di deflusso poco influenzata dalla precisa collocazione planimetrica del punto di estrazione dei livelli, che dovrebbe coincidere con la posizione dell'idrometro di Guardasone. Al crescere del coefficiente di scabrezza k_s di Strickler (ovvero della liscezza dell'alveo) al valore $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ l'andamento della scala delle portate, in corrispondenza di punti distanti tra loro anche di un solo metro (corrispondente alla risoluzione del DTM), ha infatti mostrato una notevole variabilità dovuta sia al non uniforme livello idrico assunto dalla corrente sulla traversa, sia al fatto che a monte del salto, perlomeno per valori di portata transitante elevati, si manifestano ampie zone del campo di moto caratterizzate da numeri di Froude maggiori di 1, rappresentativi di una corrente in arrivo idraulicamente veloce. Ciò comporta che i livelli idrici siano funzione della scabrezza, mentre se si fosse verificato il passaggio attraverso lo stato critico in corrispondenza della traversa, la portata sarebbe stata sostanzialmente indipendente dalla scabrezza attribuita al tratto di alveo a monte ed anche dalla sua geometria, e sarebbe dipesa solo

dalla geometria della sezione della traversa, che in prima analisi si era ritenuta piuttosto stabile. A fronte di questi aspetti, negativi per una sezione di misura, si è verificato che, per tutti i valori di portata, la traversa costituisce effettivamente un salto di altezza sufficiente a garantire l'indipendenza della portata dai livelli di valle. Inoltre i termini che inducono la formazione del cosiddetto "cappio di piena" (variazione della profondità idrica nello spazio e termini inerzia locale e convettiva) sono assolutamente trascurabili, per cui la scala delle portate risulta sostanzialmente univoca.

L'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate per k_s pari a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ sulla batimetria dedotta dal LiDAR 2014 ha mostrato come in corrispondenza del valore di colmo dell'idrogramma di livello osservato (1.21 m alle ore 2 del 12 dicembre) la conversione in portata mediante la scala di deflusso ottenuta dalle simulazioni idrauliche fosse tale da fornire un valore massimo di portata di poco superiore a $600 \text{ m}^3/\text{s}$, sicuramente troppo basso per giustificare gli effetti manifestatisi a valle. Il confronto tra le immagini aeree anteriori e successive all'evento del dicembre 2017 e l'esecuzione di un sopralluogo hanno però mostrato come, verosimilmente nel corso dell'evento stesso, importanti fenomeni di erosione avessero dato luogo ad una non trascurabile modificazione della batimetria a monte della traversa (Figura 1-2 e Figura 1-3). Alla luce di queste considerazioni si è pertanto proceduto a modificare il modello del terreno, cercando di ricostruire (purtroppo in maniera approssimata, per l'indisponibilità di rilievi post evento) una geometria del fondo che tenesse conto dell'erosione esercitata dalla corrente di piena nei confronti dell'isola vegetata in centro alveo ed in corrispondenza della botte a sifone per aggiramento in sinistra idraulica della stazione idrometrica. La geometria così individuata (Figura 1-16) è stata utilizzata per un nuovo set di simulazioni idrauliche.

La modifica della geometria dell'alveo, nella direzione di un assetto più congruente con le caratteristiche geometriche del terreno post evento, dà luogo ad una variazione sensibile della scala delle portate alla traversa che, nelle condizioni di geometria modificata, conduce, sempre assumendo un coefficiente

di scabrezza di Strickler pari a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, ad un valore di colmo dell'idrogramma di portata dell'evento di dicembre 2017 pari a circa $750 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 1-17).

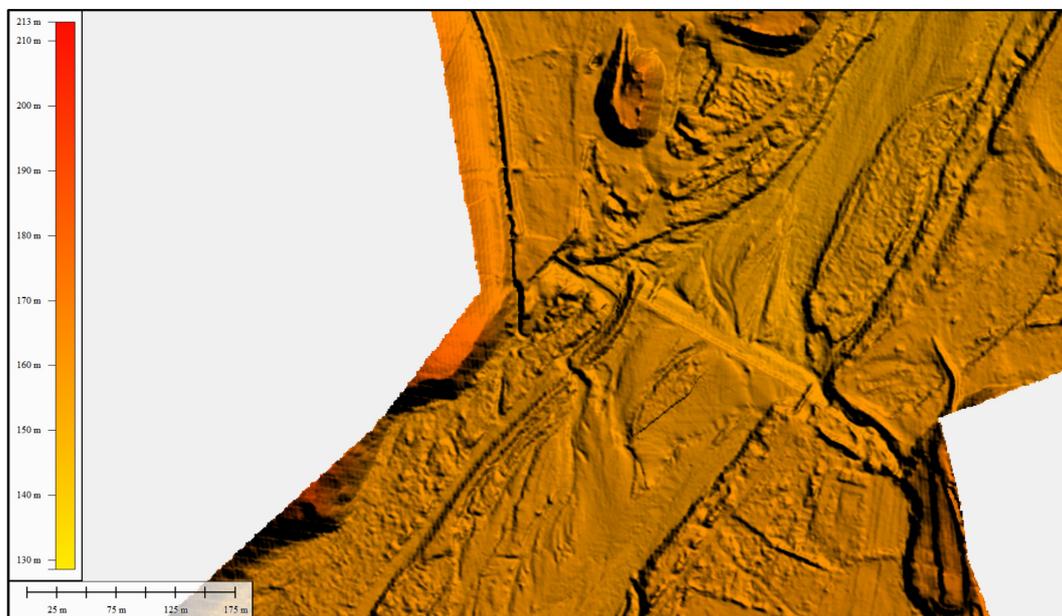


Figura 1-16. Particolare della batimetria utilizzata nelle simulazioni 2D volte ad individuare la scala delle portate a Guardasone (LiDAR 2014 modificato).

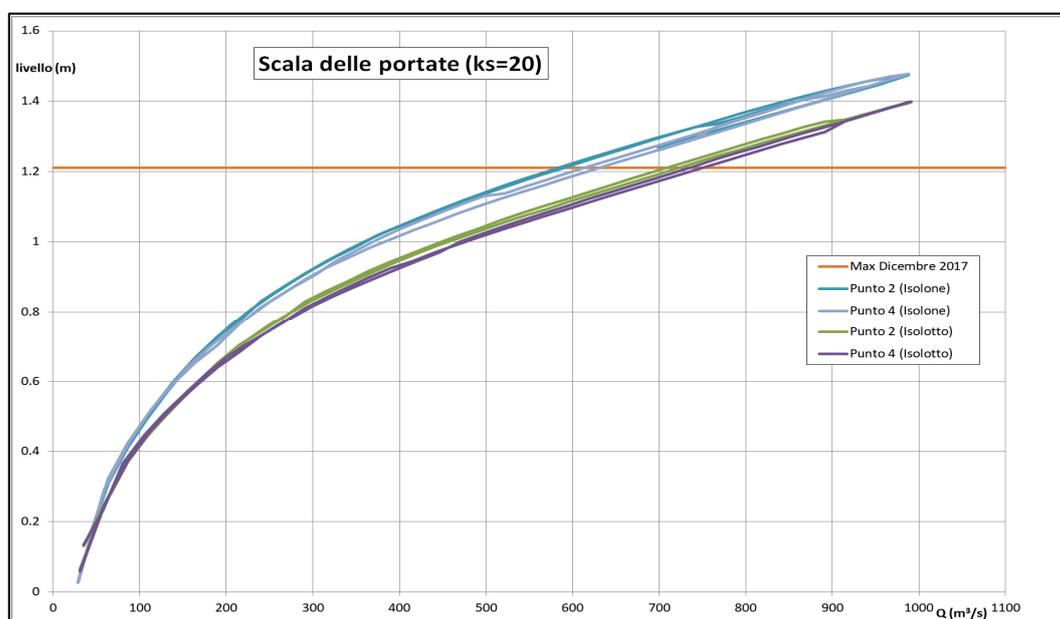


Figura 1-17. Scala delle portate alla traversa di Guardasone per (LiDAR 2014 - Isolone e LiDAR 2014 modificato - Isolotto).

Tale valore viene senz'altro ritenuto più realistico di quello ricavato sulla base della geometria non modificata (circa $600 \text{ m}^3/\text{s}$), ma ancora insufficiente alla luce degli effetti osservati a valle.

Tuttavia, anche in questo caso le simulazioni effettuate hanno messo in luce come a monte del salto, per valori di portata transitante e liscezza elevati, siano presenti ampie zone del campo di moto caratterizzate da numeri di Froude maggiori di 1 e pertanto condizioni di corrente già veloce (Figura 1-18).

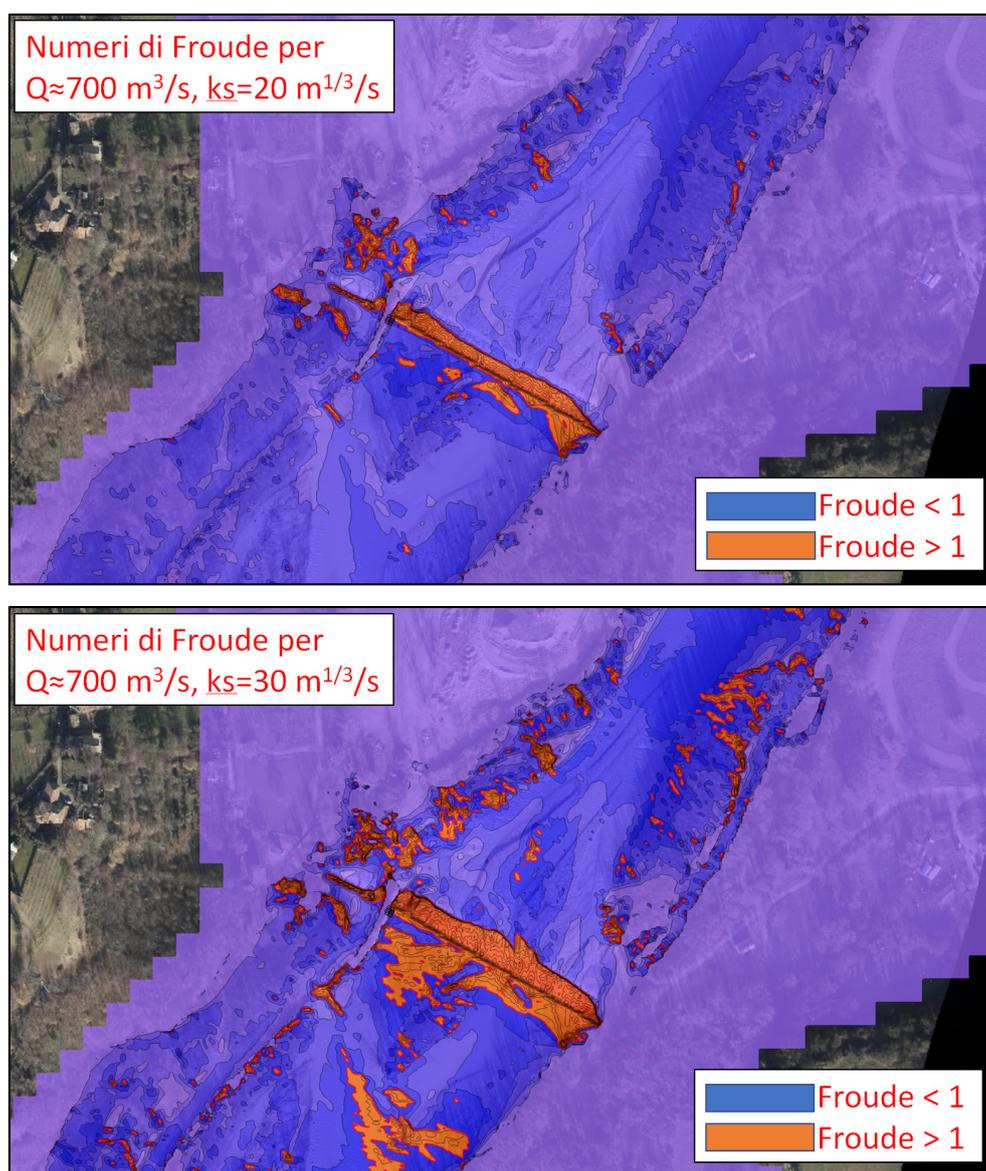


Figura 1-18. Numeri di Froude in corrispondenza della traversa di Guardasone (LiDAR 2014 modificato), per portata transitante di $700 \text{ m}^3/\text{s}$ e per scabrezza pari a 20 (in alto) o $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (in basso).

Assunta quindi a riferimento la geometria LiDAR 2014 modificata (per riprodurre seppure in maniera approssimata le condizioni della batimetria a seguito di erosione) ed estratte le relazioni esistenti tra livelli e portate transitanti per valori

di scabrezza k_s di Strickler pari a 20 e 30 $m^{1/3}/s$ si è ancora una volta osservata una importante dipendenza della scala delle portate dalla posizione del punto di estrazione dei livelli, come mostrato in Figura 1-19. Come è possibile osservare, infatti, il valore massimo di portata, convertito a partire dal livello massimo dell'idrogramma registrato nell'evento del dicembre 2017, presenta una variabilità nell'intervallo 850 - 1000 m^3/s al variare della posizione spaziale prescelta per l'estrazione dei risultati in un ristretto intorno del punto ove si presume sia ubicato l'idrometro.

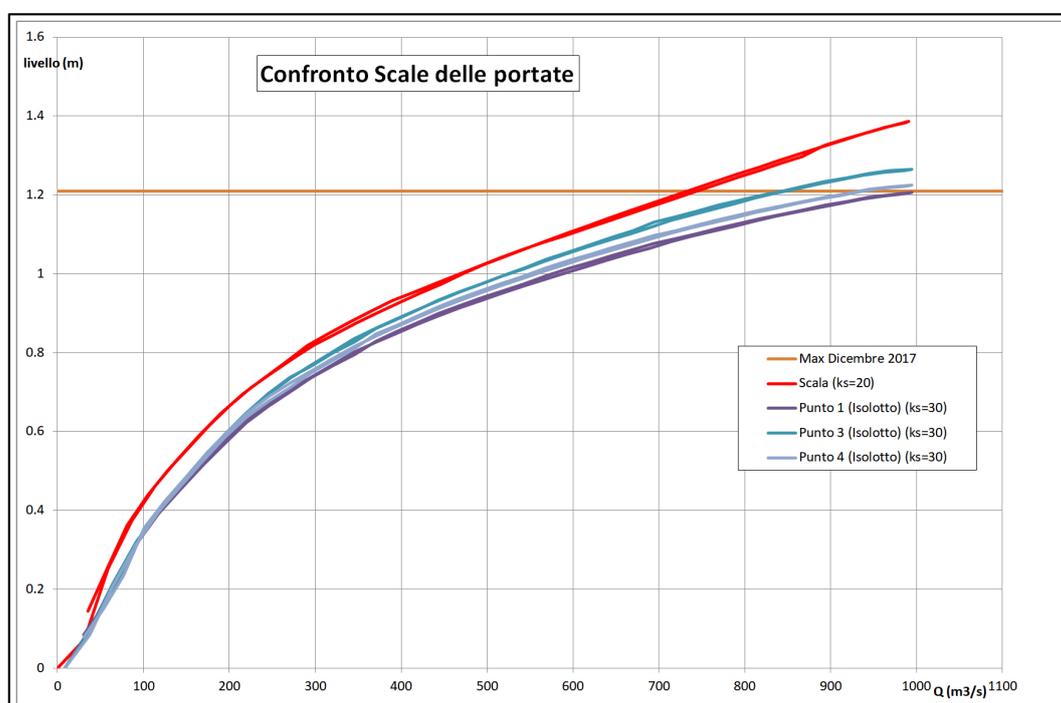


Figura 1-19. Scala delle portate alla traversa di Guardasone per (LiDAR 2014 - Isolone e LiDAR 2014 modificato - Isolotto).

Questo comportamento è causato, come si è già accennato, dalla notevole irregolarità del profilo idrico trasversale alla sezione, a sua volta fortemente dipendente dall'assetto dell'alveo a monte della traversa, che induce la corrente a concentrarsi in alcune zone. La Figura 1-20 mostra, per la portata di circa 700 m^3/s e per il coefficiente di Strickler di 30 $m^{1/3}/s$, il profilo idrico sulla sezione della traversa ottenuto dal modello 2D con la batimetria modificata. Come si nota il pelo libero è tutt'altro che orizzontale e le profondità idriche variano da

0.70 m a 1.40 m circa a seconda del punto considerato. Anche limitandosi ai punti in prossimità dell'idrometro la variabilità è notevole.

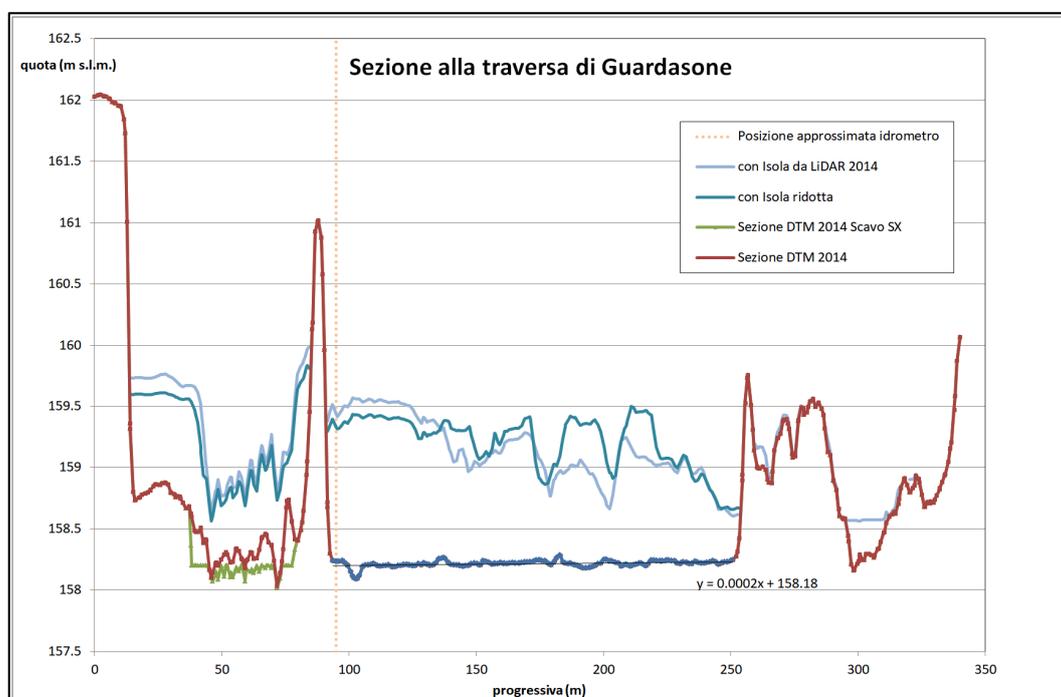


Figura 1-20. Profilo idrico sulla traversa di Guardasone ottenuto con il modello 2D, con batimetria originaria e modificata per $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$ e $k_s = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Valutata comunque come più attendibile posizione dello strumento di misura quella relativa al punto denominato 1 ed estratte dalle simulazioni numeriche in corrispondenza di tale punto le relazioni portata transitante – livello, anche per un valore intermedio dell'indice di scabrezza di Strickler pari a $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, è stato possibile ricavare per la sezione di Guardasone il set di scale di deflusso riportate in Figura 1-21 che presentano un valore di portata in corrispondenza del livello di 1.21 m, massimo valore registrato durante l'evento del 12 dicembre 2017, variabile tra 730 e $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

La conversione dei livelli registrati a Guardasone a partire dalle tre scale delle portate di Figura 1-21 conduce agli idrogrammi di portata mostrati in Figura 1-22. Come già anticipato, il valore di colmo degli idrogrammi al diminuire della scabrezza varia approssimativamente tra 730 e $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

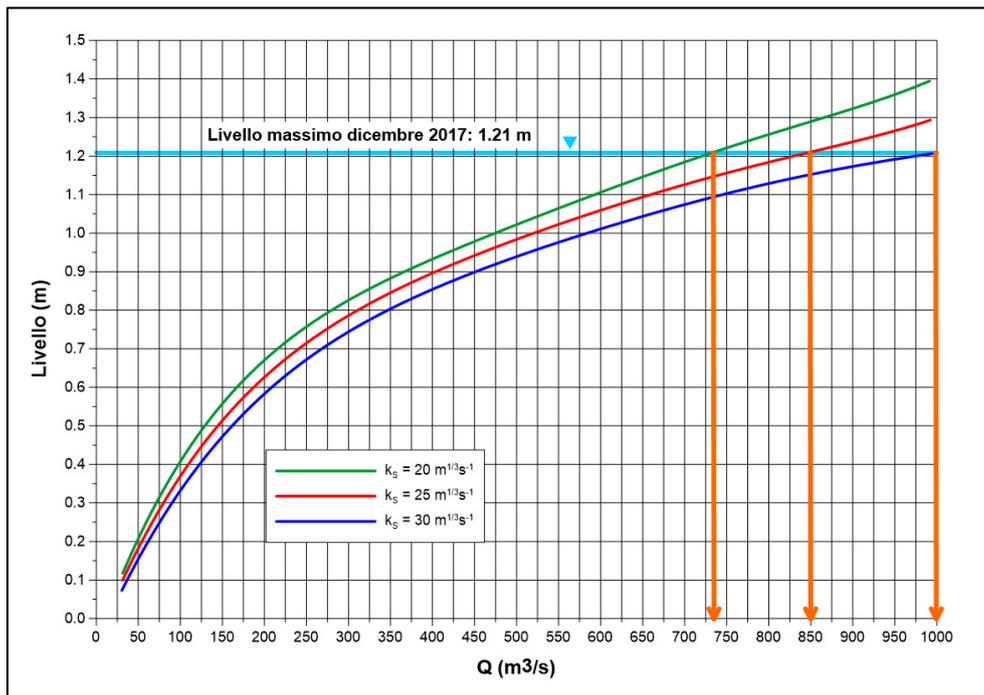


Figura 1-21. Scale delle portate alla traversa di Guardasone ottenute dai livelli estratti in corrispondenza dell'idrometro al variare della scabrezza dell'alveo.

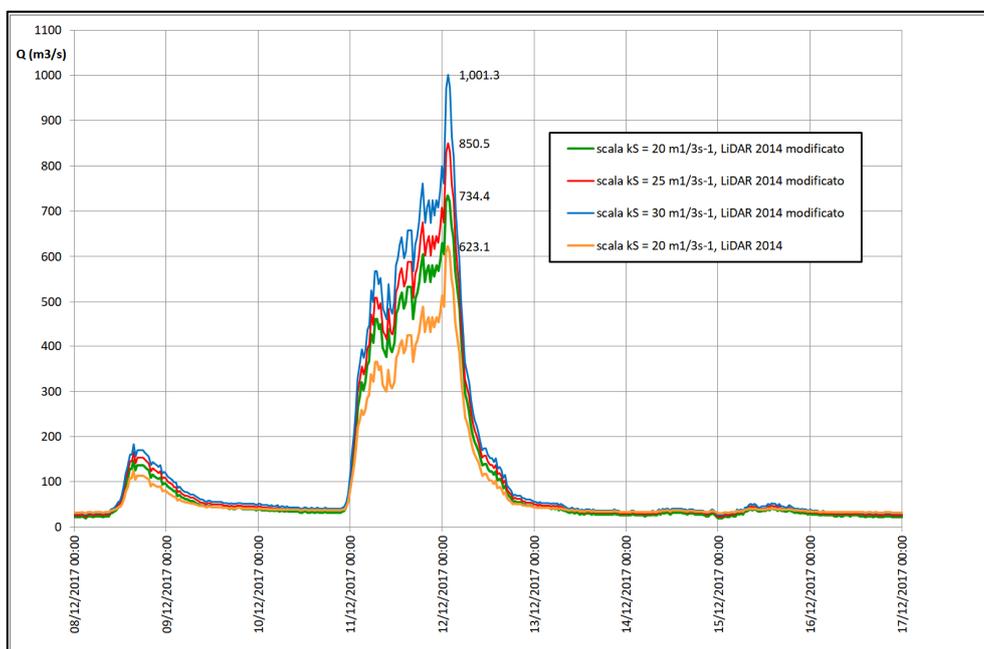


Figura 1-22. Idrogrammi di portata alla traversa di Guardasone convertiti mediante le scale delle portate ottenute dalle simulazioni numeriche al variare della scabrezza. Dalle analisi effettuate è possibile giungere alle seguenti conclusioni. L'elevata incertezza nella stima dell'onda di portata a Guardasone è da ricondursi alla non conoscenza dell'effettivo valore di scabrezza rappresentativo del tratto

modellato ed alla dipendenza del campo di moto, e quindi dei livelli sulla traversa, dalla geometria dell'alveo nel tratto immediatamente a monte della traversa stessa. Per valori di scabrezza superiori a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ la corrente si presenta infatti già veloce sulla traversa e risulta quindi influenzata dalle condizioni di monte. Inoltre la notevole larghezza della sezione comporta escursioni di livello molto modeste, riducendo la sensibilità e aumentando l'incertezza della misura. Infine, a causa degli importanti processi erosivi manifestatisi in corso d'evento, molto verosimilmente la scala delle portate nella sezione di interesse ha subito variazioni durante il transito della piena rendendo assai ardua l'individuazione affidabile di un idrogramma da adottarsi in ingresso al modello 1D per i successivi affinamenti nella ricostruzione dell'evento del dicembre 2017.

Per queste ragioni si è ritenuta la ricostruzione assai poco attendibile e si è cercato di ricostruire la portata transitata a Guardasone, ed anche in altre sezioni durante l'evento del 12 dicembre 2017, attraverso approcci alternativi che saranno esposti nel prosieguo (modelli inversi).

1.3 Modello HEC-RAS fornito da AIPo

Base di partenza per l'analisi idraulica monodimensionale è il modello HEC-RAS [3] dell'asta del fiume Enza tra Vetto e la confluenza in Po (circa 70 km), realizzato dall'ing. Paolo Polo di Hydro Nova Srl e fornito agli scriventi da AIPo. L'asta è descritta tramite 425 *cross-sections*, 12 *inline structures* (di cui 10 traverse e 2 manufatti regolatori delle casse d'espansione) e 7 ponti. Sono inoltre presenti 10 *storage areas* (con le relative *lateral structures* per la connessione all'asta principale), di cui 2 rappresentano le casse d'espansione e 8 rappresentano aree golenali. A valle, l'asta del torrente Enza si innesta tramite una *junction* sull'asta del fiume Po, descritto con poche sezioni trasversali comprese tra la confluenza del torrente Parma e la sezione di Boretto.

1.4 Modifiche apportate alla geometria del modello

Nell'ambito del presente studio, si è considerato solo il tratto di asta fluviale compreso tra la traversa di Guardasone e la confluenza in Po. La prima operazione effettuata è stata quindi la rimozione di tutte le sezioni trasversali comprese tra Vetto e Guardasone. Il nuovo modello comprende quindi 309 *cross-sections*, 9 *inline structures* (di cui 7 traverse e 2 manufatti regolatori delle casse d'espansione) e 7 ponti. Sono inoltre presenti 4 *storage areas* (con le relative *lateral structures* per la connessione all'asta principale), di cui 2 rappresentano le casse d'espansione e 2 rappresentano aree golenali (si veda il paragrafo 1.4.2).

1.4.1 Geometria delle sezioni

Nel modello originario la geometria delle sezioni trasversali era stata estratta da due diversi rilievi, in particolare dal DTM del MATTM (2008) e, per le zone non coperte (in particolare per tutto il tratto a sud dell'attraversamento della Via Emilia), da un DTM fatto realizzare da AIPo, sempre nel 2008. Si era tuttavia resa necessaria una "traslazione" di 30 cm in quota di questo secondo rilievo, che risultava mal posizionato rispetto al DTM del MATTM e anche alle sezioni rilevate disponibili. Era stata inoltre creata, sulla base delle sezioni disponibili rilevate nel 2011 e nel 2018 da AIPo e utilizzando il software XS Interpolator, la batimetria relativa all'alveo inciso che, a causa della presenza di acqua al momento del volo, non era descritto correttamente nei rilievi LiDAR e nel DTM da essi derivato.

Nel presente studio è stato possibile utilizzare un rilievo LiDAR aggiuntivo, realizzato per conto di AIPo nel 2014, del tratto a sud della Via Emilia. Si è dunque realizzato un unico DTM, così composto:

- tratto a monte della Via Emilia: DTM AIPo 2014;
- tratto a valle della Via Emilia: DTM MATTM 2008; sono tuttavia presenti alcuni "inserti" del DTM AIPo 2008 (corretto in quota) per le zone non coperte dal rilievo MATTM 2008, evidenziate in rosso nella Figura 1-23;



Figura 1-23. Copertura del DTM MATTM 2008 nel tratto a valle dell'A1: sono evidenziate in bianco le arginature e in rosso le zone non coperte dal rilievo; in giallo sono riportate le sezioni rilevate a terra nel 2011 e nel 2018.

- Alveo inciso: batimetria "scavata" rispetto al DTM sulla base delle sezioni disponibili rilevate nel 2011 e nel 2018 da AIPo con un algoritmo di interpolazione automatica descritto nell'APPENDICE B. Si precisa che è stata esclusa dalla procedura la sezione EN-39 2011, che si ritiene affetta da errore proprio in corrispondenza dell'alveo inciso (si veda la Figura 1-24).

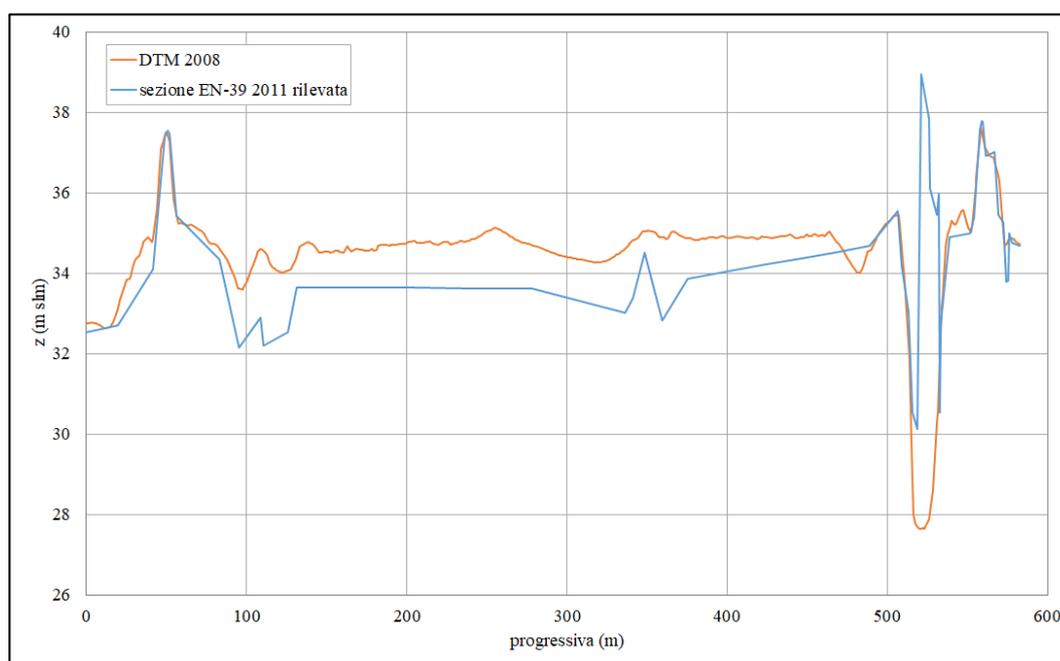


Figura 1-24. Sezione En-39 2011. Confronto tra DTM MATTM 2008 e rilievo a terra. Si evidenzia un andamento anomalo in corrispondenza dell'alveo inciso (progressiva 520 m circa).

Infine, dal confronto tra le sezioni rilevate nel 2018 e il DTM 2008, è emersa una differenza rilevante, che ha richiesto una correzione "manuale". Nel tratto a valle di Casaltone e a monte di Sorbolo sono presenti alcune zone utilizzate in passato per attività estrattive; nel DTM 2008 tali aree risultavano ribassate di circa 2.5 m rispetto al resto della gola (Figura 1-25a). Tuttavia, la sezione EN-38 2018, che intercetta proprio queste aree, mostra che ad oggi (2018), probabilmente a seguito di interventi di ripristino o a causa del deposito di sedimenti in occasione delle varie piene intercorse negli ultimi anni, la quota di quest'area è tornata all'incirca pari a quella delle altre golene (Figura 1-25c) e ciò sembra confermato

anche dalle foto aree recenti. Per questo motivo, nel DTM utilizzato per la modellazione numerica, le ex-zone di cava sono state "rialzate" per riportarle alla quota attuale, come mostrato nelle Figura 1-25b e Figura 1-25c.

Da questo DTM unificato sono state estratte le sezioni trasversali del modello HECRAS tramite lo strumento automatico "Cut from Terrain".

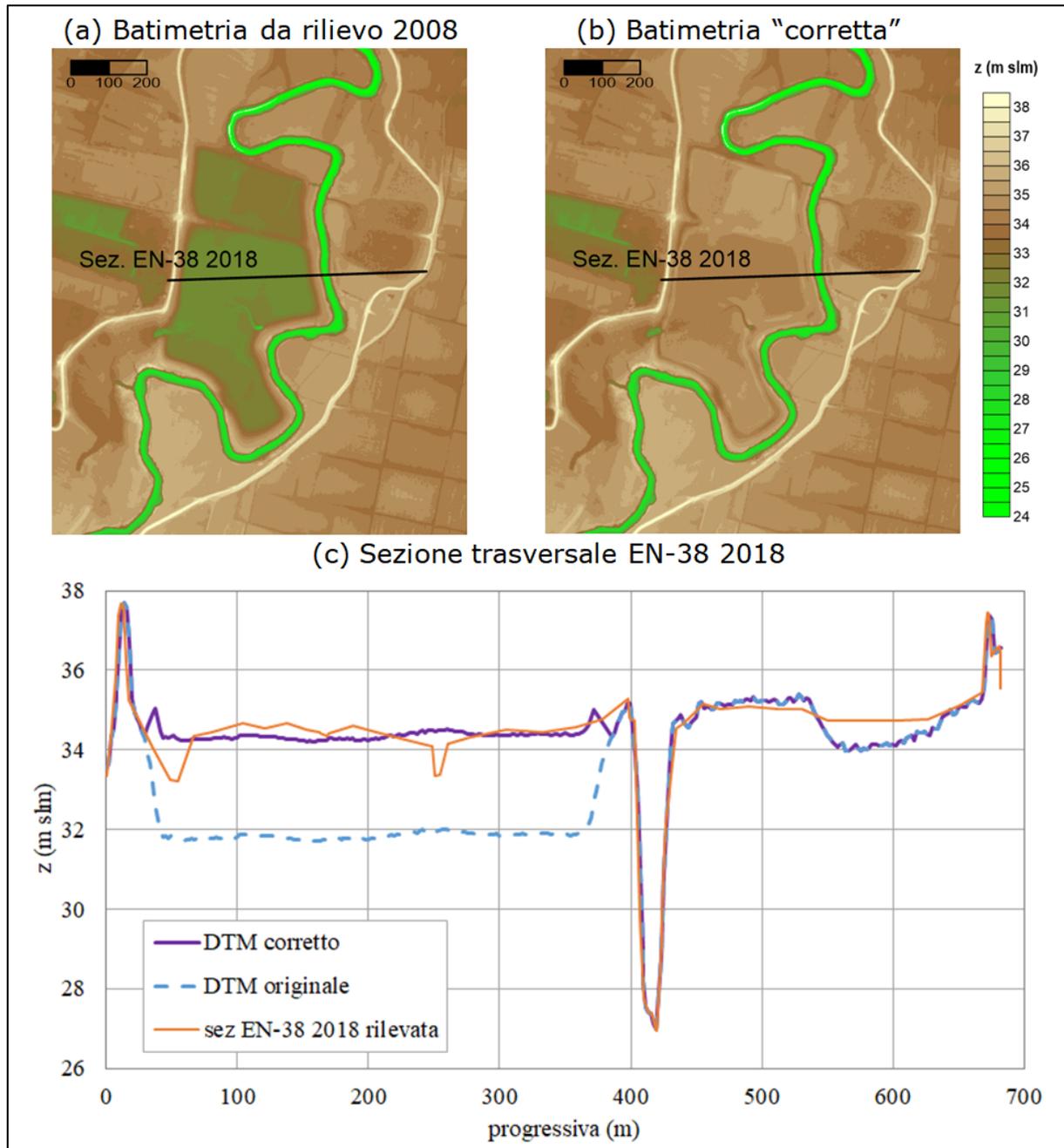


Figura 1-25. Ex-cave a monte di Sorbolo: DTM MATTM 2008 (a) originale e (b) modificato; (c) confronto tra sezione EN-38 2018 rilevata e DTM originale e "corretto".

A titolo di esempio, nella Figura 1-26 si riporta il confronto per una sezione posta immediatamente a valle del manufatto della cassa di espansione di valle (progressiva 36829.2) tra il modello fornito e quello modificato. Si osservi che, nonostante la traslazione del DTM AIPo 2008, questo risulta comunque mal posizionato¹ in quota rispetto al DTM AIPo 2014, perlomeno in questo tratto. Infine, anche le 2 sezioni a monte e valle del ponte di Sorbolo presentano notevoli scostamenti tra il DTM 2008 e il rilievo per sezioni 2018 (Figura 1-27), a causa di un intervento di risagomatura dell'alveo effettuato nel 2016. Nella Figura 1-27 sono riportate anche le sezioni di contabilità, che tuttavia risultano modificate già nel 2018. Viste le notevoli differenze, che possono influenzare le valutazioni dei livelli a Sorbolo utilizzati nelle fasi di calibrazione, nel modello HEC-RAS sono state inserite le 2 sezioni rilevate del 2018, sostituendo quelle estratte dal DTM.

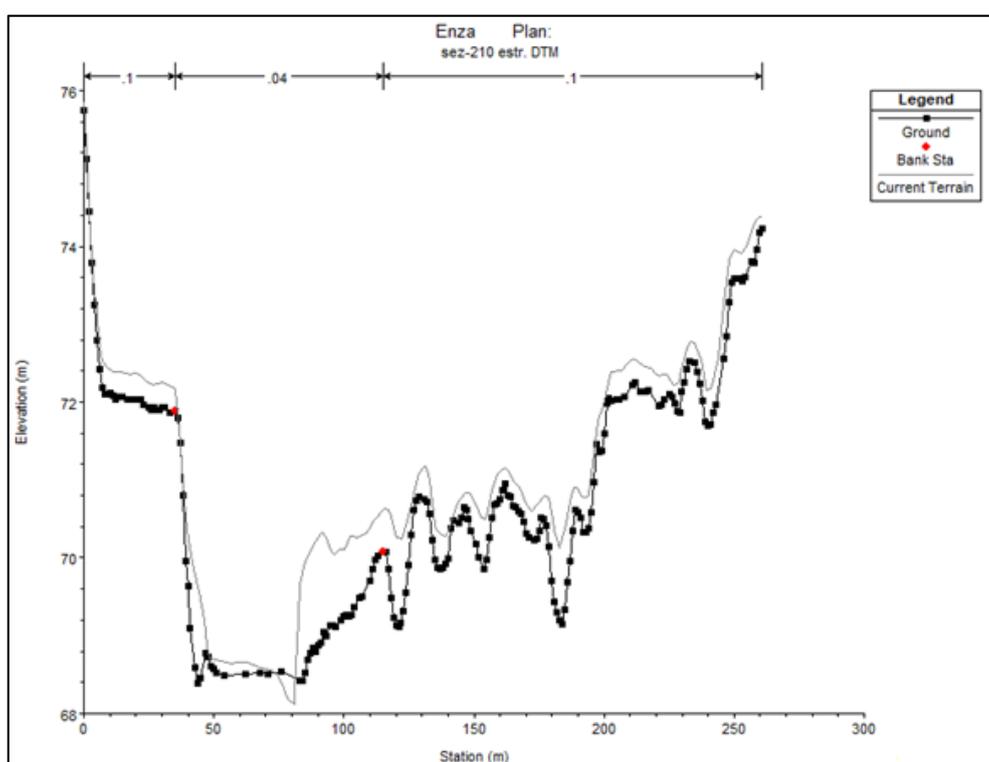


Figura 1-26. Sezione con progressiva 36829.2 nel modello HEC-RAS: confronto tra la geometria nel modello fornito ("Ground", da DTM AIPo 2008 traslato di 30 cm in quota) e in quello qui modificato ("Current Terrain", da DTM AIPo 2014).

¹ Ovvero posizionato diversamente rispetto al DTM AIPo 2014.

Realizzazione e taratura preliminare di un modello 1D del torrente Enza dalla traversa di Guardasone alla confluenza in Po e simulazione dell'evento del 12 dicembre 2017

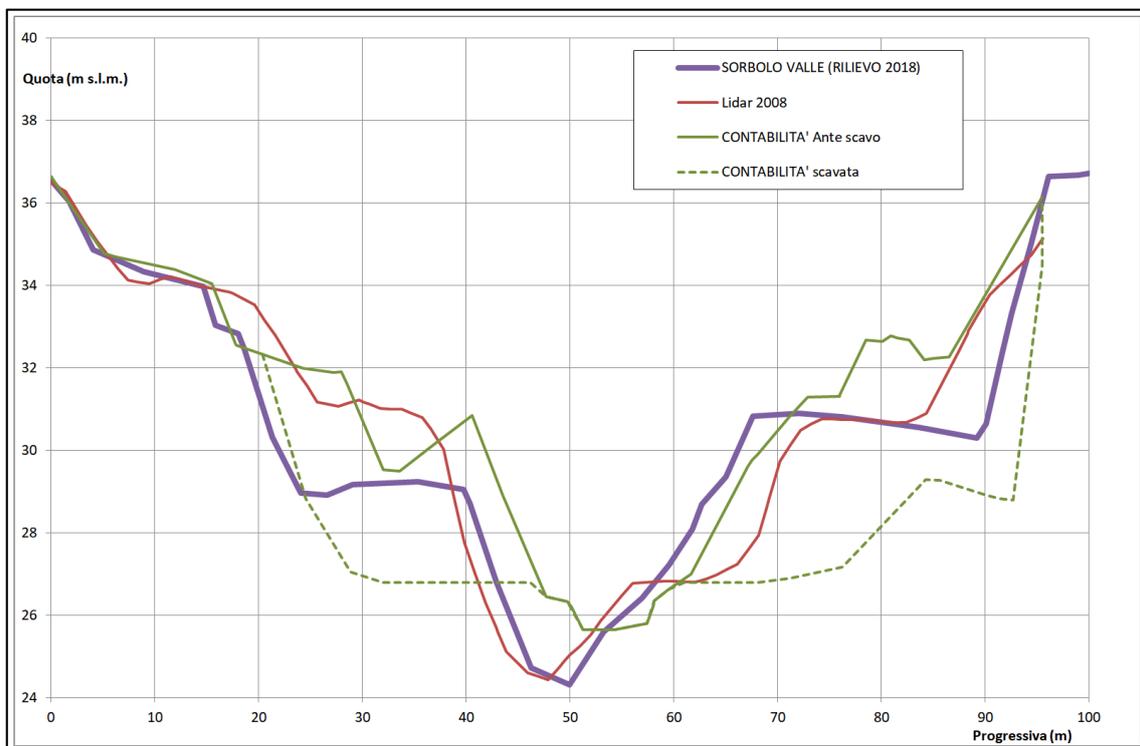
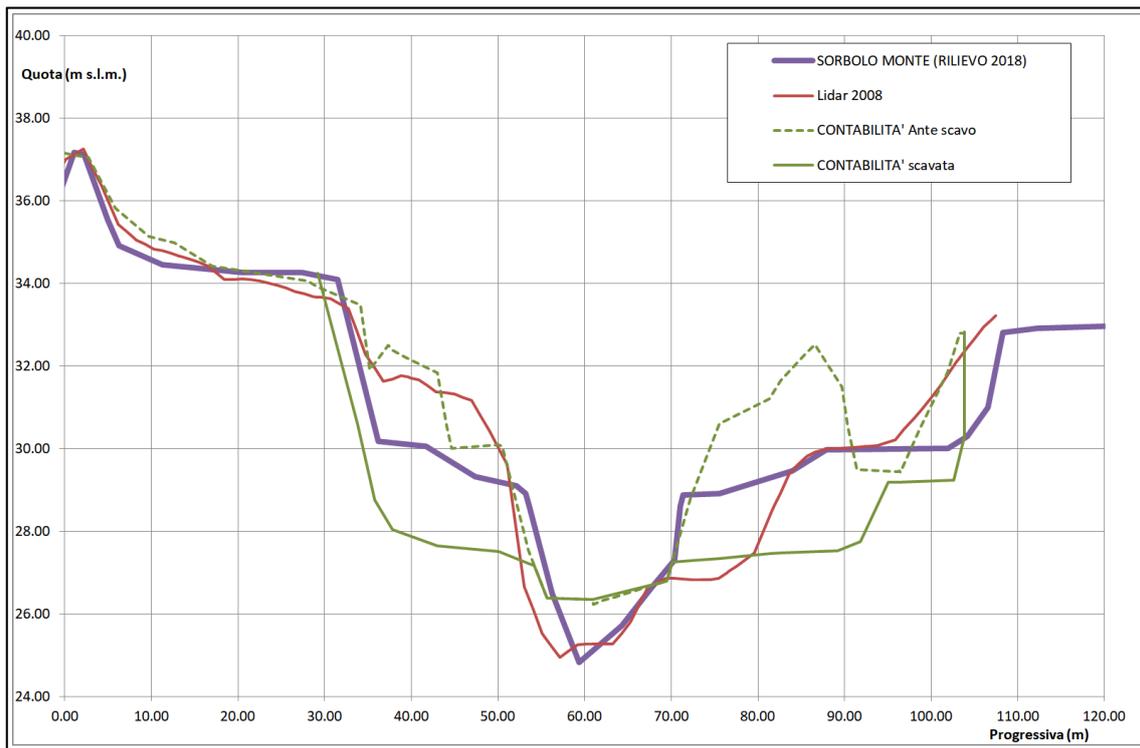


Figura 1-27. Confronto tra le sezioni a monte (in alto) e a valle (in basso) del ponte di Sorbolo da DTM 2008, rilievo per sezioni 2018, contabilità dei lavori di risagomatura del 2016.

1.4.2 Storage Areas per descrivere le aree golenali

Nel modello originale alcune aree golenali non chiuse erano state modellate come *storage areas*, collegate all'asta principale tramite strutture laterali. Tuttavia, in occasione di eventi di piena gravosi, come quello del dicembre 2017, tali aree contribuiscono al moto, come confermato anche dalla modellazione 2D. La schematizzazione originaria non permetteva di descrivere correttamente il fenomeno. Per questo motivo, ove possibile, queste aree golenali sono state modellate con sezioni non rettilinee, all'incirca trasversali localmente alle linee di corrente. Le due schematizzazioni sono confrontate nella Figura 1-28 per le aree golenali a monte di Sorbolo e nella Figura 1-29 per l'area golenale a valle di Lentigione. Si noti che la *storage area* "Enza_Sto-6" è stata invece mantenuta, poiché non è possibile descrivere la geometria del corso d'acqua mediante sezioni trasversali che si incrociano.

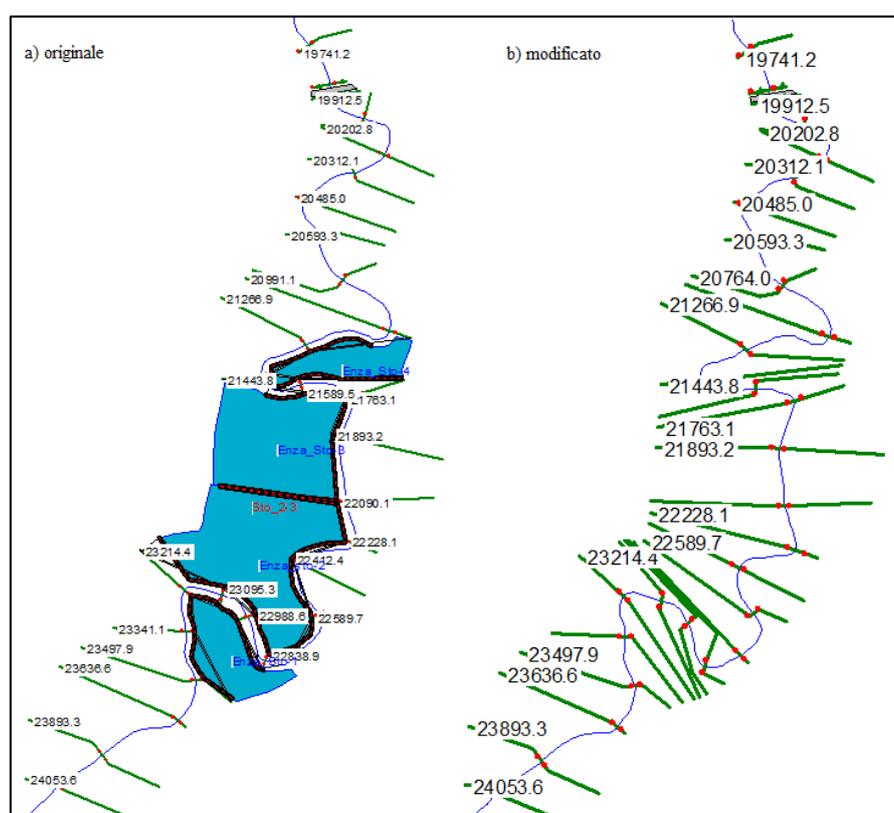


Figura 1-28. Confronto tra la schematizzazione (a) con *storage areas* e *lateral structures*, e (b) con *cross-sections*, per le aree golenali a monte di Sorbolo.

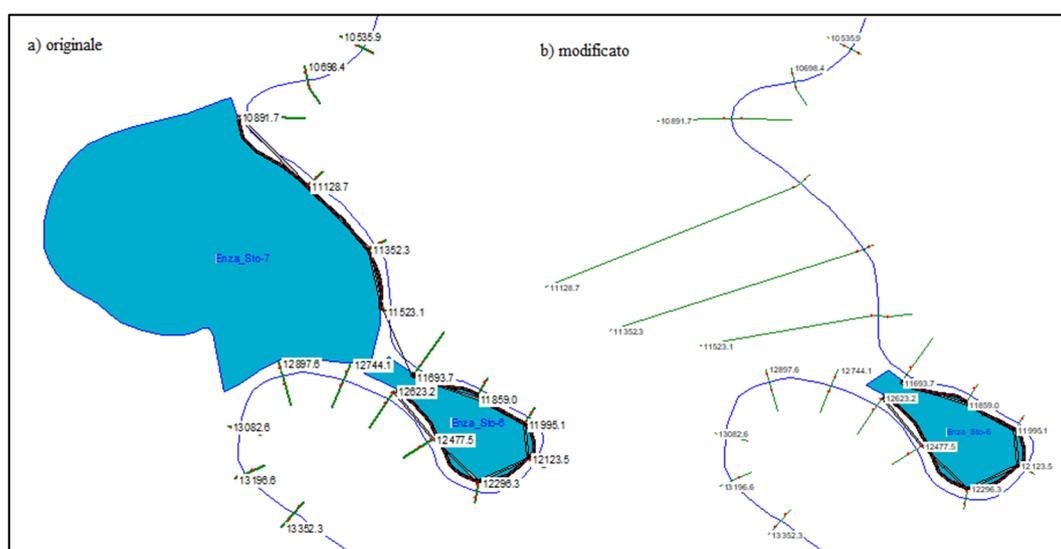


Figura 1-29. Confronto tra la schematizzazione (a) con *storage areas* e *lateral structures*, e (b) con *cross-sections*, per l'area golenale a valle di Lentigione.

1.4.3 Geometria dei manufatti nella zona delle casse

La geometria dei manufatti nella zona delle casse è stata aggiornata sulla base degli ultimi rilievi disponibili. Nel seguito si farà riferimento alla numerazione dei manufatti ricavata dal rilievo AIPo 2011 e riportata nella Figura 1-30.

Si ricorda che sono disponibili, oltre al rilievo di tutti i manufatti del 2011, due aggiornamenti successivi realizzati sempre da AIPo: il primo, datato febbraio 2018, riguarda nuovamente tutti i manufatti, ad esclusione del manufatto 03 (traversa presente tra le due casse); il secondo, datato ottobre 2018, prevede solo alcune correzioni ai manufatti 02 e 05. Si è ritenuto di attribuire alle *inline structures* e alle *lateral structures*, utilizzate in HECRAS per schematizzare i manufatti, le dimensioni derivanti dal rilievo più recente tra quelli disponibili. Nel seguito si riportano le dimensioni geometriche assunte per ciascun manufatto nel modello HECRAS.

- Manufatto 01: Traversa a monte del manufatto regolatore della cassa di monte (indicata come TR02 nel rilievo 2018). È stata schematizzata come *inline structure* e la geometria è stata desunta dal rilievo 2018. Immediatamente a monte e a valle della traversa sono inoltre state sostituite le sezioni estratte dal DTM con le sezioni rilevate a terra, al fine di evitare

incompatibilità sulle quote che potessero generare instabilità numeriche. Non sono descritti i blocchi di dissipazione.

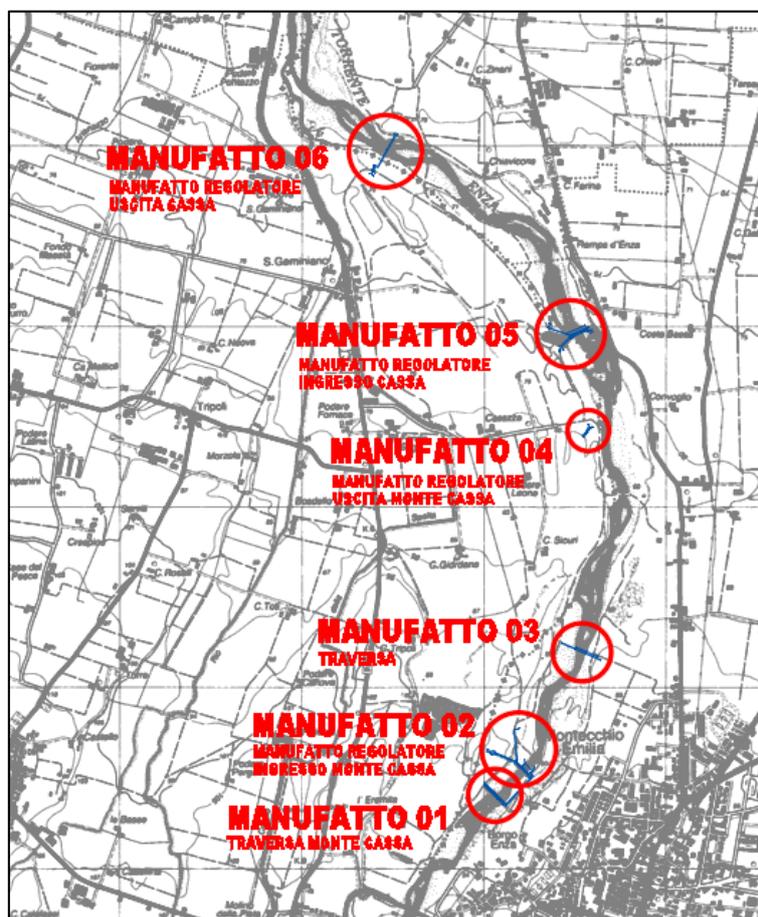


Figura 1-30. Numerazione dei manufatti nella zona delle casse da rilievo AIPo 2011.

- Manufatto 02: Manufatto regolatore cassa di monte. Si compone di una *inline structure*, che schematizza il manufatto principale in linea, e di due *lateral structures*, che rappresentano lo sfioratore laterale di imbocco della cassa fuori linea e lo sfioratore di sicurezza della medesima cassa ("troppo pieno"). La geometria è desunta dai rilievi 2018. Il manufatto principale è composto da 5 luci di fondo (*gates*) di larghezza 11.28 m (valor medio) e altezza 1.20 m; lo sfioratore di superficie è rappresentato anch'esso da 5 *gates* con larghezza complessiva pari a 94.5 m, in virtù della presenza delle pile del ponte sovrastante, che invece è descritto come *weir*. Si noti tuttavia che i 5 *gates* superiori funzionano nella pratica sempre e solo come *weirs*, senza

entrare mai in pressione. I due sfioratori laterali sono entrambi schematizzati come *weirs*, con larghezza di 112.75 m e 170 m rispettivamente per quello di imbocco e per il troppo pieno. Le quote sono riportate nella Tabella 1.1.

- Manufatto 03: Traversa. La geometria di questa *inline structure* è desunta dal rilievo 2011.
- Manufatto 04: Scarico di fondo cassa monte. È rappresentato da una *lateral structure* con una luce di fondo (*gate*) di larghezza 2.4 m e altezza 2.8 m (dimensioni dal rilievo 2018). La quota del fondo della luce è pari a 75.98 m s.l.m. Salvo diverse indicazioni, la paratoia è considerata chiusa.
- Manufatto 05: Manufatto regolatore cassa valle. Analogamente al manufatto di monte, si compone di una *inline structure* e di due *lateral structures*, che rappresentano lo sfioratore laterale di imbocco della cassa fuori linea e lo sfioratore di sicurezza della medesima cassa ("troppo pieno"). La geometria è desunta dai rilievi 2018. Il manufatto principale è composto da 5 luci di fondo (*gates*) di larghezza 11.82 m (valor medio) e altezza 1.20 m; lo sfioratore di superficie è rappresentato in questo caso da una *weir* di larghezza complessiva pari a 99.37 m. Anche i due sfioratori laterali sono schematizzati come *weirs*, con larghezza di 70 m e 120 m, rispettivamente per l'imbocco e per il troppo pieno. Le quote sono riportate nella Tabella 1.1.

Tabella 1.1. Quote principali relative ai manufatti regolatori delle due casse d'espansione.

Quota (m s.l.m.)	Cassa monte	Cassa valle
Fondo del manufatto	85.46	72.70
Fondo a valle del manufatto	83.76	69.75
Sommità luce (con trave limitatrice)	86.68	73.88
Sfioratore di superficie	89.06	76.29
Sfioratore laterale di imbocco della cassa	87.87	74.95
Sfioratore di sicurezza ("troppo pieno")	86.31	72.40

- Manufatto 06: Scarico di fondo cassa valle e Traversa (indicata come TR01 nel rilievo 2018). È rappresentato da una *lateral structure* identica allo

scarico della cassa di monte, a parte la quota del fondo della luce che in questo caso è pari a 64.40 m s.l.m. Salvo diverse indicazioni, la paratoia è considerata chiusa. Immediatamente a monte dell'uscita dello scarico è presente una traversa, rappresentata come una *inline structure* con geometria desunta dal rilievo del 2018.

1.4.4 Curve dei volumi delle casse

Le due casse fuori linea sono state schematizzate come *storage areas*, collegate all'asta fluviale tramite i due sfioratori di imbocco e di sicurezza e tramite lo scarico di fondo. Le curve dei volumi delle due casse sono state ricalcolate sulla base del DTM AIPo 2014 con il *tool* automatico di HEC-RAS "Compute E-V Table from Terrain" e sono rappresentate in Figura 1-31 e Figura 1-32.

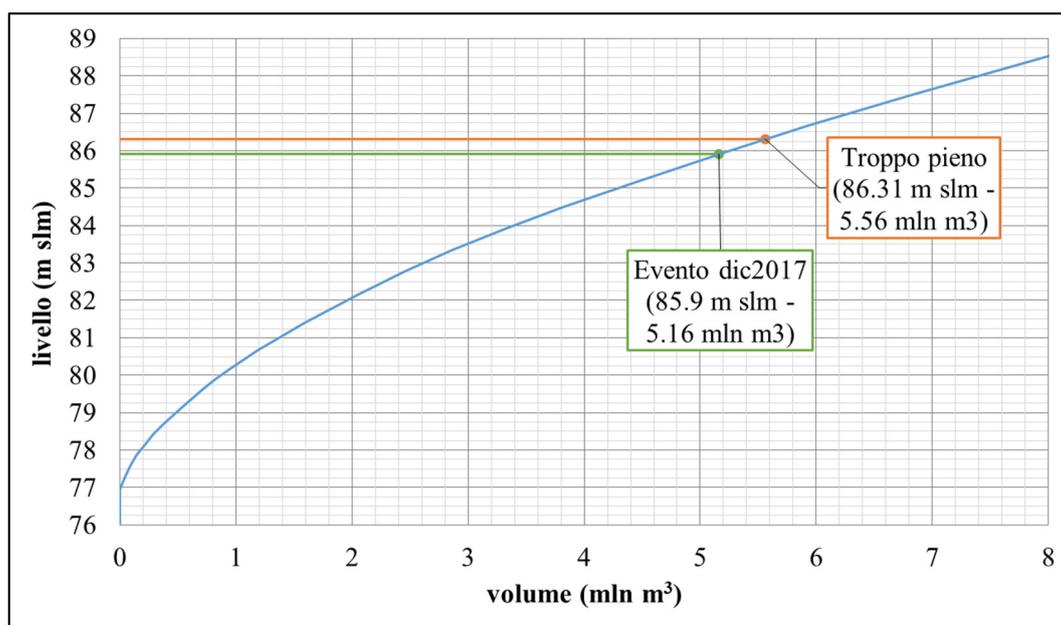


Figura 1-31. Curva dei volumi della cassa di monte.

Per entrambe le casse sono stati messi in evidenza i volumi invasati durante l'evento del dicembre 2017 sulla base delle quote dedotte dalla picchettatura, nonché i volumi invasati in corrispondenza dell'entrata in funzione dello sfioratore di sicurezza ("troppo pieno").

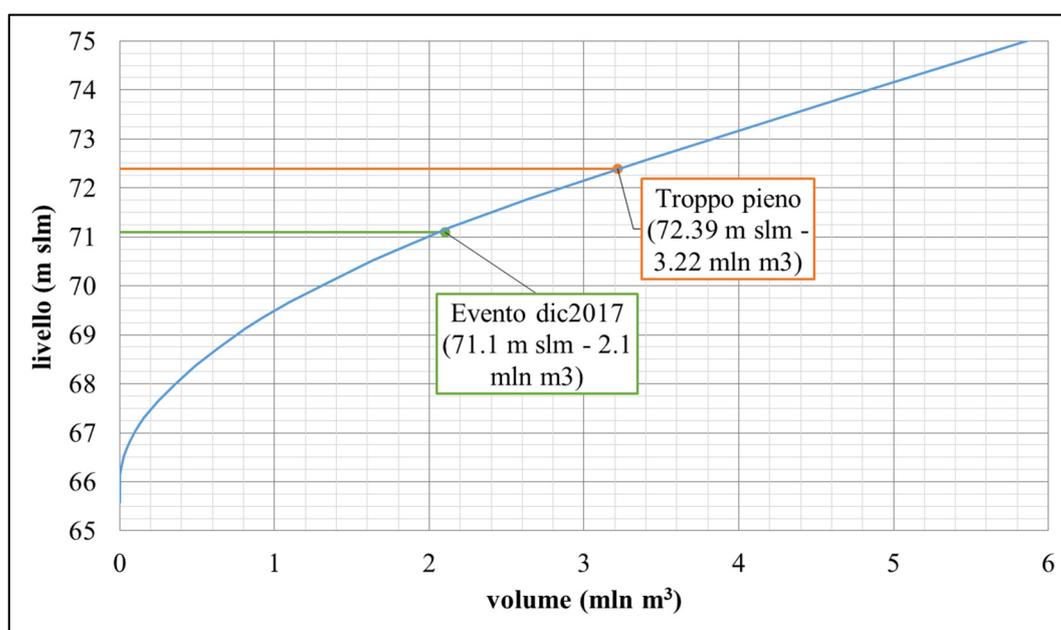


Figura 1-32. Curva dei volumi della cassa di valle.

1.5 Affinamento nella taratura della scabrezza nel tratto a valle delle casse (piena del marzo 2018)

Nel modello originariamente fornito, all'alveo inciso era stato attribuito un coefficiente di scabrezza secondo Strickler pari a $25 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. Nel tratto a valle dell'autostrada A1, tuttavia, pur mantenendo per il fondo alveo il valore $25 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, è stata definita una scabrezza pari a $10 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ per le sponde, per simulare la vegetazione arborea presente sulle sponde stesse. Sulle aree golenali la scabrezza era pari a 12.5 o $10 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ nel tratto a monte dell'autostrada A1, e pari a $17 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ o $12.5 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ a valle della stessa, a seconda della presenza o meno di vegetazione.

Nel presente studio, per il tratto a monte delle casse sono stati mantenuti i valori originali, in assenza di specifiche informazioni che permettessero di affinarne la calibrazione. Per il tratto a valle delle casse, invece, la taratura è stata affinata, in particolare facendo riferimento all'evento di piena del marzo 2018, che rispetto a quello del dicembre 2017 presenta il vantaggio di avere osservazioni (livelli a Sorbolo e picchettatura) non influenzate dall'apertura di una breccia arginale. Inoltre, per questo evento sono disponibili alcune misure di portata

effettuate da ARPAE a Sorbolo, che possono essere usate come controllo per la taratura del modello.

A causa probabilmente dell'intasamento delle luci del manufatto principale della cassa di valle, i livelli registrati durante questo evento, in corrispondenza dell'idrometro posto sulla spalla destra del manufatto stesso, non sono stati ritenuti affidabili e non sono stati quindi considerati nella ricostruzione. Il modello 1D è stato dunque "tagliato" a valle delle casse, in modo che fosse possibile imporre la portata in uscita dal manufatto principale della cassa di valle come condizione al contorno di monte.

L'idrogramma di portata a valle delle casse è stato ricostruito con una procedura inversa ([4], [5]) utilizzando i livelli registrati a Sorbolo come osservazioni. La procedura inversa restituisce l'andamento delle portate che permette di rispettare le osservazioni a Sorbolo, tenendo fissi tutti gli altri parametri del modello (geometria, scabrezza). In particolare, mantenendo i valori di scabrezza presenti nel modello HEC-RAS originariamente fornito, si ottiene in uscita dal sistema di casse l'idrogramma mostrato nella Figura 1-33a (linea verde).

I livelli a Sorbolo sono rispettati rigorosamente nella stima, tant'è che sono indistinguibili da quelli misurati (Figura 1-33b). Tuttavia, la portata nella stessa sezione di Sorbolo risulta sovrastimata rispetto alle misure effettuate da ARPAE (Figura 1-33c).

Questo suggerisce di incrementare la scabrezza lungo il corso d'acqua, in modo da ottenere a Sorbolo portate inferiori a parità di livello. La scabrezza è stata dunque incrementata ovunque del 10% e la procedura inversa per stimare la portata a valle delle casse è stata ripetuta in questa nuova configurazione, fino ad ottenere il risultato riportato nella Figura 1-33a (linea blu).

Anche in questo caso i livelli a Sorbolo sono perfettamente rispettati (Figura 1-33b) da essere indistinguibili con quelli misurati, ma migliora l'aderenza dell'andamento delle portate ai valori misurati da ARPAE (Figura 1-33c), specialmente per i primi due colmi.

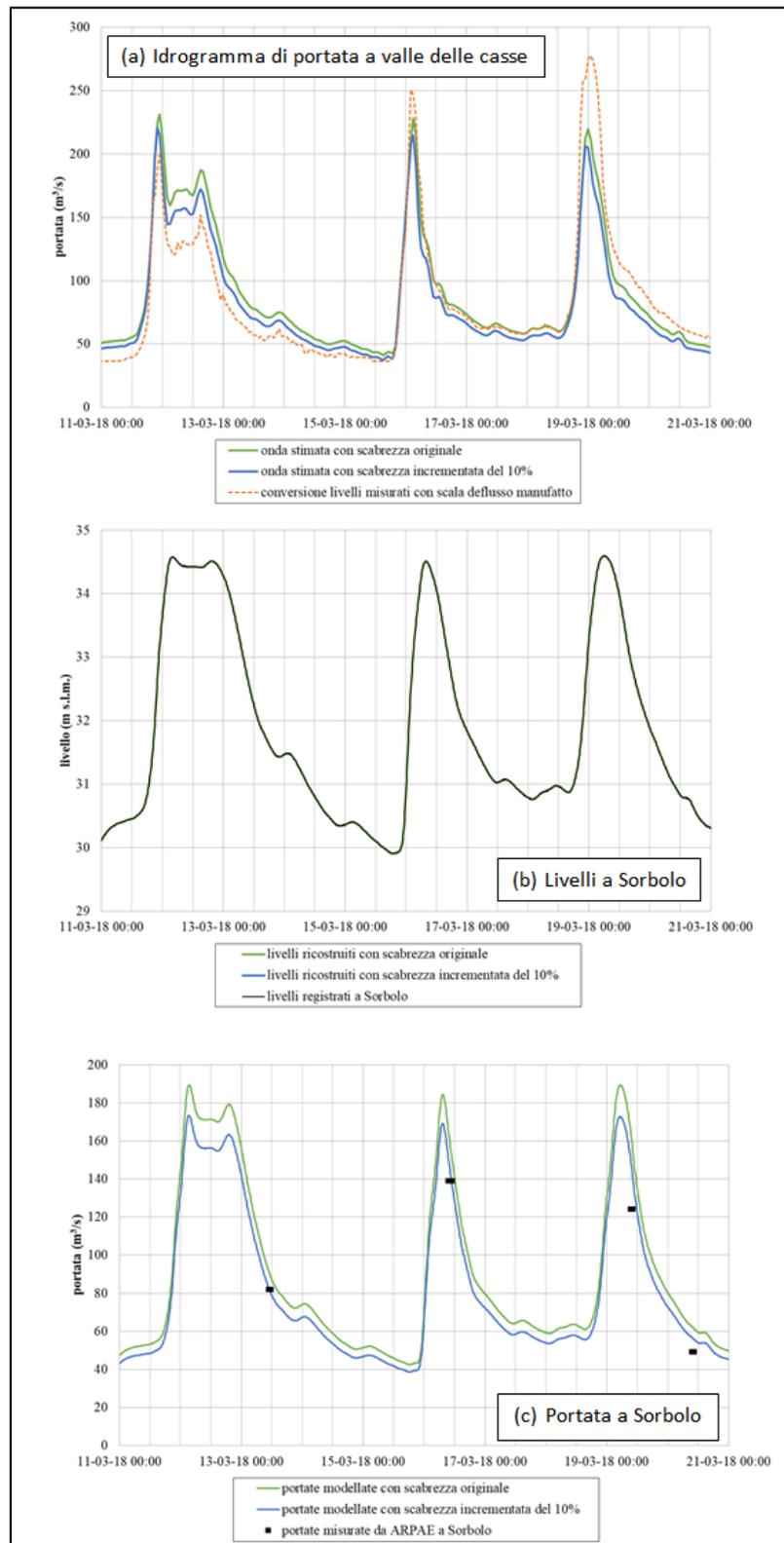


Figura 1-33. Piena del marzo 2018: (a) stima degli idrogrammi in uscita a valle delle casse con procedura inversa, ipotizzando due diversi set di scabrezze, e confronto con portata stimata dalla conversione dei livelli misurati all'idrometro della cassa di valle, considerati non affidabili; (b) livelli a Sorbolo osservati e ricostruiti e (c) portate a Sorbolo ottenute dal modello e confronto con valori misurati da ARPAE.

Nello stesso grafico di Figura 1-33a è riportata anche la stima ottenuta convertendo direttamente i livelli misurati all'idrometro ad ultrasuoni, ubicato sulla spalla destra del manufatto di regolazione della cassa di valle, con una scala delle portate del manufatto (di cui si dirà più avanti): si osserva che il secondo e il terzo picco risultano molto sovrastimati rispetto a quelli ottenuti dalla procedura inversa e dalle misure.

Per questo secondo set di valori di scabrezza si riporta inoltre il confronto tra i livelli ricostruiti e quelli registrati all'idrometro di Sant'Ilario (Figura 1-34), che, pur non essendo considerati particolarmente affidabili viste le incertezze sullo zero idrometrico e sulla posizione dell'idrometro, confermano qualitativamente che la fasatura dei colmi, indice di corretta ricostruzione dei tempi di propagazione, è ben riprodotta.

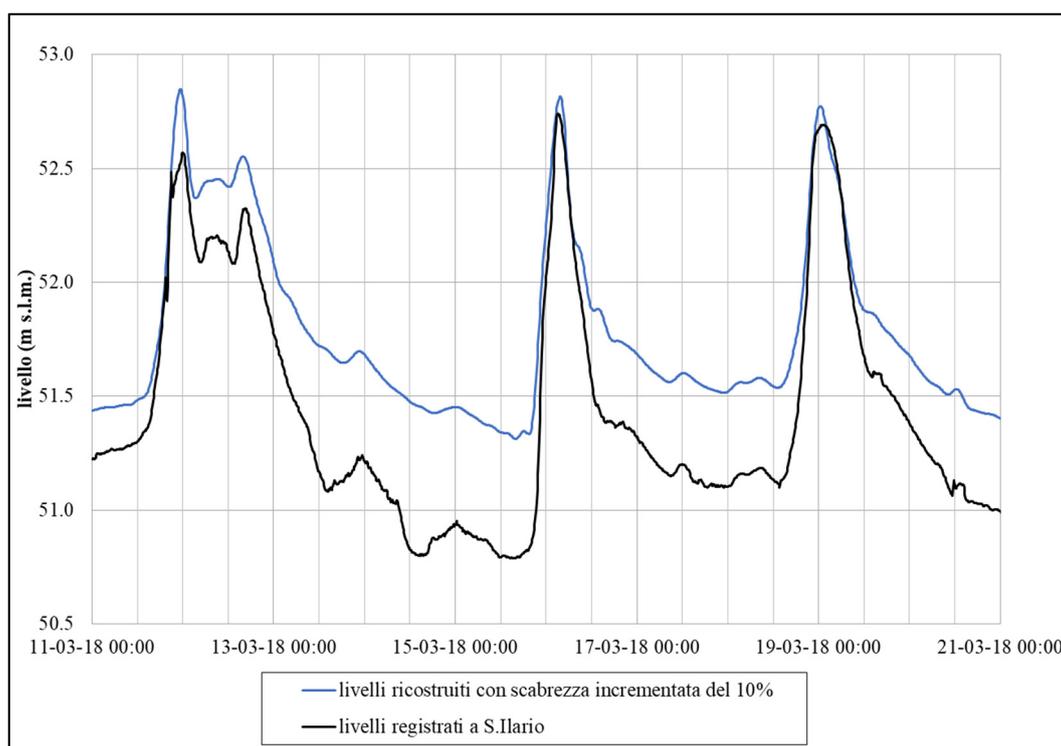


Figura 1-34. Livelli a Sant'Ilario (zero idrometrico ipotizzato a 49.6 m s.l.m.) per la piena del marzo 2018: confronto tra i livelli registrati e quelli ottenuti dal modello 1D con la scabrezza tarata.

Infine, la Tabella 1.2 mostra un confronto tra i massimi livelli ottenuti dalla simulazione con le scabrezze modificate e la picchettatura in alcune sezioni.

Tabella 1.2. Piena del marzo 2018: confronto tra livelli massimi ottenuti dal modello 1D e picchettatura in alcune sezioni significative.

River Station HEC-RAS	Sezione	Quota picchettatura (m s.l.m.)			Livelli massimi HEC-RAS (m s.l.m.)	Differenza HEC-RAS- Media (m)
		Sinistra	Destra	Media		
34149.1	EN_TR00_VALLE	57.93	57.82	57.87	58.24	0.37
33887.5		57.87		57.87	57.87	0
32525.9		54.73	54.61	54.67	54.82	0.15
31729.1	EN_SS9_MONTE	52.82	52.76	52.79	52.78	-0.01
31411.6	EN_FERR_MONTE	51.06	51.08	51.07	51.15	0.08
31027.6	EN_55	45.12		45.12	43.92	-1.20
30592.1			44.15	44.15	43.22	-0.93
30079.6	EN_53		43.21	43.21	42.74	-0.47
29299.2		41.71	41.89	41.80	41.04	-0.76
28752.3	EN_50	40.74	40.83	40.78	40.26	-0.52
27173.5	EN_47		38.83	38.83	38.96	0.13
26659.9	A1_monte		38.74	38.74	38.74	0
26242.7	EN_43	38.05	37.75	37.90	38.16	0.26
25272.2	EN_41		36.95	36.95	37.58	0.63
24053.6		36.09		36.09	36.25	0.16
22090.1	EN_38	35.05	35.16	35.10	35.27	0.17
21443.8	EN_37	35.03		35.03	35.05	0.02
20764		34.91	34.92	34.91	34.85	-0.06
20485	EN_35	34.77	34.64	34.70	34.75	0.05
19912.5	SORBOLO_MONTE		34.59	34.59	34.64	0.05
19510.1	EN_32		34.26	34.26	34.35	0.09
18666.9	EN_30	33.88		33.88	33.76	-0.12
17491.1	EN_28		32.99	32.99	33.00	0.01
16790.7	EN_26	32.37	32.51	32.44	32.59	0.15
15290.4	EN_24		32.04	32.04	31.89	-0.15
14783.5	EN_23		31.70	31.70	31.60	-0.10
13352.3	EN_20	30.49		30.49	30.87	0.38
11128.7	EN_18		29.13	29.13	29.37	0.24
10421.4	EN_16	28.69	28.38	28.53	29.02	0.49
9433.2	EN_14	27.78	28.07	27.92	28.39	0.47
8999.1	EN_13	27.31	27.45	27.38	28.15	0.77
8151.9	EN_11		26.88	26.88	27.58	0.70

Si osservano differenze significative solo in alcuni tratti: in particolare si ha una sottostima dei livelli ricostruiti nel tratto tra la ferrovia e l'autostrada A1, dove però è possibile ipotizzare che siano intercorse variazioni nella geometria dell'alveo negli ultimi 10 anni in virtù dell'ampiezza del letto del fiume e delle golene; nel tratto compreso tra l'autostrada A1 e Lentigione le differenze si mantengono generalmente al di sotto dei 20 cm, mentre in prossimità di Coenzo si ha una leggera sovrastima nei livelli massimi rispetto alla picchettatura. Mediamente le differenze sono inferiori a 10 cm. Visto il buon accordo tra risultanze numeriche e osservazioni, si è ritenuto di assumere il set di valori di scabrezza incrementati del 10% come definitivo per le successive analisi.

1.6 Ricostruzione dell'evento del dicembre 2017

1.6.1 Dati disponibili

Per la ricostruzione dell'evento del dicembre 2017 con il modello 1D descritto e tarato in precedenza, sono stati utilizzati:

- i livelli registrati all'idrometro ad ultrasuoni della cassa di monte (anche se presentano diverse interruzioni), con zero idrometrico assunto pari a quello dell'asta idrometrica (85.52 m s.l.m.);
- i livelli registrati all'idrometro a ultrasuoni della cassa di valle, con zero idrometrico assunto pari a quello dell'asta idrometrica (72.52 m s.l.m.);
- i livelli registrati all'idrometro di Sorbolo, con zero idrometrico dedotto dagli Annali Idrologici (23.76 m s.l.m.);
- il livello massimo picchettato nelle due casse fuori linea.

Inoltre, come ulteriore elemento di verifica, si è considerata la picchettatura della piena lungo l'asta del fiume effettuata per conto di AIPo e infine, solo qualitativamente, l'andamento dei livelli registrati all'idrometro di Sant'Ilario. L'obiettivo era ricostruire l'idrogramma di portata in arrivo a Guardasone, e di conseguenza quelli in uscita a valle dalle casse e a Sorbolo.

Tra la traversa di Guardasone e le casse d'espansione è necessario anche tener conto dell'apporto di due affluenti minori in sinistra idraulica, i torrenti Termina e Masdone. Il contributo dei bacini di questi due torrenti è stato fornito da AdBPo sulla base della modellazione idrologica effettuata con il modello disponibile presso ARPAE e inserito nel modello come un unico *lateral inflow hydrograph* (Figura 1-35).

1.6.2 Descrizione dell'apertura della breccia nel modello 1D

L'inclusione dell'apertura della breccia nella modellazione, seppur descritta in modo semplificato, è fondamentale per poter tener conto della riduzione della portata transitante a valle della rotta stessa, nonché dell'effetto di richiamo indotto nelle sezioni a monte.

La rotta è stata schematizzata con una struttura laterale con una finestra di sezione trapezia. La breccia inizia a formarsi alle ore 5:00 del 12 dicembre 2017 e raggiunge la massima estensione dopo 6 ore. La larghezza finale è stata posta pari a 150 m; la quota minima finale è di 32 m s.l.m. (prossima alla quota della gola destra locale). Il rapporto tra la velocità di apertura verticale e orizzontale è stato posto pari a 0.03. La portata defluente attraverso la breccia è calcolata con l'equazione dello stramazzo.

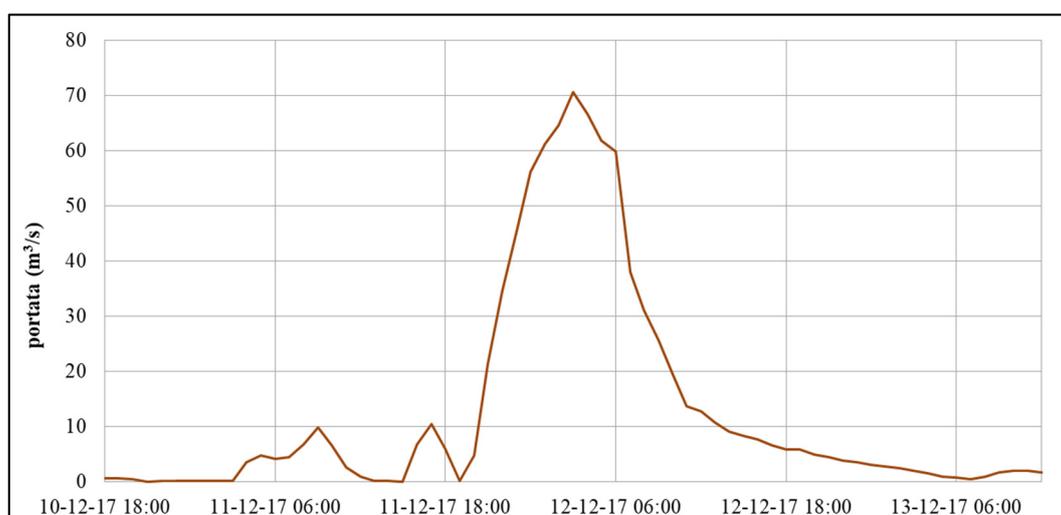


Figura 1-35. Apporto dai bacini dei torrenti Termina e Masdone.

1.6.3 Funzionamento dei manufatti delle casse

Sfioratore laterale di imbocco delle casse

HEC-RAS stima la portata Q che entra nella cassa fuori linea dallo sfioratore laterale mediante la classica equazione dello stramazzo (integrata lungo la progressiva tra le sezioni di monte e di valle²), che richiede la stima del coefficiente C :

$$Q = CL\sqrt{2g}(H - H_s)^{1.5} \quad (1.1)$$

Poiché la portata dipende solo dalla quota idrica (o dal carico totale, l'utente può selezionare quale opzione utilizzare) H al di sopra della quota di sfioro H_s , oltre che dalla lunghezza dello sfioro L , una volta fissato tale coefficiente è possibile calcolare il volume entrante nella cassa a partire dai livelli registrati all'idrometro³. Si è dunque ricercato il coefficiente C che garantisce un volume invasato prossimo a quello ricavato sulla base della picchettatura e della curva dei volumi dell'invaso. Questa operazione è stata effettuata per la cassa di valle, dal momento che la registrazione dell'idrometro della cassa di monte presentava diverse interruzioni. Il valore del coefficiente che garantisce la migliore aderenza tra volume sfiorato e volume invasato è compreso tra 0.11 e 0.13. Si è quindi assunto il valore $C=0.12$, attribuito sia allo sfioratore della cassa di monte che a quello della cassa di valle. Anche se tale valore appare particolarmente basso, valori simili sono ad esempio suggeriti nella documentazione del *software* per le connessioni 1D-2D quando la struttura di sfioro laterale non è rialzata rispetto al fondo dell'alveo.

Naturalmente, in una schematizzazione 1D il livello idrico è ipotizzato costante lungo la sezione trasversale, mentre nella realtà la corrente a monte del manufatto è marcatamente 2D (o addirittura 3D), come recentemente osservato durante la piena dell'1-2 febbraio 2019. Inoltre l'altezza cinetica della corrente non risulta affatto trascurabile, vista la modesta altezza del petto del manufatto principale. Questo può in parte giustificare la necessità di definire un coefficiente

² In questo caso le sezioni risultano piuttosto ravvicinate, quindi la quota idrica in alveo non presenta variazioni significative.

³ Stanti i dislivelli tra monte e valle dello sfioratore laterale, l'efflusso non è mai rigurgitato.

C inferiore a quello normalmente utilizzato per uno stramazzo laterale.

Scala delle portate del manufatto principale

La scala delle portate del manufatto principale (per entrambe le casse) prevede tre regimi di funzionamento a seconda dell'altezza idrica di monte (nel seguito H è il carico totale):

a) Funzionamento a pelo libero nelle luci di fondo. Si ha per altezze idriche a monte del manufatto inferiori⁴ alla sommità delle luci (di altezza "a" e larghezza "B"). In HECRAS l'equazione usata è del tipo:

$$Q = C_0 B h (2gH)^{0.5}$$

b) Funzionamento in pressione delle luci di fondo. Si ha per altezze idriche a monte del manufatto superiori alla sommità delle luci⁵. In HECRAS l'equazione usata è del tipo:

$$Q = C_1 B a (2gH)^{0.5}$$

c) Funzionamento in pressione delle luci di fondo e a stramazzo al di sopra dello sfioratore di superficie. Si ha quando la quota idrica supera la quota di sfioro H_s . Oltre alla portata calcolata al punto b), si ha un ulteriore contributo, valutato in HECRAS con un'equazione del tipo:

$$Q = C_2 L \sqrt{2g} (H - H_s)^{1.5}.$$

È quindi necessario stimare 3 coefficienti. Vista l'assenza di differenze significative tra i manufatti di monte e di valle, si è ritenuto di utilizzare gli stessi coefficienti in entrambi i casi.

Per la valutazione dei coefficienti si è fatto riferimento alle prove sperimentali effettuate dall'ing. Susin [6] anche se la configurazione geometrica reale non è identica a quella riprodotta nel modello fisico stesso. Per i coefficienti C_0 e C_1 si sono assunti i valori di 0.50 e 0.56, rispettivamente, in linea con i risultati delle prove e rientranti nel *range* di valori di letteratura. Per il coefficiente di efflusso

⁴ In realtà la quota a monte può essere anche sensibilmente superiore alla sommità delle luci, prima che queste comincino a funzionare in pressione. Ciò è dovuto all'effetto di richiamo che deprime i livelli in prossimità delle luci. Nel caso in esame, visto che la corrente presenta già una notevole velocità (e quindi altezza cinetica) nell'alveo a monte, si ritiene che l'effetto di richiamo sia piuttosto modesto. In ogni caso, il modello prevede una zona di transizione tra regime a pelo libero e regime in pressione quando h/a è compreso tra 1 e 1.25.

⁵ S veda la nota precedente

sullo stramazzo C_2 si è invece assunto il valore $C_2=1$, sorprendentemente alto. Ciò sia in base alle risultanze (peraltro abbastanza incerte) della modellazione fisica a suo tempo effettuata, sia in base alla considerazione che la corrente presenta già un'altezza cinetica notevole a monte dello stramazzo, per la scarsa altezza del petto del manufatto (3.6 m). Per di più, l'idrometro, sia nel modello fisico che nel prototipo, è ubicato direttamente sul petto del manufatto stesso e risente quindi già del richiamo della corrente.

La scala del manufatto di valle è rappresentata nella Figura 1-36 (l'andamento per il manufatto di monte è del tutto analogo).

È appena il caso di notare che nel regime di funzionamento in pressione delle bocche la portata cresce da circa 200 m^3/s (inizio funzionamento) a circa 340 m^3/s (inizio sfioro) con un incremento molto significativo. È noto che sarebbe invece opportuno che in questo *range* di livelli la portata evacuata si mantenesse il più possibile costante, per aumentare l'efficienza della cassa. Ma ciò è dovuto alla scarsa altezza del petto del manufatto e all'assenza di organi manovrabili.

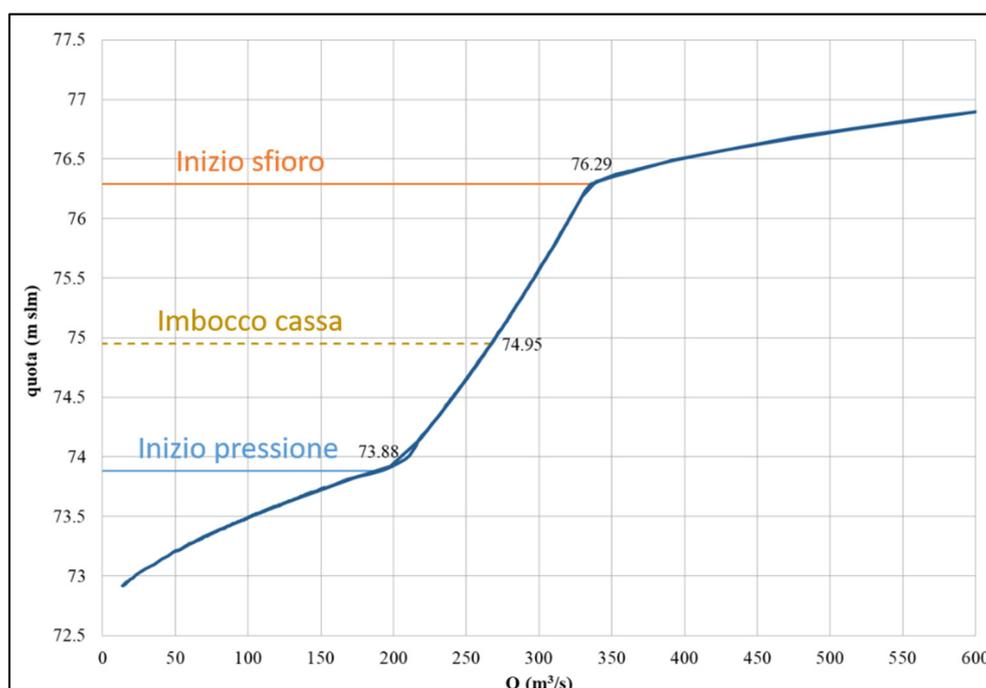


Figura 1-36. Scala delle portate del manufatto principale della cassa di valle.

1.6.4 Ricostruzione dell'idrogramma di portata a Guardasone

Una volta stabiliti i coefficienti dei manufatti, oltre che la geometria e la scabrezza, è possibile utilizzare il modello per la ricostruzione dell'evento del dicembre 2017.

L'idrogramma di portata transitato alla sezione di Guardasone è stato stimato con una procedura inversa simile a quella descritta in precedenza per la piena del marzo 2018. In questo caso, però, le osservazioni che devono essere rispettate sono i livelli registrati ai tre idrometri (cassa monte, cassa valle, Sorbolo) e il riempimento massimo delle casse. Nella Figura 1-37 si riporta l'onda di piena stimata a Guardasone, che presenta un colmo di circa 970 m³/s, nonché gli idrogrammi che si ottengono nella sezione a valle delle casse e a Sorbolo. In uscita dalla cassa di valle la portata al colmo è pari a 635 m³/s, mentre a Sorbolo il colmo è pari a 430 m³/s.

Nella Figura 1-38 sono invece mostrati i confronti tra i valori ricostruiti dal modello e quelli osservati ai tre idrometri cassa di monte/cassa di valle/Sorbolo. In particolare, nella Figura 1-38 sono evidenziati con un quadratino i (pochi) livelli effettivamente misurati disponibili all'idrometro della cassa di monte.

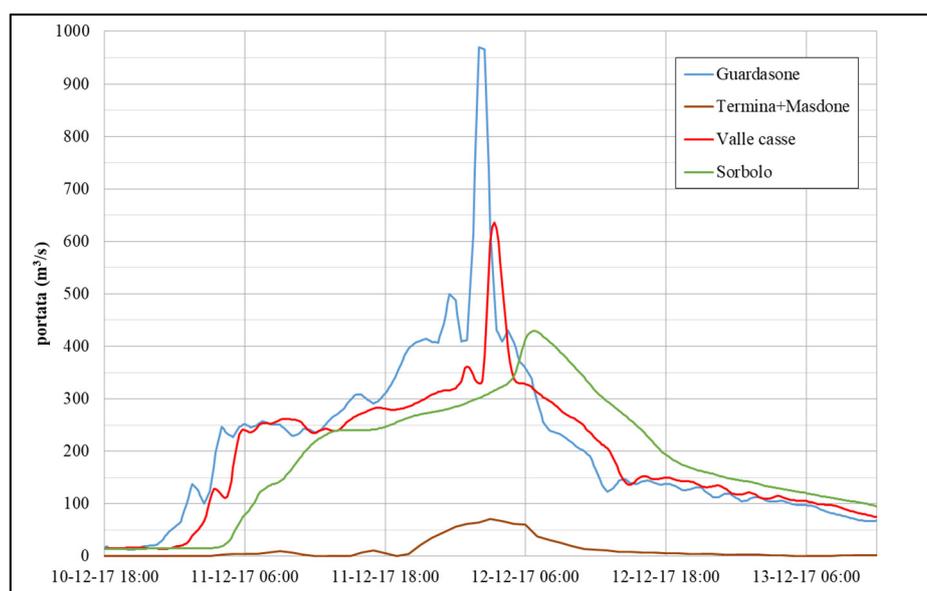


Figura 1-37. Piena del dicembre 2017: stima delle portate a Guardasone, a valle delle casse e a Sorbolo ottenute dalla procedura inversa. È riportato anche l'idrogramma di portata entrante da Termina e Masdone.

Realizzazione e taratura preliminare di un modello 1D del torrente Enza dalla traversa di Guardasone alla confluenza in Po e simulazione dell'evento del 12 dicembre 2017

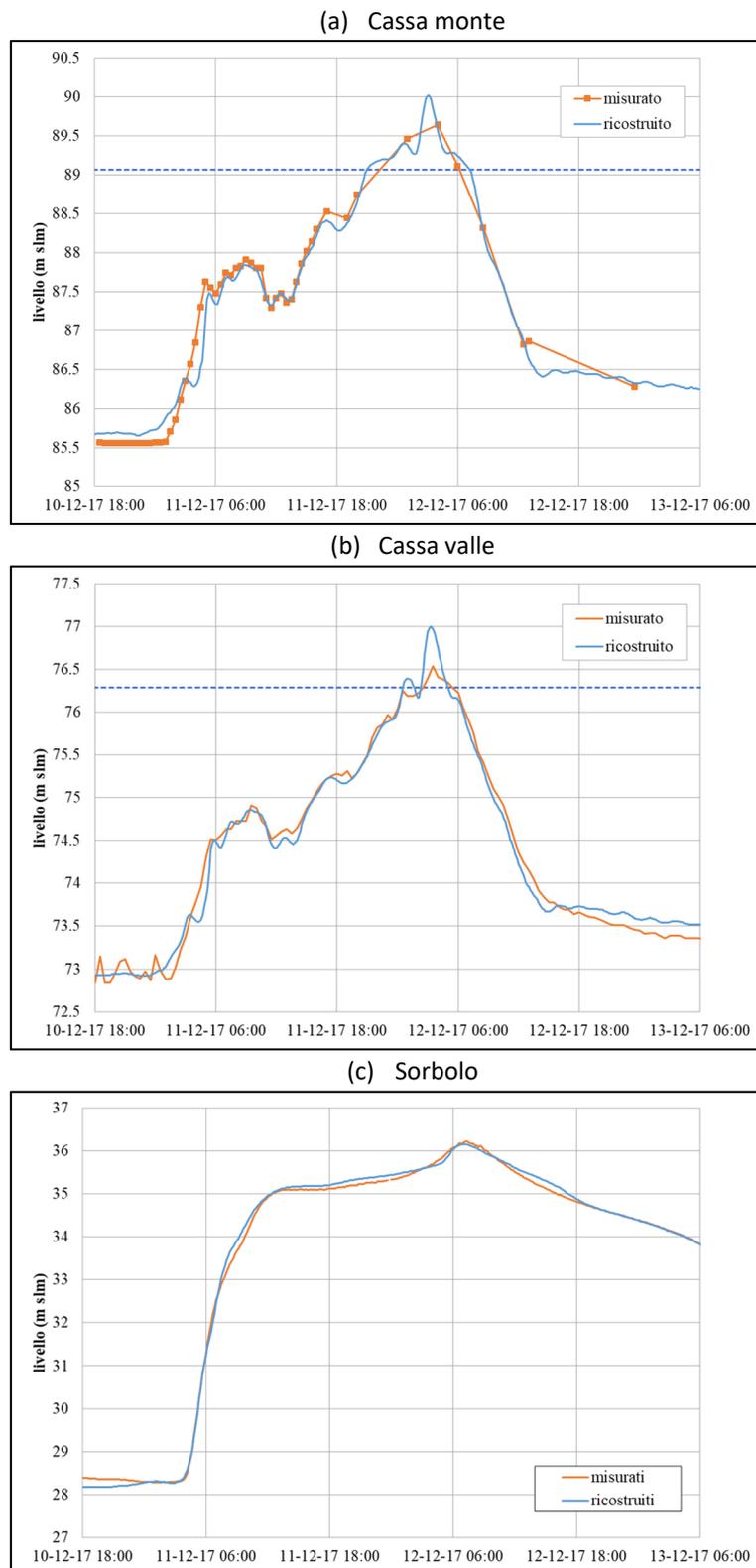


Figura 1-38. Piena del dicembre 2017: confronto tra livelli misurati e ricostruiti all'idrometro (a) della cassa di monte, (b) della cassa di valle, (c) di Sorbolo. In (a) e (b) la linea orizzontale tratteggiata indica la quota dello sfioratore di superficie.

Per quanto riguarda i volumi invasati nelle casse fuori linea, la Tabella 1.3 riporta sinteticamente i risultati ottenuti. Si osserva un accordo non del tutto soddisfacente solo per quanto riguarda il volume invasato nella cassa di valle, che è sovrastimato di circa $0.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, e nei livelli ricostruiti all'idrometro della cassa di valle quando entra in funzione lo sfioratore di superficie, che sono anch'essi sovrastimati. Queste discrepanze sono tra loro collegate: una riduzione del livello al di sopra dello sfioratore di superficie potrebbe essere ottenuta solo da un ulteriore aumento del volume invasato nella cassa, già sovrastimato, o da un aumento del coefficiente C_2 sullo sfioratore, già ai limiti superiori di quanto fisicamente accettabile⁶.

Tabella 1.3. Massimi livelli e volumi invasati alle casse per l'evento del dicembre 2017.

Cassa	Massimo livello picchettato (m s.l.m.)	Volume invasato osservato (10^6 m^3)	Massimo livello ricostruito (m s.l.m.)	Volume invasato ricostruito (10^6 m^3)
Monte	85.9	5.16	85.87	5.13
Valle	71.1	2.10	71.52	2.42

Per analizzare in maniera più approfondita il funzionamento delle casse, nella Figura 1-39 sono riportati gli idrogrammi di portata a monte della cassa di monte (con colmo di poco superiore a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, in virtù del contributo congiunto proveniente dall'asta principale e dagli affluenti Termina e Masdone), tra le due casse (colmo $780 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) e a valle della cassa di valle (colmo $635 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), nonché le portate che sfiorano lateralmente nelle due casse fuori linea.

Come ulteriore verifica qualitativa, in Figura 1-40 è mostrato il confronto tra livelli misurati e ricostruiti all'idrometro di Sant'Ilario (zero idrometrico ipotizzato a 49.6 m s.l.m.). Si osservano notevoli discrepanze, probabilmente dovute alla larghezza della sezione e all'influenza del ponte.

⁶ Le fotografie effettuate da AIPo durante la recente piena del 2 febbraio 2019 hanno messo in luce forti effetti bidimensionali nella "vasca di carico" a monte del manufatto regolatore che possono spiegare, in parte, tali comportamenti apparentemente "anomali".

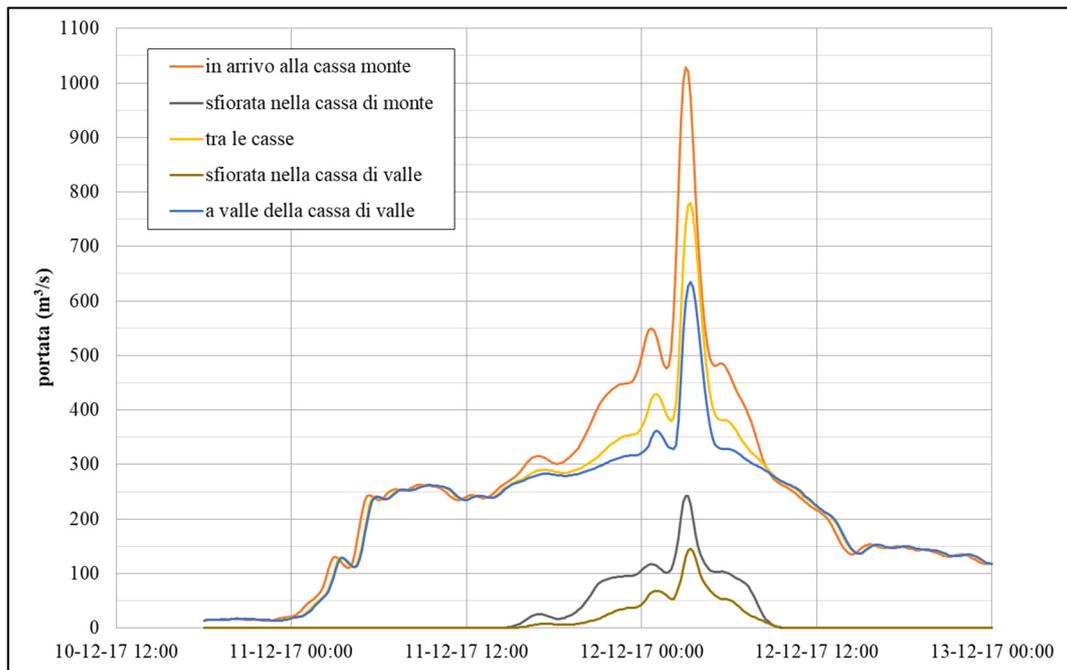


Figura 1-39. Piena del dicembre 2017: dettaglio del funzionamento delle casse

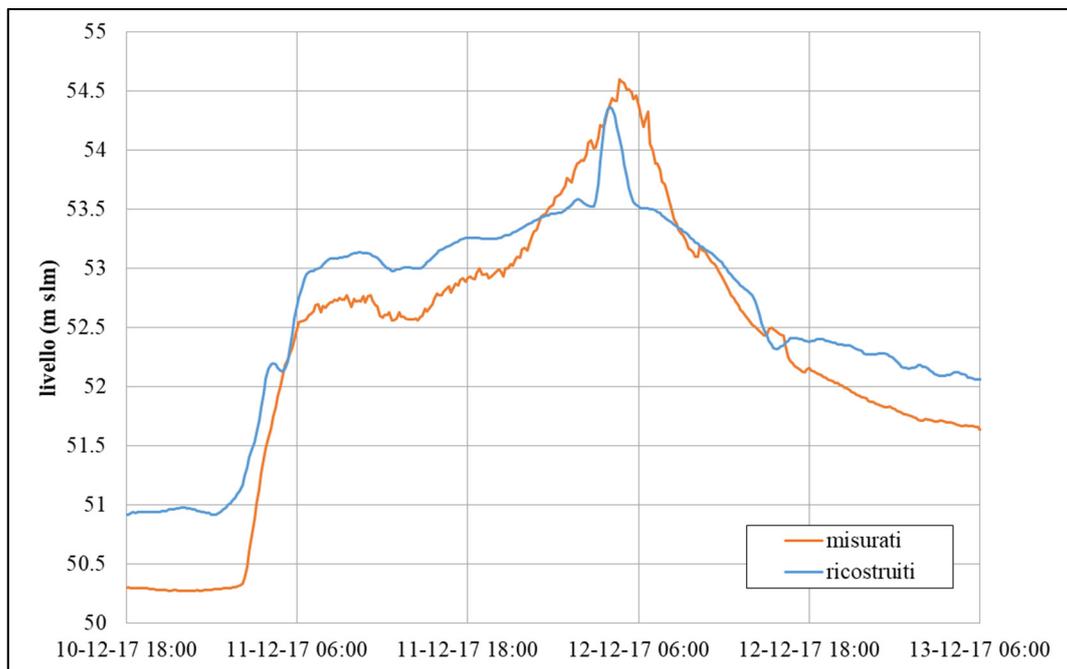


Figura 1-40. Piena del dicembre 2017: confronto tra livello misurato (zero idrometrico ipotizzato a 49.6 m s.l.m.) e ricostruito a Sant'Ilario

Infine, la Tabella 1.4 fornisce i dati di confronto relativi ai massimi livelli ottenuti lungo l'asta e alla picchettatura della piena.

Tabella 1.4. Confronto tra livelli massimi modellati e picchettatura in alcune sezioni significative.

River Station HEC-RAS	Sezione	Quota picchettatura (m s.l.m.)			Livelli massimi HEC-RAS (m s.l.m.)	Differenza HEC-RAS- Media (m)
		Sinistra	Destra	Media		
47883.7	EN_92	139.84		139.84	139.86	0.02
47295.8	EN_91		135.22	135.22	136.07	0.85
46774.9	EN_90		132.14	132.14	132.70	0.56
46184.3	EN_89	128.23	128.85	128.54	128.79	0.25
45766.8	EN_88		125.47	125.47	125.89	0.42
45338.9	EN_87	122.39		122.39	122.36	-0.03
43805.6	EN_84	112.45	112.16	112.31	112.55	0.24
42879.6	EN_82	107.00	107.00	107.00	107.79	0.79
41057.4	EN_79		98.22	98.22	98.01	-0.21
40839.1	EN_78	97.34	97.57	97.46	96.92	-0.53
39872	EN_TR02_VALLE	90.24	90.26	90.25	90.20	-0.05
39690.2	EN_76		90.09	90.09	90.02	-0.07
38735.4	EN_75	81.48		81.48	81.73	0.25
37127.8	EN_73		76.82	76.82	77.00	0.18
36362.3	EN_70	69.64		69.64	69.86	0.22
35897.1	EN_69	68.14		68.14	68.63	0.49
35570.8	EN_TR01_VALLE	65.49		65.49	65.25	-0.24
35402.8	EN_68		64.81	64.81	64.87	0.06
33736.9	EN_65		60.08	60.08	59.47	-0.61
33520.9	EN_64	59.30	59.22	59.26	59.02	-0.24
32926.3	EN_62		57.47	57.47	57.42	-0.05
31729.1	EN_SS9_MONTE	54.46		54.46	54.36	-0.10
31411.6	EN_FERR_MONTE	51.73	52.23	51.98	52.07	0.09
31027.6	EN_55	47.53	47.25	47.39	46.89	-0.50
30592.1	EN_54	46.51	46.35	46.43	45.92	-0.51
28752.3	EN_50	43.28		43.28	42.44	-0.84
28148.1	EN_49	42.43		42.43	41.12	-1.31
27173.5	EN_47	40.27	40.93	40.60	40.51	-0.09
26659.9	EN_A1_MONTE		40.30	40.30	40.22	-0.08
26055.9	EN_42		39.01	39.01	39.03	0.02
25272.2	EN_41	38.40		38.40	38.43	0.03
22090.1	EN_38	36.96	36.90	36.93	36.68	-0.25
21443.8	EN_37	36.84		36.84	36.62	-0.22
20485	EN_35	36.55	36.54	36.55	36.48	-0.07
19912.5	EN_SORBOLO_MONTE	36.48	36.58	36.53	36.36	-0.17
19510.1	EN_32	36.18		36.18	35.90	-0.28
18666.9	EN_30	35.47	35.64	35.56	35.15	-0.41
17491.1	EN_28	34.95	34.91	34.93	34.66	-0.27
16790.7	EN_26	34.86		34.86	34.39	-0.47

River Station HEC-RAS	Sezione	Quota picchettatura (m s.l.m.)			Livelli massimi HEC-RAS (m s.l.m.)	Differenza HEC-RAS-Media (m)
		Sinistra	Destra	Media		
14783.5	EN_23	34.15	34.24	34.20	33.80	-0.40
14237	EN_22	34.00	33.85	33.93	33.49	-0.43
13699.4	EN_21	33.14		33.14	33.15	0.01
11128.7	EN_18	31.91	31.84	31.88	31.49	-0.39
10891.7	EN_17	31.63	31.83	31.73	31.47	-0.26
9433.2	EN_14	30.81	30.74	30.78	30.54	-0.23
8999.1	EN_13		30.46	30.46	30.23	-0.23
8151.9	EN_11	30.30		30.30	29.54	-0.76
7663.2	EN_COENZO_MONTE	30.13	29.25	29.69	29.30	-0.39

Nel tratto a monte delle casse si osservano scostamenti anche di qualche decina di cm, ma senza un trend di sovra- o sottostima ben individuabile. A valle delle casse e fino a Sorbolo le differenze tra massimi livelli ricostruiti e picchettatura sono piuttosto contenute, con l'eccezione del tratto immediatamente a monte dell'attraversamento dell'autostrada A1, dove i livelli massimi sono piuttosto sottostimati. Questo andamento risulta coerente con quanto già osservato per l'evento del marzo 2018 e può essere in parte spiegato da variazioni della geometria dell'alveo⁷ rispetto a quanto descritto nel modello 1D, oltre che dalla schematizzazione 1D stessa, sicuramente poco idonea a descrivere il moto in questo tratto del corso dell'Enza. Per il tratto a valle di Lentigione, i livelli massimi risultano ancora leggermente sottostimati rispetto alla picchettatura, ma è necessario tener conto della riduzione di portata che transita a valle della breccia, che a sua volta è influenzata dalle modalità con cui la rotta è modellata. Vista la semplificazione del processo di efflusso dalla breccia nella modellazione 1D, si ritiene questo risultato complessivamente accettabile.

In questa ricostruzione, dalla breccia fuoriescono circa $5.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, con un picco di portata di circa $260 \text{ m}^3/\text{s}$.

⁷ Parziale conferma può essere fornita dal fatto che uno dei punti picchettati in questa zona risulta addirittura 50 cm al di sotto della quota del fondo fornita dal DTM.

1.6.5 Verifica della scala delle portate di Sorbolo

Nella Figura 1-41 è riportata la scala delle portate a Sorbolo stimata da ARPAE (sulla base delle misure effettuate in particolare durante l'evento del marzo 2018) e pubblicata negli Annali Idrologici 2017 [7] e la relazione quote idriche-portate ottenuta dalla simulazione mediante modello 1D dell'evento del 12 dicembre 2017.

Si osserva che l'andamento ottenuto dalla modellazione numerica descrive un coppia di piena, peraltro non particolarmente ampio, in corrispondenza delle portate medie e basse, che comporta livelli diversi a parità di portata nella fase crescente e calante. La scala diventa molto tesa al di sopra di 250 m³/s circa, evidentemente a causa della conformazione dell'alveo.

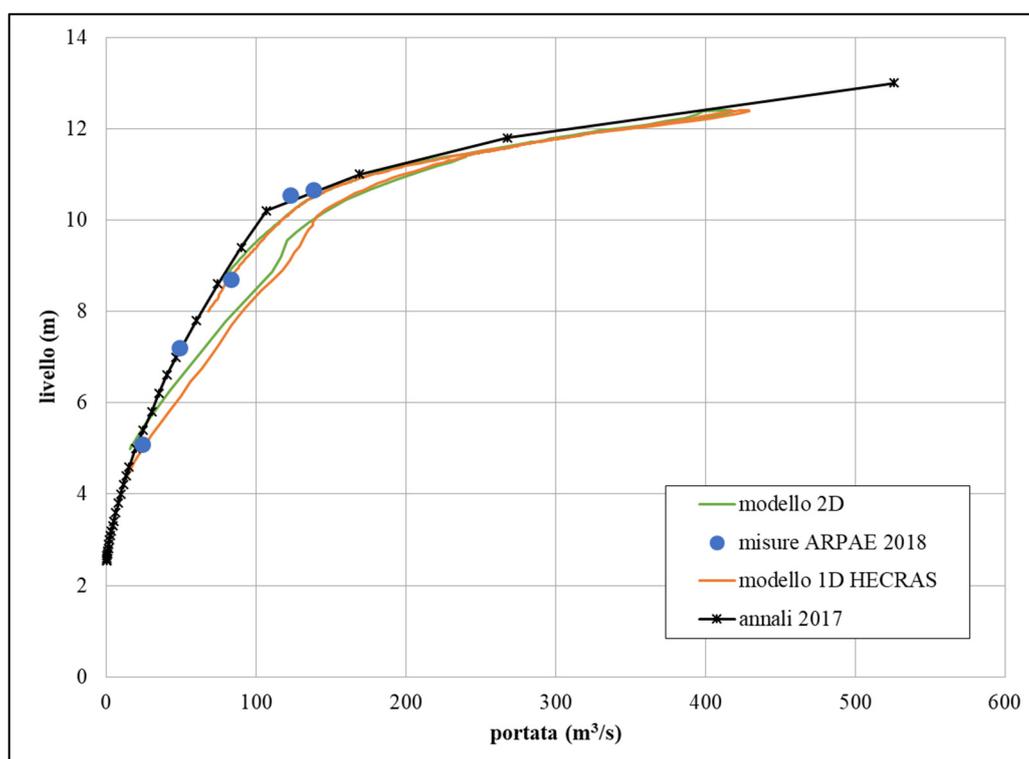


Figura 1-41. Scala delle portate a Sorbolo. Confronto tra la stima di ARPAE, la scala del modello 1D HECRAS e la scala dedotta dal modello 2D.

L'accordo con la scala riportata sull'Annale Idrologico 2017 e con le misure effettuate da ARPAE durante l'evento del marzo 2018 è buono, specialmente in corrispondenza della fase calante. Del resto, le misure ARPAE durante l'evento

del marzo 2018 sono state tutte effettuate durante le fasi di esaurimento della piena (cfr. Figura 1-33c). Sul grafico è riportato anche il confronto con la relazione quote idriche-portate ottenuta mediante il modello 2D descritto nel seguito, il cui andamento è sostanzialmente in linea con quello del modello 1D.

1.6.6 Valutazione dell'incertezza nella ricostruzione

Al fine di stimare in modo semplificato l'incertezza nella ricostruzione dell'onda di piena a Guardasone, si è ripetuta la procedura inversa di stima mantenendo costanti tutti i parametri del modello ma variando la scabrezza di $\pm 15\%$ lungo l'intera asta. Nella Figura 1-42a è mostrato un confronto tra le tre onde ricostruite (con scabrezza "base" e con scabrezze incrementate o diminuite del 15%). Il colmo risulta leggermente anticipato o ritardato rispetto alla simulazione base per il caso con scabrezza incrementata o diminuita, rispettivamente, mentre il valore del colmo si riduce apprezzabilmente solo nel caso di scabrezza incrementata del 15%. Va tuttavia sottolineato che queste due ricostruzioni non garantiscono una buona aderenza con le osservazioni. In particolare, nel caso di scabrezza diminuita i volumi invasati nelle casse sono sovrastimati, così come il colmo di livello nell'idrometro della cassa di valle. Quando invece la scabrezza viene aumentata, risulta mal riprodotto il volume invasato nella cassa di monte (sottostimato) e anche l'andamento del livello a Sorbolo non è colto adeguatamente. La portata in uscita a valle delle casse ha un colmo variabile tra 500 e 650 m³/s per le tre ricostruzioni (Figura 1-42b). Se si confrontano le scale delle portate ottenute a Sorbolo nei tre casi (Figura 1-42c), è possibile osservare come la scala relativa alla simulazione con alveo più liscio non sia in accordo con le risultanze sperimentali; la scala ottenuta con scabrezza maggiorata si avvicina invece alle misure di ARPAE, ma, come detto, i livelli a Sorbolo vengono mal riprodotti in questo caso e il risultato non è ritenuto affidabile.

Realizzazione e taratura preliminare di un modello 1D del torrente Enza dalla traversa di Guardasone alla confluenza in Po e simulazione dell'evento del 12 dicembre 2017

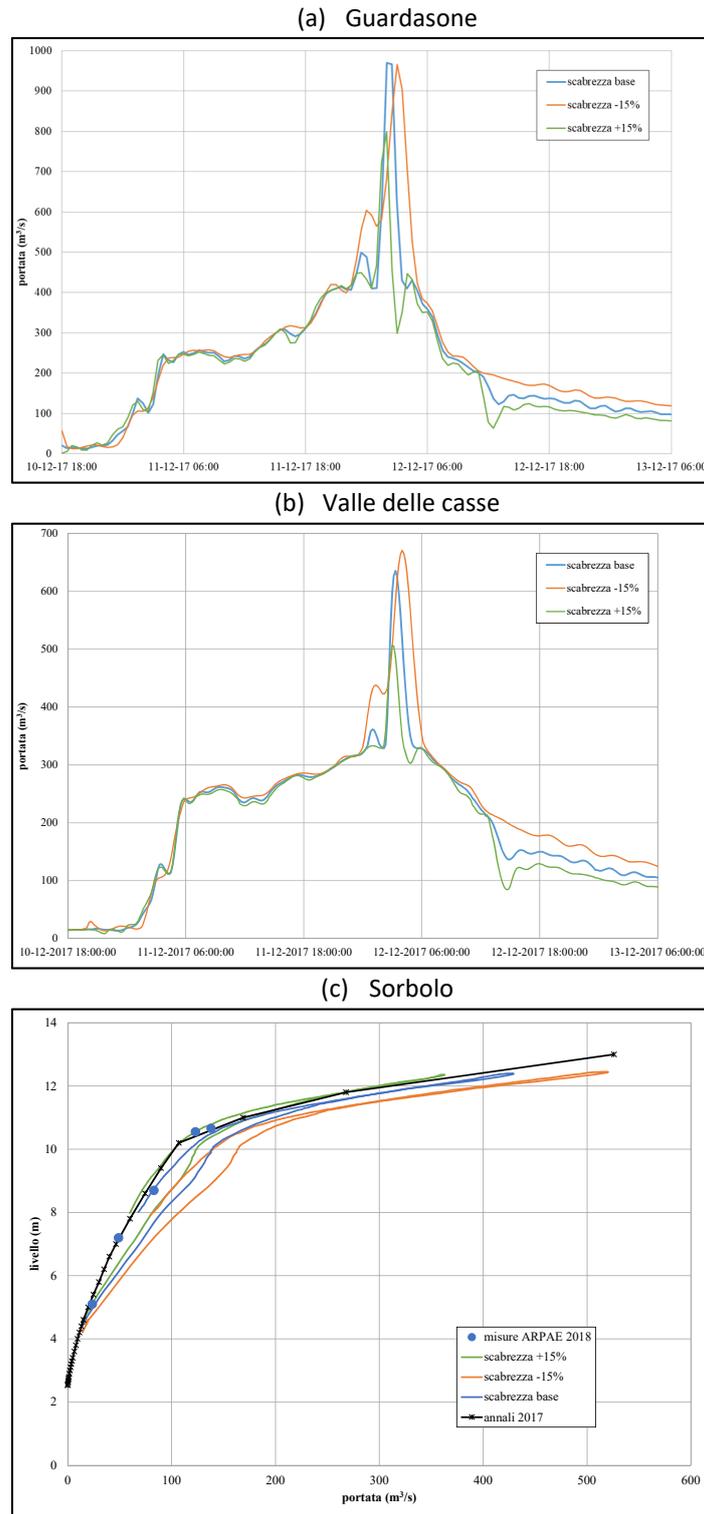


Figura 1-42. Piena del dicembre 2017: (a) stima delle portate a Guardasone ottenuta dalla procedura inversa, per diversi valori di scabrezza lungo l'asta; (b) portata a valle delle casse, e (c) scale delle portate a Sorbolo.

2 Realizzazione e taratura di un modello 2D del torrente Enza da valle casse di espansione alla confluenza in Po e simulazione dell'evento del 12 dicembre 2017

2.1 Premessa

Per le simulazioni bidimensionali dell'asta del fiume Enza a valle delle casse è stato utilizzato il modello PARFLOOD (si veda l'APPENDICE A). Nel codice è implementato un modello di erosione che simula l'apertura graduale di una breccia in occasione della tracimazione di un tratto di arginatura [8].

2.2 Costruzione e calibrazione del modello 2D dell'asta del torrente Enza a valle delle casse di espansione

2.2.1 Batimetria

La batimetria utilizzata nella modellazione 2D è basata sul DTM a passo 1 m già assemblato per estrarre la geometria delle sezioni nel modello 1D e descritto nel paragrafo 1.4, limitatamente al tratto a valle del manufatto regolatore della cassa di valle e fino alla confluenza in Po. È inoltre inclusa nel modello tutta l'area allagabile in destra idraulica tra Sorbolo e Brescello, in modo da poter considerare nelle simulazioni anche l'allagamento di Lentigione durante l'evento del 12 dicembre 2017. Complessivamente, il dominio di calcolo ha una dimensione di circa 45 km². Al fine di ridurre il numero di celle di calcolo e di conseguenza l'onere computazionale delle simulazioni, il DTM è stato poi sottocampionato su una griglia regolare di 2 m di lato, preservando con un opportuno trattamento le quote arginali. Il dominio si compone dunque di circa 11 milioni di celle attive.

La batimetria è mostrata nella Figura 2-1.

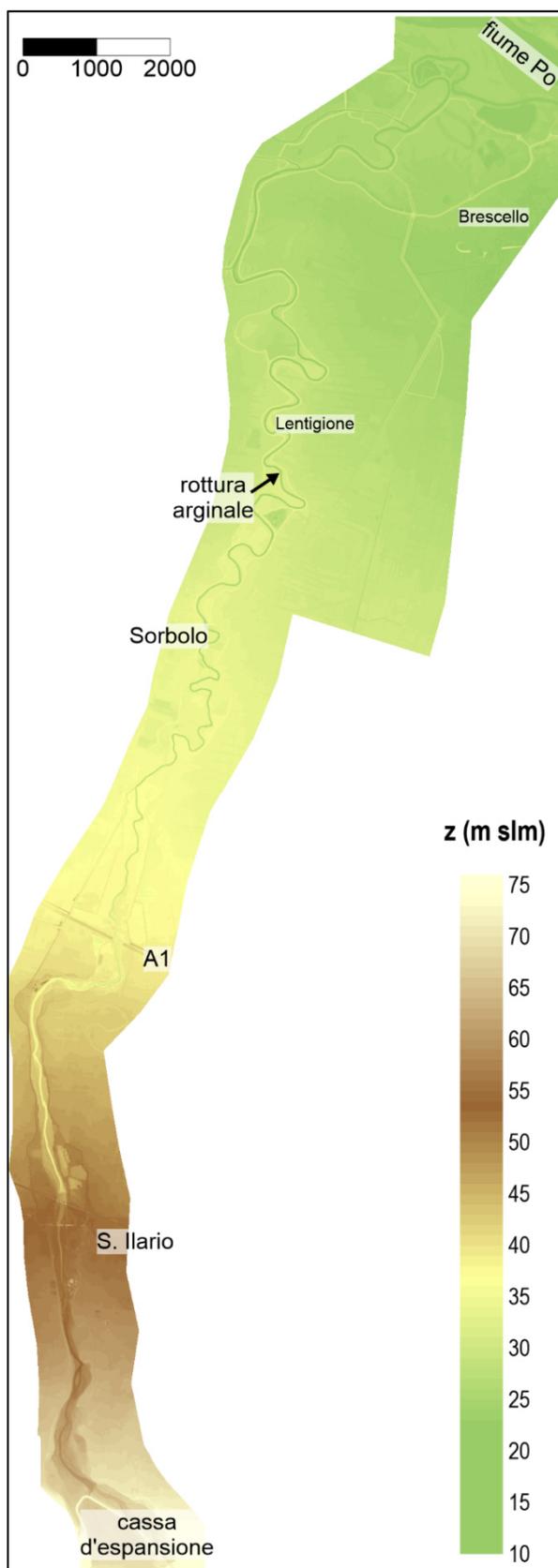


Figura 2-1. Batimetria per le simulazioni bidimensionali del fiume Enza a valle delle casse.

2.2.2 Scabrezza

Al fine di valutare la scabrezza da attribuire all'alveo nella modellazione 2D⁸, sono stati presi in considerazione gli eventi di piena del dicembre 2017 e del marzo 2018. Gli idrogrammi di portata da imporre come condizione al contorno di monte in uscita dalla cassa sono quelli ottenuti dalla procedura inversa con il modello HECRAS e riportati nel capitolo 1. Nel seguito si descrive nel dettaglio la procedura adottata.

2.3 Taratura (evento del dicembre 2017)

Sono state identificate tre diverse tipologie di fondo (alveo inciso, golene vegetate e golene non vegetate) a cui sono stati assegnati differenti valori di scabrezza.

Il primo tentativo è stato quello di attribuire un unico set di scabrezze lungo tutta l'asta del fiume per la medesima tipologia. In particolare, è stato assegnato all'alveo un coefficiente di Strickler (k_s) pari a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, mentre per le golene sono stati scelti i valori $k_s = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ e $k_s = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per le aree golenali vegetate e non vegetate, rispettivamente. Nel seguito, si fa riferimento a questo set di valori come "Scabrezza A".

La simulazione dell'evento del dicembre 2017 con la "Scabrezza A" restituisce livelli idrici massimi sovrastimati rispetto alla picchettatura nel tratto compreso tra le casse e l'attraversamento della ferrovia MI-BO, in linea con la picchettatura nel tratto tra l'autostrada A1 e Sorbolo, e fortemente sottostimati nel tratto vallivo, al punto da dare a malapena luogo ad un sormonto dell'argine destro in corrispondenza dell'apertura della breccia. Nella Figura 2-2 è riportato un dettaglio della mappa delle quote idriche a fine simulazione, che mostra come la tracimazione a Lentigione sia talmente modesta da non dare origine all'innescio di una breccia. L'andamento delle differenze tra massimi livelli simulati e

⁸ La scabrezza dipende in qualche misura dal modello adottato, oltre che dalle caratteristiche dell'alveo. Il modello 2D "vede" infatti tutta la reale altimetria, mentre il modello 1D "vede" solo le sezioni estratte. Per questa ragione è necessario procedere ad una nuova taratura della scabrezza.

picchettati lungo l'asta del fiume è riportata nella Figura 2-3.

Per migliorare la ricostruzione, si è proceduto a differenziare i valori della scabrezza lungo l'asta in tre tratti (casse-S. Ilario/ferrovia, S. Ilario/ferrovia-valle Sorbolo, valle Sorbolo-confluenza). Complessivamente dovevano essere quindi determinati 9 differenti valori di scabrezza; tuttavia, al fine di ridurre i gradi di libertà del problema, per tutti i tratti si è assunto che la scabrezza nelle golene vegetate fosse maggiore del 30% rispetto a quella delle golene non vegetate. Sulla base delle indicazioni della simulazione precedente, si sono poi ricercati valori di scabrezza inferiori nel primo tratto, dove i livelli massimi erano sovrastimati, e valori di scabrezza superiori nell'ultimo tratto, dove invece i livelli erano sottostimati. Con tentativi mirati, alla fine è stato ottenuto il seguente set di valori (nel seguito indicato come "Scabrezza B"):

- 1° tratto (valle cassa – S. Ilario/ferrovia): alveo $k_s = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene non vegetate $k_s = 17 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene vegetate $13 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- 2° tratto (ferrovia – valle Sorbolo): alveo $k_s = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene non vegetate $k_s = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene vegetate $11.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- 3° tratto (valle Sorbolo – golena Po): alveo $k_s = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene non vegetate $k_s = 11 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene vegetate $8.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Nella Figura 2-3 è possibile osservare il netto miglioramento nella ricostruzione dei massimi livelli simulati con la "Scabrezza B" rispetto alla "Scabrezza A". Si riducono le differenze nel tratto a monte di S. Ilario, mentre risultano ancora sottostimati i massimi livelli nel tratto immediatamente a monte dell'autostrada A1. Come già discusso nell'ambito della modellazione 1D, in cui si è ottenuto un risultato analogo, si ritiene che queste differenze siano in parte attribuibili a variazioni della geometria attuale dell'alveo rispetto al DTM del 2008, utilizzato come base per la modellazione. Nella zona di Sorbolo i livelli massimi sono ben riprodotti, mentre nel tratto vallivo permane una sottostima rispetto alla picchettatura. Va tuttavia notato che, utilizzando questo secondo set di scabrezze, in corrispondenza della rotta di Lentigione si ottiene un discreto sormonto, che innesca l'apertura di alcune brecce e l'allagamento dell'area

effettivamente alluvionata nel dicembre 2017 (Figura 2-4), che viene solo leggermente sottostimata. La modifica locale della batimetria causata dall'apertura delle breccie (simulata grazie al modello di erosione dell'argine) per sormonto è mostrata nella Figura 2-5. La portata che fuoriesce dalla breccia ha un colmo di circa $260 \text{ m}^3/\text{s}$ e il volume fuoriuscito è attorno a $4.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. In base alle osservazioni sull'area allagata, questo volume potrebbe essere leggermente sottostimato.

Infine, la Figura 2-6 mostra un confronto tra i livelli registrati all'idrometro di Sorbolo e quelli simulati con i due set di scabrezze. In entrambi i casi il colmo risulta leggermente ritardato rispetto alle osservazioni, anche se la "Scabrezza B" permette una migliore ricostruzione della fase di esaurimento. Nella Figura 2-7 sono invece riportati gli andamenti della portata a Sorbolo, che risultano quasi coincidenti. Il colmo è attorno a $416 \text{ m}^3/\text{s}$, di pochi m^3/s inferiore a quello ottenuto dalla modellazione 1D.

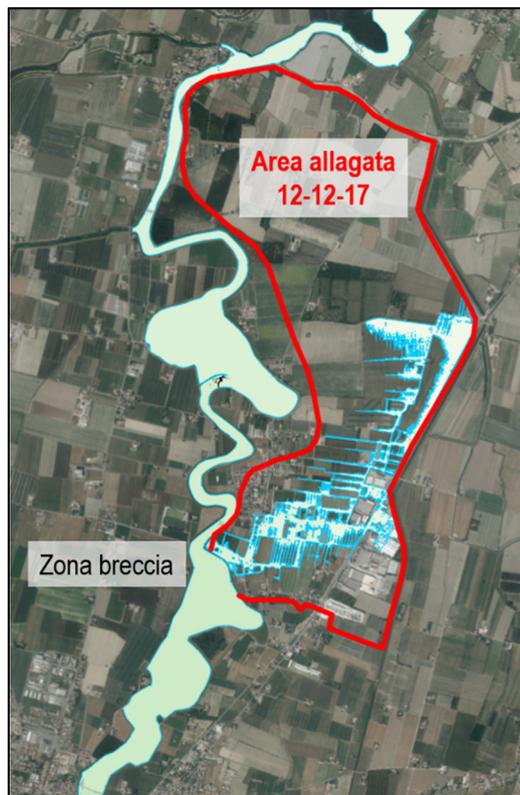


Figura 2-2. Confronto tra l'area allagata nella simulazione 2D con "Scabrezza A" (mappa) e area effettivamente allagata (contorno rosso) nell'evento del 12 dicembre 2017.

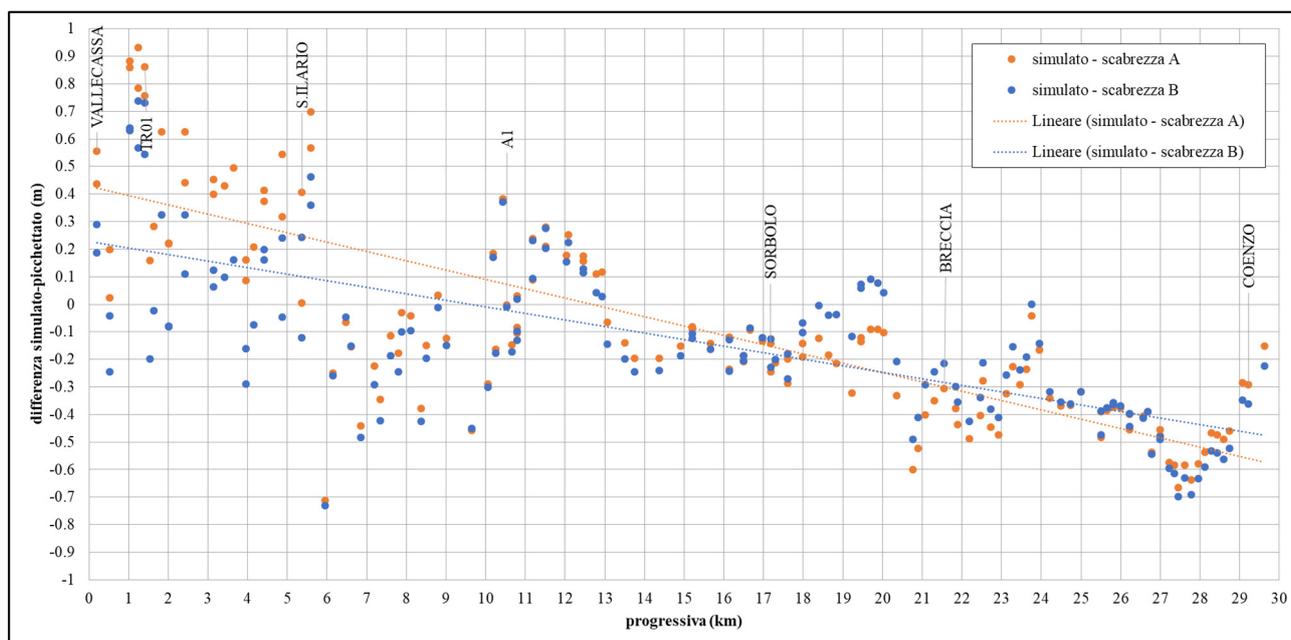


Figura 2-3. Differenza tra i massimi livelli simulati e picchettati lungo l'asta del fiume Enza per le simulazioni 2D con "Scabrezza A" e "Scabrezza B" nell'evento del dicembre 2017. Le linee tratteggiate identificano il trend "medio" delle differenze.

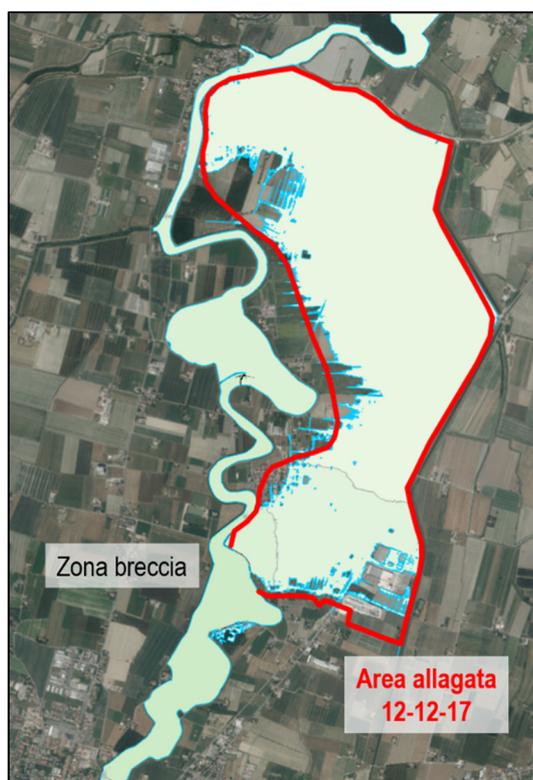


Figura 2-4. Confronto tra l'area allagata nella simulazione 2D con "Scabrezza B" (mappa) e area effettivamente allagata (contorno rosso) nell'evento del 12 dicembre 2017.

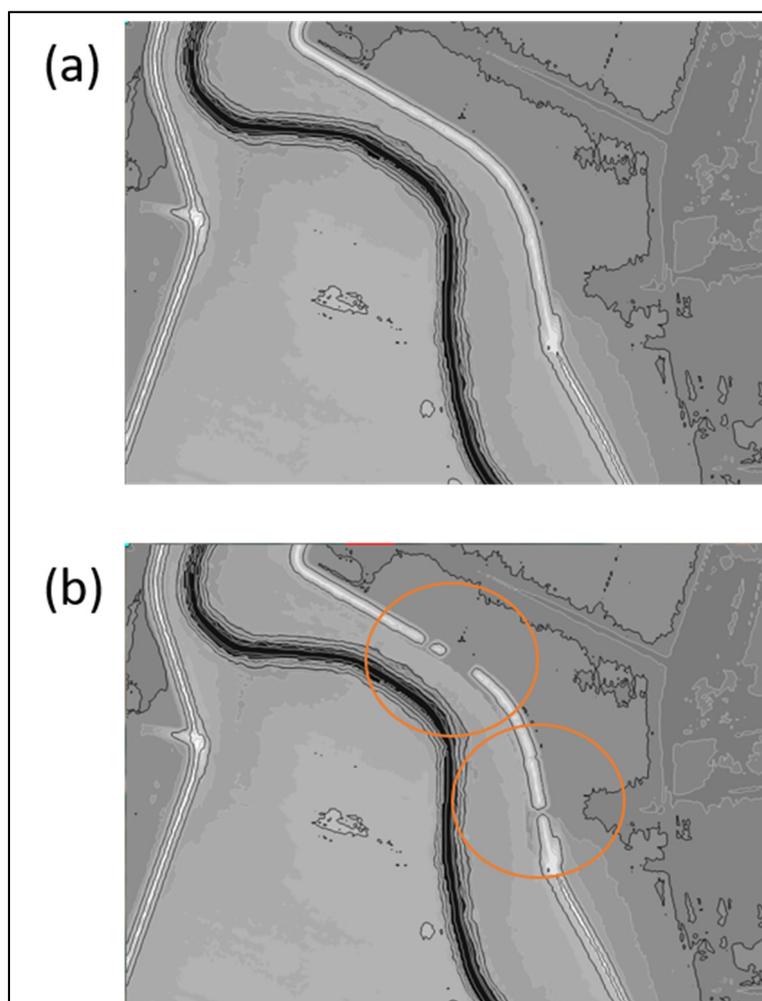


Figura 2-5. Dettaglio della batimetria nella zona della breccia: (a) iniziale, (b) dopo il sormonto, con le breccie che si sono aperte evidenziate con un cerchio.

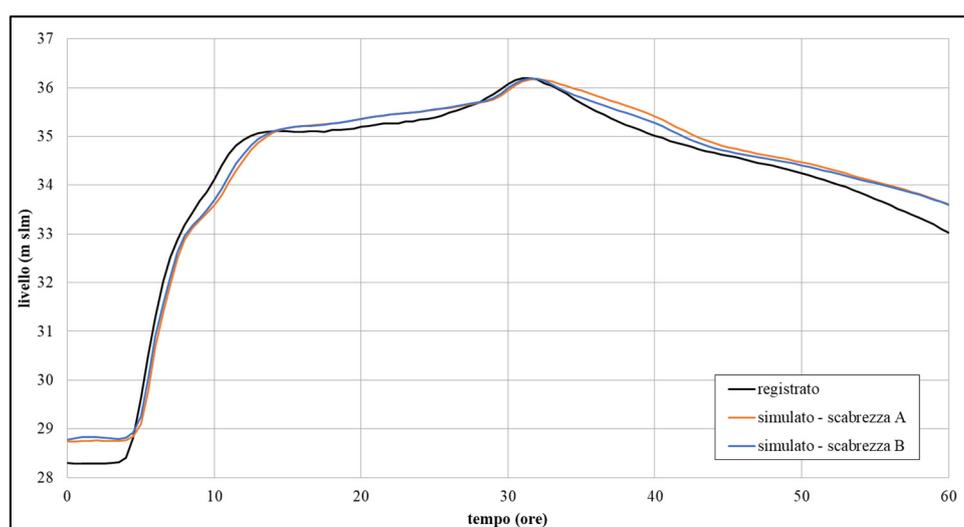


Figura 2-6. Confronto tra i livelli a Sorbolo registrati all'idrometro e simulati con il modello 2D per i due set di scabrezze considerati.

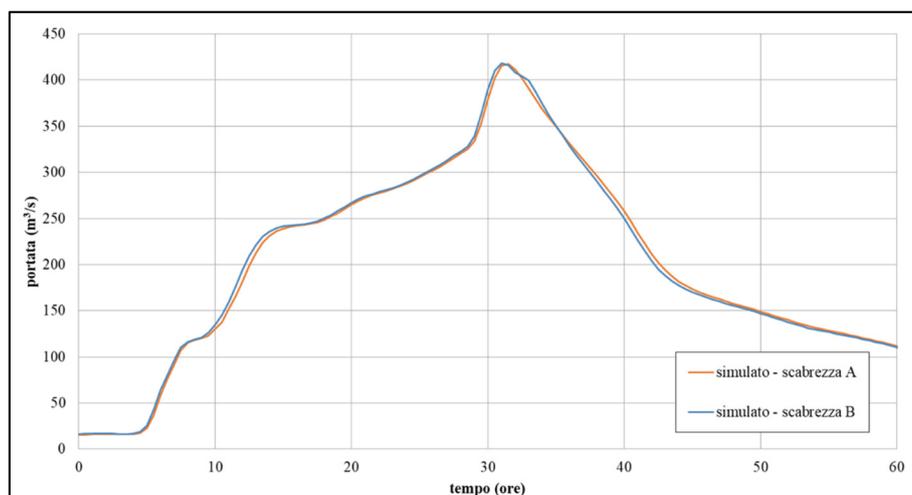


Figura 2-7. Andamento delle portate a Sorbolo ottenuto dal modello 2D per i due set di scabrezze considerati.

2.4 Verifica (evento del marzo 2018)

È stata infine effettuata una simulazione dell'evento di piena del marzo 2018 con il set di scabrezze "B" (differenziate in tre tratti), al fine di verificare la taratura della scabrezza del modello. I livelli e le portate simulati a Sorbolo sono confrontati con le misure nella Figura 2-8 e nella Figura 2-9. I colmi di livello sono riprodotti con differenze di pochi cm, anche se si osserva una leggera sfasatura. A S. Ilario, invece, i colmi sono fasati correttamente (Figura 2-10). In generale, i livelli bassi risultano sovrastimati rispetto alle misure, e neanche l'utilizzo di un coefficiente di scabrezza inferiore per l'alveo inciso permette di ottenere una migliore aderenza coi livelli registrati. Si ritiene quindi che questo effetto sia attribuibile al fatto che le portate basse (e i livelli corrispondenti) sono molto influenzate dalla geometria dell'alveo: la loro stima in fase di determinazione dell'onda di piena con la procedura inversa che sfrutta il modello 1D potrebbe non essere del tutto corretta (si tenga conto del fatto che l'alveo inciso è stato ricostruito sulla base di sezioni distanziate anche di 1-2 km in alcuni tratti). Viceversa, per portate alte non si risente dell'influenza di piccole differenze nella geometria dell'alveo, quindi i livelli alti risultano ben riprodotti. Per quanto riguarda la picchettatura, sono state valutate le differenze tra i livelli massimi simulati e osservati lungo le sponde sinistra e destra separatamente

(Figura 2-11 e Figura 2-12). Con l'esclusione di alcuni punti localizzati, non si evidenziano particolari sovrastime o sottostime dei livelli massimi.

Si ritiene dunque che il set di scabrezze così calibrato possa essere utilizzato nel seguito per valutare l'efficienza idraulica dell'asta fluviale.

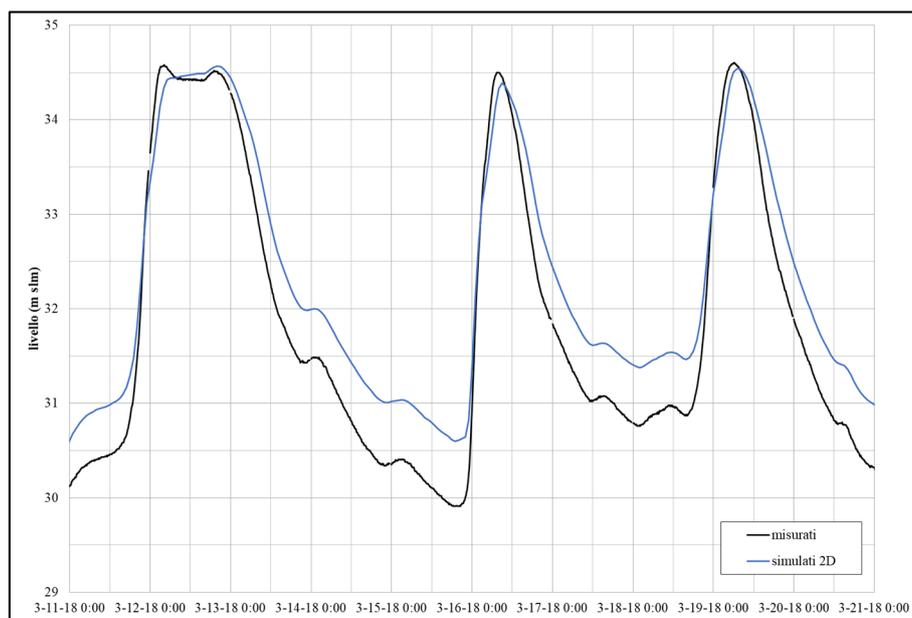


Figura 2-8. Andamento dei livelli a Sorbolo ottenuto dal modello 2D per l'evento del marzo 2018 e confronto con le registrazioni dell'idrometro.

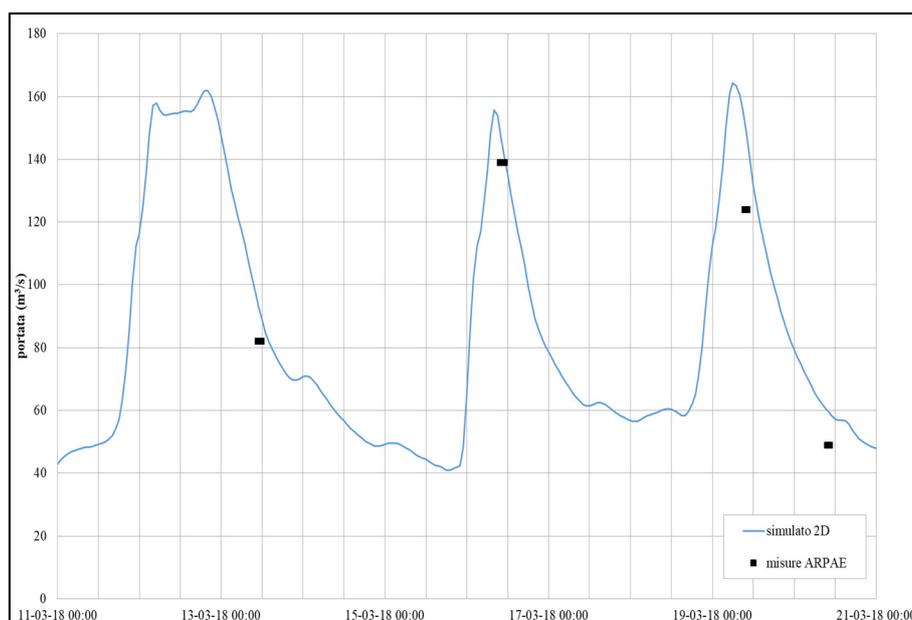


Figura 2-9. Andamento delle portate a Sorbolo ottenuto dal modello 2D per l'evento del marzo 2018 e confronto con le misure di ARPAE.

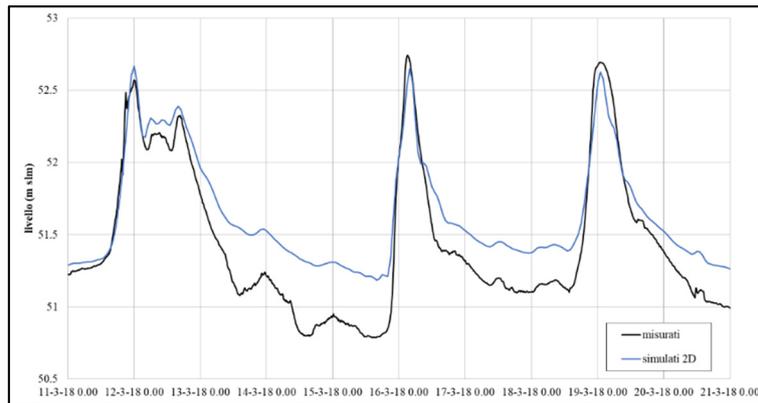


Figura 2-10. Andamento dei livelli a S. Ilario ottenuto dal modello 2D per l'evento del marzo 2018 e confronto con le registrazioni dell'idrometro (zero idrometrico assunto a 49.6 m s.l.m.).

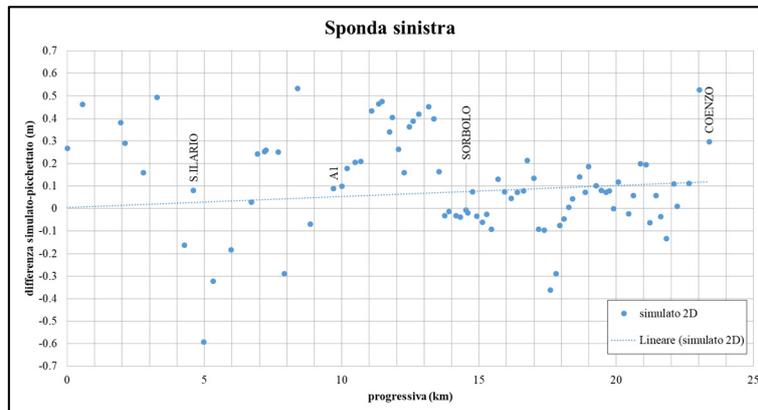


Figura 2-11. Differenza tra i massimi livelli simulati e picchettati lungo l'asta del fiume Enza in sponda sinistra per l'evento del marzo 2018. La linea tratteggiata identifica il trend "medio" delle differenze.

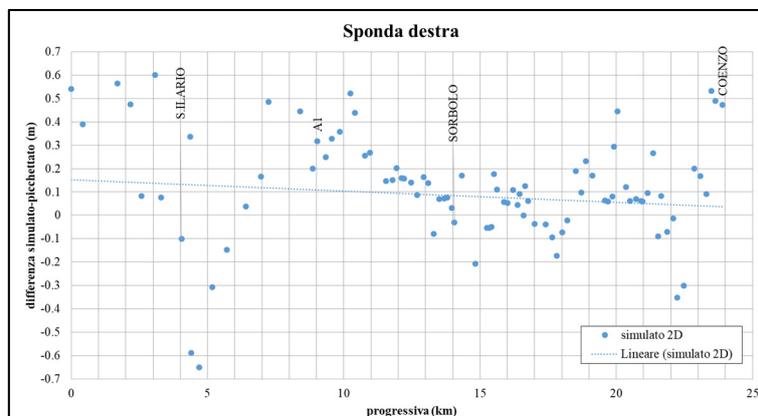


Figura 2-12. Differenza tra i massimi livelli simulati e picchettati lungo l'asta del fiume Enza in sponda destra per l'evento del marzo 2018. La linea tratteggiata identifica il trend "medio" delle differenze.

3 Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce d'espansione

3.1 Metodologia utilizzata

Per valutare l'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce è stata effettuata, con il modello 2D descritto nel capitolo 2, una serie di simulazioni in condizioni di moto permanente con valori prefissati di portata, nell'ipotesi che le arginature fossero insormontabili (in questo modo si possono ottenere anche franchi negativi).

I valori di portata considerati sono compresi tra 200 e 900 m³/s, con step di 50 m³/s. Per ciascuna simulazione sono stati estratti i livelli raggiunti a regime in 162 punti lungo l'asta, distanti tra loro 150-200 m. La posizione dei punti è rappresentata nella Figura 3-1 e le loro coordinate sono riportate nella Tabella 3.1 (ordinati da valle verso monte). L'analisi parte dalla traversa TR00: a monte, non è individuabile un'arginatura né un altro rilevato che possa fungere da contenimento (es. strada).

Di ogni punto era noto il valore del contenimento arginale in sinistra e in destra, sulla base del rilievo a terra effettuato da AIPo nel 2018 (quote riportate nella Tabella 3.1). È stato quindi possibile calcolare il franco (sinistro e destro) corrispondente a ciascun punto per ogni valore di portata. Infine, tra i valori ottenuti è stata effettuata un'interpolazione lineare per individuare la portata corrispondente a franchi prefissati di 1 m, 70 cm, 30 cm, e 0 cm.

A valle è stato considerato un livello costante (medio-basso) in Po, pari a 22 m s.l.m. A questa quota, le golene di Po non dovrebbero essere inondate. Con simulazioni successive è stata valutata l'influenza della condizione al contorno di valle sul tratto terminale ripetendo l'analisi per livelli di Po superiori, pari a 25 m s.l.m. (in cui dovrebbero cominciare a allagarsi le golene) e a 29 m s.l.m. (corrispondente a piena di Po con franco locale di 1-1.5 m).

Infine, è stata ripetuta l'analisi considerando una scabrezza incrementata del 15% nell'intera asta rispetto ai valori calibrati, in modo da disporre di una

valutazione cautelativa della portata compatibile.

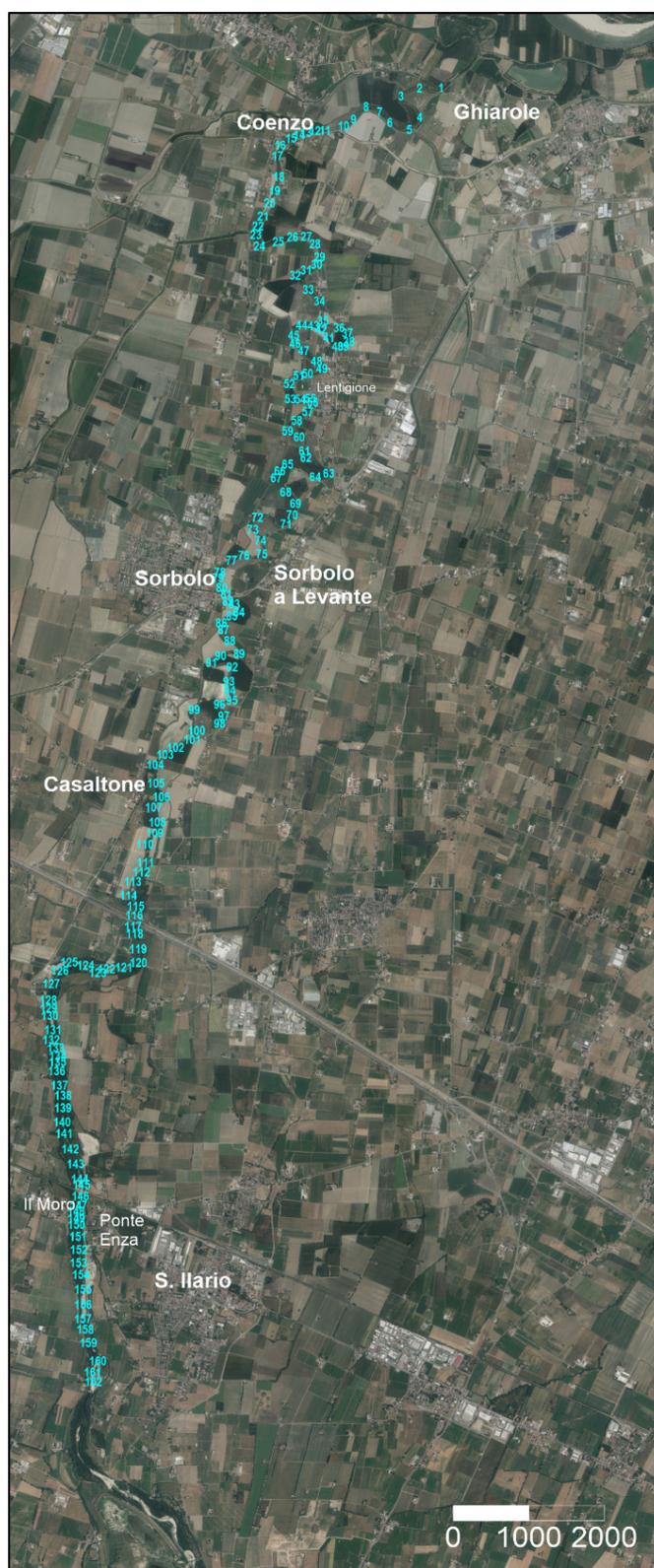


Figura 3-1. Posizione dei punti lungo l'asta dell'Enza nei quali è stata valutata la portata compatibile.

Tabella 3.1. Posizione dei punti lungo l'asta dell'Enza nei quali è stata valutata la portata compatibile e quote di contenimento in sinistra e in destra.

COORDINATE PUNTI (UTM32 ED50)		PUNTO	Quote contenimento (m s.l.m.)	
E	N		SINISTRA	DESTRA
617815.98	4973649.49	1		29.75
617532.05	4973644.35	2		29.81
617285.37	4973539.00	3		29.88
617532.05	4973255.07	4		29.78
617394.58	4973088.05	5		29.77
617138.91	4973185.69	6		29.88
617005.30	4973325.73	7		29.89
616822.86	4973397.68	8		29.86
616658.41	4973228.09	9		29.81
616524.79	4973139.44	10		29.85
616281.97	4973080.34	11		30.74
616145.79	4973075.20	12		30.65
616027.59	4973053.36	13	30.9	30.73
615938.94	4973021.24	14	30.74	30.93
615828.45	4972973.71	15	30.87	31.13
615685.84	4972883.77	16	30.69	31.24
615648.59	4972738.60	17	30.79	30.91
615667.86	4972463.66	18	31.18	31
615611.33	4972272.23	19	31.03	31.11
615545.80	4972109.06	20	31.29	31.03
615461.01	4971934.33	21	31.44	31.3
615391.63	4971800.72	22	31.37	31.47
615363.37	4971683.81	23	30.97	31.67
615409.62	4971533.49	24	31.39	31.8
615660.15	4971591.30	25	31.69	32.39
615850.29	4971654.26	26	31.99	32.53
616034.01	4971661.96	27	32.09	32.31
616145.79	4971561.75	28	31.97	32.25
616207.46	4971389.59	29	32.38	32.33
616170.20	4971286.81	30	32.15	32.25
616031.45	4971212.30	31	32.44	32.56
615884.98	4971142.92	32	32.45	32.56
616058.43	4970952.78	33	32.53	32.7
616206.17	4970799.89	34	33.03	32.64
616253.71	4970535.23	35		32.79
616464.41	4970441.44	36		32.89
616576.18	4970370.78	37		33.05
616598.03	4970256.43	38		32.93
616520.94	4970193.48	39		32.79
616446.42	4970190.91	40		32.76
616330.80	4970307.82	41		32.83
616229.30	4970419.60	42		32.95
616126.52	4970467.13	43		33.08
615971.06	4970476.13	44		33.19
615864.43	4970339.94	45	33.19	33.29
615882.41	4970229.45	46	33.39	33.19
615998.04	4970134.38	47	33.75	33.36
616167.63	4969994.34	48	34.01	33.67
616239.58	4969896.70	49	34.09	33.63
616049.43	4969829.89	50	34.19	34.02
615931.23	4969801.63	51	34.38	34.08
615806.61	4969691.14	52	34.54	34.04

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casse d'espansione

COORDINATE PUNTI (UTM32 ED50)		PUNTO	Quote contenimento (m s.l.m.)	
E	N		SINISTRA	DESTRA
615819.46	4969489.43	53	34.47	34.38
615953.07	4969485.58	54	34.84	34.35
616085.41	4969494.57	55	34.95	34.51
616117.52	4969445.75	56	34.89	34.63
616050.72	4969317.27	57	35.18	34.64
615905.54	4969201.64	58	35.35	34.79
615783.49	4969060.32	59	35.44	35.09
615937.66	4968980.66	60	35.55	35.14
616007.03	4968794.37	61	35.39	35.08
616027.59	4968705.72	62	35.62	35.09
616329.51	4968495.02	63	35.69	35.29
616150.93	4968447.49	64	35.71	35.02
615783.49	4968615.79	65	35.61	35.34
615680.71	4968527.14	66	35.75	35.34
615633.17	4968433.35	67	35.73	35.38
615760.36	4968245.78	68	35.27	35.57
615888.84	4968091.61	69	35.62	35.6
615845.15	4967938.72	70	35.78	35.56
615765.50	4967816.67	71	35.4	35.69
615386.49	4967905.32	72	35.78	35.66
615326.11	4967743.44	73	35.88	35.9
615426.32	4967598.26	74	36.21	35.95
615441.74	4967417.11	75	36.43	36.16
615205.34	4967399.12	76	36.48	36.53
615042.18	4967332.31	77	36.71	36.79
614889.29	4967173.00	78	36.97	37.04
614866.17	4967099.77	79	36.99	37
614913.70	4966968.73	80	37.12	36.96
614972.80	4966885.22	81	36.9	36.9
614994.64	4966783.72	82	37.3	37.05
615080.72	4966747.75	83	37.22	37.46
615141.10	4966637.26	84	37.15	37.33
615047.32	4966591.00	85	37.39	37.41
614907.28	4966497.22	86	37.22	37.45
614936.83	4966406.00	87	37.49	37.57
615019.05	4966259.54	88	37.28	37.56
615142.39	4966083.52	89	37.46	37.76
614899.57	4966059.11	90	37.33	37.85
614777.52	4965965.33	91	37.38	37.73
615052.46	4965907.51	92	37.69	37.71
615008.77	4965714.80	93	37.55	37.29
615020.34	4965594.03	94	37.52	37.61
615049.89	4965460.41	95	37.74	37.94
614884.15	4965407.74	96	37.75	37.82
614941.97	4965249.71	97	37.73	37.72
614885.44	4965150.79	98	37.5	37.57
614550.11	4965335.79	99	37.42	37.79
614579.66	4965057.00	100	37.6	37.93
614523.13	4964934.95	101	37.86	38.38
614303.44	4964829.59	102	37.96	38.4
614163.40	4964735.81	103	37.98	38.51
614032.35	4964600.91	104	38.25	38.62
614041.35	4964351.66	105	38.36	38.62
614112.01	4964170.51	106	38.41	38.9
614011.80	4964033.04	107	38.59	38.97

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casse d'espansione

COORDINATE PUNTI (UTM32 ED50)		PUNTO	Quote contenimento (m s.l.m.)	
E	N		SINISTRA	DESTRA
614059.33	4963832.62	108	38.67	39.13
614025.93	4963690.01	109	38.7	39.31
613896.17	4963535.84	110	39.06	39.46
613902.59	4963293.02	111	39.32	39.4
613848.63	4963165.83	112	39.28	39.56
613735.57	4963037.35	113	39.63	39.69
613676.47	4962852.34	114	39.62	39.86
613772.83	4962709.74	115	39.53	39.89
613754.85	4962588.97	116	40.16	40.13
613739.43	4962441.22	117	40.35	40.33
613758.70	4962342.29	118	41.25	40.61
613804.95	4962138.02	119	41.86	40.92
613810.09	4961954.29	120	41.02	41.43
613617.38	4961891.34	121	41.47	41.91
613386.12	4961869.50	122	42.41	43.01
613270.49	4961820.68	123	43.18	43.03
613111.18	4961918.32	124	43.18	43.52
612891.48	4961960.72	125	43.9	44.04
612770.72	4961848.94	126	44.64	44.26
612656.37	4961672.93	127	45.21	44.69
612617.83	4961454.52	128	46.16	45.07
612622.97	4961342.75	129	46.6	46.16
612635.82	4961246.39	130	46.74	46.47
612679.50	4961056.25	131	47.43	47.01
612655.09	4960922.63	132	47.86	47.51
612716.76	4960815.99	133	48.16	47.65
612742.45	4960709.36	134	48.46	48.4
612738.60	4960627.13	135	48.57	48.77
612727.03	4960506.37	136	48.75	49.21
612764.29	4960314.94	137	49.67	49.47
612813.11	4960180.04	138	49.77	49.74
612810.54	4960013.02	139	50.3	48.89
612798.98	4959824.16	140	50.65	50.35
612825.96	4959671.27	141	51.37	50.78
612906.90	4959463.14	142	51.68	52.1
612977.56	4959265.29	143	52.42	52.46
613034.09	4959062.29	144	52.55	53.87
613055.93	4958983.92	145	52.95	54.15
613041.80	4958833.61	146	54.41	56.28
613018.68	4958710.27	147	54.17	56.4
612982.70	4958631.90	148	54.43	57.16
612986.56	4958539.39	149	55.73	55.5
612989.13	4958452.03	150	55.97	55.38
613009.68	4958292.72	151	56.98	56.36
613019.96	4958117.99	152	57.36	57.3
613016.11	4957941.98	153	58.1	58.2
613048.23	4957785.24	154	58.69	58.83
613075.21	4957587.39	155	59.61	59.36
613077.78	4957384.39	156	60.13	60.33
613075.21	4957194.25	157	60.67	61.23
613104.76	4957051.64	158	61.17	61.39
613147.15	4956873.06	159	61.94	62.09
613273.06	4956631.52	160	62.89	63.85
613203.68	4956478.63	161	63.3	64.21
613213.96	4956352.73	162	63.98	64.03

3.2 Portata compatibile con franco prefissato

Nella Tabella 3.2 sono sintetizzati i valori della portata compatibile con franchi fissati di 1 m, 70 cm, 30 cm e franco zero, ottenuti per interpolazione. Le simulazioni sono state effettuate con livello a valle pari a 22 m s.l.m. e mantenendo il set di scabrezze calibrato.

Tabella 3.2. Portata compatibile con franchi prefissati, ottenuta con scabrezza calibrata e livello in Po pari a 22 m s.l.m. I valori in sinistra per i punti 1-12 e 35-44 non sono riportati a causa dell'assenza di una quota di contenimento. Altrove, i valori mancanti indicano portata compatibile superiore a 900 m³/s.

PUNTO	PORTATA COMPATIBILE (m ³ /s)							
	SPONDA SINISTRA				SPONDA DESTRA			
	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0
1								
2								
3					837			
4					707	832		
5					642	769		
6					590	725		
7					521	655	890	
8					461	556	804	
9					385	458	637	859
10					369	431	579	803
11					619	851		
12					512	696		
13	613	809			523	696		
14	467	569	761		524	657	856	
15	475	573	744	878	557	682	860	
16	405	470	589	699	538	643	794	
17	418	484	607	715	444	515	649	759
18	446	507	612	697	413	470	563	646
19	393	444	526	601	405	459	545	622
20	424	479	569	645	383	431	507	579
21	426	479	566	638	402	454	533	604
22	387	433	501	564	401	449	522	586
23	356	395	458	511	422	471	547	612
24	368	408	472	526	425	473	547	609
25	379	421	484	538	484	538	618	682
26	394	437	500	556	475	526	603	664
27	381	421	481	532	410	453	517	572
28	348	384	438	482	382	421	479	528
29	378	416	472	519	372	409	465	510
30	341	376	427	470	352	388	441	484
31	359	395	447	490	373	410	464	508
32	344	379	430	471	356	392	444	487
33	346	382	434	476	366	403	457	500
34	404	445	503	551	357	393	446	489
35					367	405	461	506
36					370	410	469	517
37					389	432	493	543
38					371	413	474	522
39					351	392	451	498
40					347	387	446	493
41					352	394	455	503
42					365	409	472	522

*Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce
d'espansione*

PUNTO	PORTATA COMPATIBILE (m ³ /s)							
	SPONDA SINISTRA				SPONDA DESTRA			
	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0
43					379	426	491	542
44					372	422	494	551
45	346	394	467	526	362	411	487	546
46	357	404	476	533	329	372	439	495
47	379	427	495	550	326	366	428	480
48	379	424	489	541	334	374	434	482
49	365	407	469	518	322	359	415	461
50	370	413	477	527	347	388	449	498
51	381	424	486	535	342	381	439	486
52	374	415	474	522	330	366	421	465
53	345	383	438	482	335	371	425	469
54	378	419	477	523	319	354	406	448
55	380	419	476	521	327	362	414	455
56	366	404	460	504	335	371	423	466
57	390	430	488	534	325	359	411	453
58	383	421	476	520	318	351	400	440
59	369	405	458	499	329	363	412	451
60	374	411	464	506	327	361	410	449
61	340	376	426	466	314	347	395	434
62	374	411	465	507	325	359	409	448
63	379	417	471	513	331	366	417	457
64	381	419	473	516	301	334	382	420
65	365	403	457	499	333	369	420	461
66	377	417	472	516	318	353	404	445
67	369	408	464	509	327	363	415	457
68	340	378	434	480	333	371	426	471
69	330	369	425	471	328	366	422	468
70	348	389	447	496	320	359	415	460
71	328	369	428	476	323	365	423	471
72	333	377	439	489	327	371	432	482
73	315	360	422	472	318	363	426	476
74	353	401	468	521	314	360	424	475
75	378	426	494	548	362	409	477	530
76	363	411	479	533	371	419	488	542
77	377	426	496	550	389	439	510	565
78	389	440	513	569	401	453	526	582
79	383	435	508	564	385	437	510	566
80	392	445	521	578	365	417	490	548
81	344	396	469	526	344	396	469	526
82	390	440	513	568	349	398	467	522
83	371	421	491	546	410	462	535	589
84	354	403	472	526	383	433	504	559
85	389	439	511	566	392	443	515	570
86	374	424	495	550	395	446	519	574
87	395	446	519	575	408	460	534	590
88	354	404	474	529	400	452	526	581
89	374	425	498	554	425	479	554	610
90	347	398	470	526	437	492	567	624
91	350	402	474	531	411	465	541	597
92	397	452	528	585	401	455	532	589
93	367	421	496	554	360	413	488	546
94	392	447	525	583	374	429	505	563
95	392	447	525	584	429	486	564	622
96	388	444	523	581	401	458	536	595
97	379	436	514	574	377	434	512	572
98	331	387	464	524	382	439	518	578
99	362	421	502	564	368	427	509	570
100	313	374	456	518	380	441	525	587
101	350	413	499	563	460	524	608	669
102	332	399	488	555	430	497	586	650
103	312	382	475	544	435	505	596	661
104	320	391	488	561	407	480	577	647

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce d'espansione

PUNTO	PORTATA COMPATIBILE (m ³ /s)							
	SPONDA SINISTRA				SPONDA DESTRA			
	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0
105	311	379	476	552	370	442	542	616
106	259	329	430	510	376	454	561	639
107	269	341	447	530	362	441	553	634
108	238	311	419	505	352	436	551	636
109	219	288	393	479	368	452	570	656
110	247	325	442	535	353	442	566	656
111	286	368	489	583	307	391	514	608
112	238	315	434	531	310	396	524	622
113	299	386	513	612	316	404	533	632
114	257	335	457	557	319	406	537	638
115	217	287	400	498	302	388	518	620
116	328	415	545	648	320	405	535	637
117	313	375	472	556	309	371	467	550
118	446	532	658	762	304	364	463	550
119	591	690	840		337	407	518	611
120	335	408	522	616	438	525	653	759
121	381	465	594	702	508	608	757	887
122	621	730			857			
123	871				805			
124	776							
125	806				867			
126					852			
127					890			
128								
129								
130								
131								
132								
133								
134								
135								
136								
137								
138								
139								
140								
141								
142								
143								
144								
145								
146								
147	590	721						
148	582	709						
149					826			
150	871				532	682		
151					653	835		
152								
153								
154								
155								
156								
157								
158								
159								
160								
161								
162								

3.3 Franchi per prefissati valori di portata

Nella Tabella 3.3 e nella Tabella 3.4 sono sintetizzati i valori del franco (sinistro e destro) che si ottengono per prefissati valori di portata compresi tra 200 e 900 m³/s. Le simulazioni in moto permanente sono state effettuate con livello a valle pari a 22 m s.l.m. e mantenendo il set di scabrezze calibrato. Sono evidenziati in rosso i franchi negativi (in viola quelli inferiori a -20 cm), in arancione quelli compresi tra 0 e 30 cm, in giallo quelli tra 30 e 70 cm, e in verde i valori tra 70 cm e 1 m. Sono mantenuti in bianco i franchi superiori a 1 m.

Tabella 3.3. Franco sinistro per prefissate portate, ottenuto con scabrezza calibrata e livello in Po pari a 22 m s.l.m. I valori in sinistra per i punti 1-12 e 35-44 non sono riportati a causa dell'assenza di una quota di contenimento.

PUNTO	FRANCO SINISTRO (m)														
	Portata (m ³ /s)														
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13	3.30	2.75	2.27	1.89	1.59	1.40	1.22	1.11	1.02	0.94	0.86	0.79	0.71	0.64	0.56
14	3.02	2.47	1.98	1.59	1.28	1.07	0.87	0.74	0.63	0.52	0.42	0.32	0.22	0.12	0.02
15	3.09	2.53	2.04	1.64	1.32	1.10	0.90	0.76	0.63	0.51	0.40	0.29	0.17	0.06	-0.05
16	2.82	2.26	1.76	1.35	1.02	0.79	0.57	0.41	0.27	0.13	0.00	-0.13	-0.27	-0.40	-0.53
17	2.88	2.32	1.82	1.42	1.09	0.85	0.63	0.47	0.32	0.18	0.04	-0.10	-0.23	-0.37	-0.50
18	3.12	2.56	2.04	1.61	1.25	0.98	0.73	0.53	0.34	0.16	-0.01	-0.18	-0.35	-0.52	-0.69
19	2.82	2.25	1.74	1.30	0.95	0.67	0.41	0.20	0.00	-0.18	-0.37	-0.55	-0.72	-0.90	-1.07
20	3.02	2.45	1.93	1.50	1.14	0.85	0.59	0.38	0.17	-0.02	-0.21	-0.39	-0.57	-0.75	-0.93
21	3.06	2.49	1.96	1.52	1.15	0.86	0.59	0.37	0.16	-0.05	-0.24	-0.44	-0.62	-0.81	-0.99
22	2.85	2.27	1.73	1.28	0.90	0.59	0.31	0.06	-0.17	-0.38	-0.60	-0.80	-1.01	-1.21	-1.41
23	2.40	1.82	1.28	0.82	0.44	0.13	-0.17	-0.41	-0.65	-0.87	-1.09	-1.30	-1.51	-1.71	-1.91
24	2.72	2.14	1.60	1.14	0.75	0.43	0.13	-0.12	-0.37	-0.60	-0.82	-1.04	-1.26	-1.47	-1.68
25	2.79	2.22	1.68	1.23	0.84	0.51	0.20	-0.06	-0.31	-0.55	-0.78	-1.01	-1.23	-1.44	-1.66
26	2.91	2.34	1.81	1.35	0.95	0.61	0.30	0.03	-0.23	-0.47	-0.71	-0.94	-1.17	-1.39	-1.61
27	2.83	2.26	1.72	1.25	0.85	0.50	0.18	-0.10	-0.37	-0.63	-0.88	-1.11	-1.35	-1.58	-1.80
28	2.57	2.00	1.45	0.98	0.57	0.21	-0.12	-0.41	-0.69	-0.95	-1.21	-1.46	-1.71	-1.95	-2.18
29	2.83	2.26	1.71	1.23	0.82	0.45	0.11	-0.19	-0.48	-0.75	-1.02	-1.28	-1.53	-1.78	-2.03
30	2.52	1.94	1.40	0.92	0.50	0.13	-0.21	-0.51	-0.80	-1.08	-1.35	-1.61	-1.86	-2.11	-2.36
31	2.69	2.11	1.56	1.07	0.66	0.28	-0.07	-0.38	-0.68	-0.96	-1.24	-1.51	-1.78	-2.03	-2.29
32	2.53	1.96	1.42	0.94	0.52	0.15	-0.20	-0.51	-0.81	-1.10	-1.38	-1.65	-1.92	-2.18	-2.44
33	2.52	1.97	1.44	0.97	0.55	0.18	-0.17	-0.48	-0.78	-1.07	-1.35	-1.62	-1.89	-2.15	-2.40
34	2.97	2.44	1.91	1.44	1.03	0.66	0.32	0.00	-0.30	-0.58	-0.87	-1.14	-1.40	-1.66	-1.92
35															
36															
37															
38															
39															

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce d'espansione

PUNTO	FRANCO SINISTRO (m)														
	Portata (m³/s)														
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
40															
41															
42															
43															
44															
45	2.15	1.75	1.34	0.97	0.66	0.39	0.13	-0.12	-0.37	-0.63	-0.88	-1.14	-1.39	-1.64	-1.88
46	2.26	1.84	1.42	1.04	0.72	0.44	0.17	-0.09	-0.35	-0.61	-0.87	-1.13	-1.38	-1.63	-1.88
47	2.47	2.03	1.59	1.20	0.86	0.56	0.27	0.00	-0.28	-0.55	-0.82	-1.08	-1.35	-1.60	-1.86
48	2.54	2.08	1.62	1.21	0.85	0.54	0.23	-0.05	-0.34	-0.62	-0.91	-1.18	-1.45	-1.72	-1.99
49	2.49	2.01	1.54	1.11	0.75	0.42	0.10	-0.19	-0.49	-0.78	-1.07	-1.35	-1.63	-1.91	-2.18
50	2.49	2.01	1.55	1.14	0.78	0.46	0.16	-0.13	-0.42	-0.71	-0.99	-1.26	-1.54	-1.81	-2.07
51	2.60	2.12	1.65	1.23	0.86	0.53	0.21	-0.09	-0.39	-0.68	-0.97	-1.25	-1.53	-1.81	-2.08
52	2.60	2.10	1.62	1.18	0.80	0.46	0.13	-0.18	-0.48	-0.78	-1.08	-1.37	-1.65	-1.94	-2.21
53	2.40	1.89	1.40	0.96	0.57	0.22	-0.12	-0.44	-0.75	-1.05	-1.35	-1.65	-1.94	-2.23	-2.51
54	2.66	2.15	1.66	1.22	0.83	0.48	0.15	-0.17	-0.48	-0.79	-1.09	-1.38	-1.67	-1.95	-2.23
55	2.70	2.18	1.68	1.23	0.84	0.48	0.14	-0.19	-0.50	-0.82	-1.12	-1.42	-1.71	-2.00	-2.29
56	2.59	2.07	1.57	1.12	0.73	0.37	0.03	-0.30	-0.62	-0.93	-1.23	-1.53	-1.83	-2.12	-2.40
57	2.78	2.26	1.76	1.31	0.92	0.56	0.22	-0.10	-0.42	-0.73	-1.03	-1.33	-1.62	-1.91	-2.19
58	2.77	2.23	1.72	1.26	0.86	0.49	0.13	-0.20	-0.53	-0.85	-1.17	-1.48	-1.78	-2.08	-2.37
59	2.69	2.15	1.63	1.16	0.74	0.36	0.00	-0.35	-0.69	-1.02	-1.35	-1.66	-1.98	-2.29	-2.59
60	2.72	2.18	1.66	1.20	0.79	0.40	0.04	-0.30	-0.64	-0.97	-1.30	-1.62	-1.93	-2.24	-2.54
61	2.48	1.95	1.44	0.98	0.57	0.19	-0.17	-0.52	-0.86	-1.19	-1.51	-1.83	-2.14	-2.45	-2.75
62	2.68	2.16	1.65	1.19	0.79	0.40	0.05	-0.30	-0.64	-0.97	-1.29	-1.61	-1.92	-2.23	-2.53
63	2.64	2.16	1.68	1.23	0.83	0.45	0.09	-0.25	-0.59	-0.92	-1.24	-1.56	-1.87	-2.18	-2.48
64	2.64	2.17	1.70	1.25	0.85	0.47	0.11	-0.24	-0.57	-0.90	-1.22	-1.54	-1.85	-2.16	-2.46
65	2.47	2.03	1.56	1.12	0.72	0.35	-0.01	-0.35	-0.68	-1.01	-1.33	-1.65	-1.96	-2.26	-2.56
66	2.53	2.10	1.65	1.21	0.82	0.46	0.11	-0.23	-0.56	-0.88	-1.20	-1.52	-1.83	-2.13	-2.44
67	2.46	2.03	1.58	1.15	0.76	0.40	0.06	-0.27	-0.60	-0.92	-1.24	-1.56	-1.87	-2.17	-2.47
68	1.84	1.41	0.97	0.56	0.18	-0.17	-0.48	-0.80	-1.11	-1.43	-1.74	-2.05	-2.35	-2.66	-2.95
69	2.06	1.66	1.24	0.84	0.47	0.13	-0.18	-0.48	-0.79	-1.10	-1.41	-1.72	-2.02	-2.32	-2.62
70	2.19	1.80	1.38	0.98	0.62	0.28	-0.02	-0.33	-0.64	-0.95	-1.26	-1.57	-1.87	-2.17	-2.47
71	1.61	1.26	0.89	0.51	0.16	-0.17	-0.47	-0.77	-1.07	-1.38	-1.69	-1.99	-2.29	-2.59	-2.88
72	1.77	1.46	1.12	0.77	0.44	0.12	-0.17	-0.46	-0.76	-1.06	-1.36	-1.66	-1.95	-2.25	-2.54
73	1.75	1.43	1.10	0.76	0.44	0.13	-0.16	-0.44	-0.74	-1.03	-1.33	-1.62	-1.92	-2.21	-2.50
74	1.98	1.67	1.35	1.02	0.70	0.40	0.12	-0.16	-0.45	-0.74	-1.03	-1.33	-1.62	-1.91	-2.19
75	2.15	1.84	1.51	1.18	0.86	0.55	0.27	-0.01	-0.30	-0.59	-0.88	-1.17	-1.46	-1.75	-2.04
76	2.07	1.75	1.41	1.08	0.77	0.47	0.18	-0.09	-0.38	-0.66	-0.95	-1.23	-1.52	-1.80	-2.08
77	2.16	1.83	1.50	1.17	0.85	0.56	0.28	0.00	-0.28	-0.56	-0.84	-1.13	-1.41	-1.69	-1.97
78	2.22	1.89	1.56	1.24	0.94	0.64	0.37	0.10	-0.17	-0.45	-0.73	-1.01	-1.29	-1.56	-1.84
79	2.16	1.84	1.52	1.20	0.90	0.61	0.34	0.08	-0.19	-0.47	-0.75	-1.02	-1.30	-1.58	-1.85
80	2.20	1.88	1.56	1.25	0.96	0.67	0.41	0.15	-0.12	-0.39	-0.66	-0.93	-1.21	-1.48	-1.75
81	1.91	1.58	1.27	0.96	0.68	0.40	0.14	-0.12	-0.38	-0.65	-0.92	-1.19	-1.46	-1.73	-2.00
82	2.24	1.90	1.57	1.24	0.94	0.64	0.37	0.10	-0.17	-0.45	-0.72	-1.00	-1.28	-1.55	-1.82
83	2.14	1.79	1.46	1.13	0.82	0.53	0.25	-0.02	-0.30	-0.57	-0.85	-1.13	-1.40	-1.68	-1.95
84	2.03	1.68	1.35	1.02	0.72	0.42	0.14	-0.13	-0.40	-0.68	-0.96	-1.23	-1.51	-1.78	-2.06
85	2.24	1.90	1.57	1.24	0.93	0.64	0.36	0.09	-0.19	-0.46	-0.74	-1.02	-1.29	-1.57	-1.84
86	2.04	1.70	1.37	1.04	0.74	0.45	0.17	-0.10	-0.37	-0.64	-0.92	-1.19	-1.47	-1.74	-2.01
87	2.26	1.92	1.59	1.27	0.97	0.68	0.40	0.14	-0.14	-0.41	-0.68	-0.96	-1.23	-1.50	-1.77
88	2.00	1.67	1.34	1.02	0.72	0.43	0.16	-0.11	-0.38	-0.65	-0.92	-1.20	-1.47	-1.74	-2.01
89	2.10	1.77	1.45	1.14	0.84	0.56	0.29	0.02	-0.25	-0.51	-0.79	-1.06	-1.33	-1.60	-1.87
90	1.92	1.61	1.29	0.98	0.69	0.41	0.14	-0.13	-0.39	-0.66	-0.93	-1.20	-1.47	-1.74	-2.01
91	1.92	1.61	1.30	1.00	0.71	0.43	0.16	-0.10	-0.36	-0.63	-0.90	-1.17	-1.44	-1.71	-1.98
92	2.15	1.86	1.56	1.27	0.99	0.71	0.45	0.19	-0.08	-0.34	-0.61	-0.88	-1.15	-1.41	-1.68
93	1.96	1.67	1.38	1.09	0.81	0.54	0.28	0.02	-0.24	-0.50	-0.77	-1.04	-1.30	-1.57	-1.84
94	1.90	1.62	1.33	1.05	0.77	0.50	0.24	-0.02	-0.28	-0.54	-0.81	-1.07	-1.34	-1.61	-1.87
95	2.06	1.79	1.51	1.23	0.95	0.69	0.43	0.17	-0.08	-0.35	-0.61	-0.87	-1.14	-1.40	-1.67
96	2.02	1.76	1.48	1.21	0.93	0.67	0.41	0.16	-0.10	-0.35	-0.62	-0.88	-1.14	-1.41	-1.67
97	1.96	1.70	1.43	1.16	0.89	0.62	0.37	0.12	-0.13	-0.39	-0.65	-0.91	-1.18	-1.44	-1.70
98	1.68	1.43	1.17	0.90	0.63	0.37	0.12	-0.13	-0.38	-0.64	-0.90	-1.16	-1.42	-1.69	-1.95
99	1.44	1.21	0.97	0.72	0.47	0.22	-0.03	-0.27	-0.52	-0.77	-1.03	-1.29	-1.55	-1.81	-2.07
100	1.51	1.30	1.06	0.82	0.57	0.33	0.09	-0.15	-0.40	-0.64	-0.90	-1.15	-1.41	-1.67	-1.93
101	1.67	1.46	1.23	1.00	0.76	0.53	0.29	0.06	-0.18	-0.42	-0.67	-0.92	-1.18	-1.43	-1.69
102	1.56	1.35	1.14	0.92	0.70	0.47	0.25	0.03	-0.20	-0.44	-0.68	-0.93	-1.17	-1.42	-1.68
103	1.45	1.25	1.05	0.84	0.62	0.41	0.19	-0.03	-0.25	-0.48	-0.71	-0.95	-1.20	-1.44	-1.69
104	1.51	1.30	1.09	0.87	0.66	0.45	0.25	0.04	-0.17	-0.38	-0.60	-0.83	-1.06	-1.30	-1.54

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce d'espansione

PUNTO	FRANCO SINISTRO (m)														
	Portata (m³/s)														
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
105	1.49	1.27	1.05	0.82	0.61	0.41	0.21	0.01	-0.19	-0.40	-0.61	-0.83	-1.05	-1.28	-1.51
106	1.26	1.04	0.82	0.61	0.41	0.22	0.04	-0.15	-0.34	-0.53	-0.73	-0.94	-1.15	-1.37	-1.59
107	1.31	1.08	0.87	0.66	0.47	0.29	0.11	-0.07	-0.25	-0.44	-0.63	-0.83	-1.04	-1.25	-1.47
108	1.17	0.95	0.74	0.55	0.37	0.19	0.02	-0.15	-0.33	-0.51	-0.70	-0.89	-1.09	-1.29	-1.50
109	1.09	0.86	0.65	0.46	0.27	0.10	-0.07	-0.24	-0.41	-0.59	-0.77	-0.95	-1.15	-1.35	-1.55
110	1.20	0.99	0.79	0.61	0.44	0.27	0.11	-0.05	-0.21	-0.38	-0.55	-0.73	-0.91	-1.10	-1.30
111	1.35	1.14	0.94	0.76	0.59	0.42	0.26	0.10	-0.06	-0.22	-0.39	-0.56	-0.74	-0.92	-1.12
112	1.17	0.95	0.75	0.57	0.41	0.25	0.09	-0.06	-0.21	-0.37	-0.53	-0.70	-0.87	-1.05	-1.23
113	1.41	1.19	1.00	0.82	0.65	0.49	0.34	0.19	0.04	-0.12	-0.27	-0.44	-0.61	-0.78	-0.96
114	1.26	1.03	0.83	0.65	0.48	0.32	0.17	0.02	-0.13	-0.28	-0.43	-0.59	-0.75	-0.92	-1.09
115	1.08	0.85	0.65	0.47	0.30	0.14	-0.01	-0.15	-0.30	-0.45	-0.60	-0.76	-0.92	-1.08	-1.26
116	1.55	1.31	1.10	0.92	0.75	0.59	0.43	0.29	0.14	-0.01	-0.15	-0.30	-0.45	-0.60	-0.76
117	1.59	1.32	1.06	0.81	0.59	0.38	0.20	0.02	-0.15	-0.31	-0.47	-0.62	-0.76	-0.90	-1.03
118	2.26	1.94	1.66	1.40	1.18	0.99	0.81	0.64	0.48	0.32	0.17	0.03	-0.10	-0.23	-0.35
119	2.72	2.39	2.12	1.88	1.67	1.48	1.30	1.13	0.97	0.82	0.67	0.53	0.40	0.27	0.16
120	1.78	1.42	1.15	0.93	0.73	0.54	0.37	0.21	0.05	-0.10	-0.25	-0.39	-0.52	-0.64	-0.76
121	2.03	1.63	1.34	1.12	0.92	0.75	0.59	0.43	0.28	0.14	0.00	-0.12	-0.24	-0.36	-0.47
122	2.88	2.46	2.16	1.93	1.73	1.54	1.37	1.21	1.06	0.92	0.78	0.65	0.53	0.42	0.31
123	3.63	3.20	2.88	2.64	2.42	2.23	2.05	1.88	1.72	1.57	1.42	1.29	1.16	1.04	0.94
124	3.49	3.06	2.74	2.49	2.27	2.07	1.88	1.70	1.53	1.36	1.21	1.07	0.94	0.82	0.70
125	3.74	3.26	2.88	2.58	2.32	2.09	1.90	1.72	1.56	1.40	1.27	1.14	1.01	0.90	0.79
126	4.13	3.67	3.29	2.99	2.74	2.52	2.33	2.16	2.00	1.86	1.73	1.61	1.49	1.38	1.28
127	4.51	4.04	3.67	3.36	3.09	2.86	2.64	2.45	2.28	2.12	1.97	1.84	1.72	1.61	1.50
128	5.16	4.68	4.31	4.01	3.76	3.54	3.34	3.16	3.00	2.85	2.71	2.58	2.46	2.34	2.24
129	5.52	5.02	4.63	4.30	4.03	3.79	3.58	3.38	3.20	3.04	2.88	2.74	2.60	2.47	2.35
130	5.52	5.02	4.62	4.29	4.00	3.75	3.52	3.31	3.11	2.93	2.76	2.60	2.45	2.30	2.17
131	5.87	5.34	4.91	4.55	4.26	3.99	3.75	3.52	3.31	3.12	2.93	2.76	2.59	2.43	2.27
132	6.07	5.54	5.10	4.73	4.42	4.15	3.90	3.66	3.45	3.25	3.06	2.88	2.71	2.54	2.39
133	6.32	5.79	5.35	4.98	4.67	4.38	4.13	3.89	3.67	3.46	3.26	3.08	2.90	2.73	2.57
134	6.28	5.80	5.39	5.03	4.73	4.45	4.20	3.97	3.75	3.55	3.36	3.18	3.00	2.83	2.67
135	6.25	5.77	5.36	5.01	4.71	4.45	4.20	3.97	3.75	3.54	3.35	3.16	2.98	2.81	2.65
136	6.31	5.82	5.41	5.06	4.78	4.51	4.26	4.02	3.80	3.59	3.39	3.20	3.02	2.85	2.68
137	6.94	6.41	5.96	5.58	5.27	4.99	4.74	4.51	4.30	4.10	3.92	3.74	3.57	3.40	3.24
138	6.76	6.23	5.79	5.41	5.13	4.86	4.63	4.40	4.20	4.00	3.82	3.64	3.47	3.30	3.14
139	7.09	6.55	6.09	5.69	5.39	5.11	4.85	4.62	4.40	4.19	3.99	3.80	3.62	3.45	3.28
140	7.19	6.63	6.15	5.74	5.43	5.14	4.89	4.66	4.43	4.23	4.03	3.84	3.66	3.49	3.32
141	7.74	7.18	6.69	6.26	5.92	5.63	5.37	5.13	4.90	4.69	4.49	4.31	4.13	3.95	3.79
142	7.63	7.04	6.52	6.08	5.74	5.46	5.20	4.98	4.76	4.57	4.38	4.20	4.02	3.85	3.69
143	7.98	7.38	6.85	6.40	6.05	5.76	5.50	5.26	5.05	4.85	4.66	4.48	4.31	4.15	3.99
144	7.55	6.95	6.41	5.94	5.57	5.26	4.99	4.75	4.53	4.32	4.12	3.93	3.76	3.58	3.42
145	4.27	4.11	3.97	3.85	3.72	3.61	3.50	3.39	3.28	3.18	3.08	2.99	2.89	2.80	2.71
146	2.77	2.57	2.41	2.28	2.14	2.01	1.89	1.77	1.66	1.55	1.45	1.34	1.24	1.14	1.04
147	2.22	1.99	1.79	1.63	1.49	1.35	1.22	1.10	0.98	0.86	0.75	0.64	0.53	0.43	0.33
148	2.25	2.02	1.82	1.66	1.51	1.36	1.21	1.08	0.95	0.83	0.72	0.61	0.51	0.41	0.31
149	2.99	2.69	2.47	2.28	2.12	1.99	1.87	1.76	1.65	1.55	1.46	1.37	1.28	1.19	1.10
150	2.94	2.63	2.39	2.17	1.98	1.81	1.67	1.55	1.44	1.35	1.26	1.18	1.10	1.03	0.96
151	3.28	2.91	2.65	2.43	2.25	2.09	1.96	1.84	1.73	1.63	1.53	1.45	1.37	1.30	1.23
152	3.39	2.99	2.71	2.52	2.36	2.23	2.09	1.96	1.84	1.73	1.62	1.52	1.43	1.34	1.26
153	3.96	3.55	3.25	3.05	2.86	2.68	2.50	2.33	2.17	2.03	1.90	1.79	1.68	1.58	1.49
154	4.15	3.71	3.35	3.07	2.84	2.63	2.44	2.27	2.12	1.98	1.85	1.72	1.61	1.50	1.40
155	4.43	3.98	3.62	3.33	3.08	2.85	2.65	2.46	2.30	2.16	2.03	1.91	1.79	1.68	1.57
156	4.86	4.41	4.04	3.75	3.49	3.27	3.06	2.87	2.71	2.57	2.45	2.33	2.20	2.09	1.98
157	5.07	4.74	4.43	4.17	3.93	3.71	3.50	3.31	3.15	3.00	2.87	2.74	2.61	2.49	2.37
158	5.05	4.73	4.44	4.19	3.96	3.74	3.54	3.35	3.18	3.03	2.88	2.74	2.61	2.48	2.36
159	4.83	4.47	4.17	3.90	3.66	3.44	3.24	3.04	2.86	2.69	2.52	2.36	2.21	2.07	1.93
160	4.96	4.57	4.24	3.94	3.68	3.43	3.21	2.99	2.79	2.60	2.42	2.24	2.07	1.91	1.76
161	5.27	4.89	4.56	4.26	4.00	3.75	3.52	3.31	3.10	2.91	2.73	2.55	2.39	2.22	2.07
162	5.76	5.38	5.06	4.78	4.54	4.31	4.09	3.89	3.69	3.51	3.33	3.16	3.00	2.84	2.69

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casse d'espansione

Tabella 3.4. Franco destro per prefissate portate, ottenuto con scabrezza calibrata e livello in Po pari a 22 m s.l.m.

PUNTO	FRANCO DESTRO (m)														
	Portata (m ³ /s)														
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
1	4.32	3.76	3.22	2.91	2.73	2.62	2.40	2.28	2.16	2.05	1.94	1.83	1.73	1.64	1.55
2	4.14	3.55	2.98	2.64	2.43	2.30	2.05	1.90	1.76	1.62	1.49	1.37	1.25	1.13	1.02
3	3.98	3.41	2.87	2.55	2.33	2.20	1.94	1.78	1.63	1.48	1.35	1.22	1.09	0.97	0.85
4	3.51	2.97	2.50	2.19	1.98	1.85	1.58	1.43	1.28	1.15	1.02	0.89	0.77	0.66	0.55
5	3.32	2.77	2.31	2.00	1.78	1.65	1.39	1.25	1.11	0.98	0.86	0.74	0.63	0.52	0.42
6	3.22	2.66	2.19	1.87	1.63	1.49	1.24	1.10	0.97	0.86	0.75	0.65	0.55	0.46	0.37
7	3.08	2.52	2.05	1.71	1.46	1.30	1.05	0.92	0.81	0.71	0.62	0.53	0.44	0.36	0.28
8	2.91	2.34	1.85	1.49	1.21	1.05	0.82	0.71	0.62	0.54	0.46	0.38	0.31	0.23	0.16
9	2.66	2.08	1.58	1.21	0.91	0.73	0.53	0.43	0.35	0.28	0.21	0.15	0.08	0.01	-0.06
10	2.53	1.97	1.48	1.11	0.81	0.63	0.44	0.35	0.27	0.20	0.13	0.07	0.00	-0.06	-0.13
11	3.25	2.71	2.23	1.86	1.57	1.38	1.20	1.11	1.03	0.96	0.89	0.83	0.76	0.70	0.64
12	3.09	2.55	2.07	1.69	1.39	1.20	1.02	0.92	0.84	0.76	0.69	0.63	0.56	0.49	0.42
13	3.13	2.58	2.10	1.72	1.42	1.23	1.05	0.94	0.85	0.77	0.69	0.62	0.54	0.47	0.39
14	3.21	2.66	2.17	1.78	1.47	1.26	1.06	0.93	0.82	0.71	0.61	0.51	0.41	0.31	0.21
15	3.35	2.79	2.30	1.90	1.58	1.36	1.16	1.02	0.89	0.77	0.66	0.55	0.43	0.32	0.21
16	3.37	2.81	2.31	1.90	1.57	1.34	1.12	0.96	0.82	0.68	0.55	0.42	0.28	0.15	0.02
17	3.00	2.44	1.94	1.54	1.21	0.97	0.75	0.59	0.44	0.30	0.16	0.02	-0.11	-0.25	-0.38
18	2.94	2.38	1.86	1.43	1.07	0.80	0.55	0.35	0.16	-0.02	-0.19	-0.36	-0.53	-0.70	-0.87
19	2.90	2.33	1.82	1.38	1.03	0.75	0.49	0.28	0.08	-0.10	-0.29	-0.47	-0.64	-0.82	-0.99
20	2.76	2.19	1.67	1.24	0.88	0.59	0.33	0.12	-0.09	-0.28	-0.47	-0.65	-0.83	-1.01	-1.19
21	2.92	2.35	1.82	1.38	1.01	0.72	0.45	0.23	0.02	-0.19	-0.38	-0.58	-0.76	-0.95	-1.13
22	2.95	2.37	1.83	1.38	1.00	0.69	0.41	0.16	-0.07	-0.28	-0.50	-0.70	-0.91	-1.11	-1.31
23	3.10	2.52	1.98	1.52	1.14	0.83	0.53	0.29	0.05	-0.17	-0.39	-0.60	-0.81	-1.01	-1.21
24	3.13	2.55	2.01	1.55	1.16	0.84	0.54	0.29	0.04	-0.19	-0.41	-0.63	-0.85	-1.06	-1.27
25	3.49	2.92	2.38	1.93	1.54	1.21	0.90	0.64	0.39	0.15	-0.08	-0.31	-0.53	-0.74	-0.96
26	3.45	2.88	2.35	1.89	1.49	1.15	0.84	0.57	0.31	0.07	-0.17	-0.40	-0.63	-0.85	-1.07
27	3.05	2.48	1.94	1.47	1.07	0.72	0.40	0.12	-0.15	-0.41	-0.66	-0.89	-1.13	-1.36	-1.58
28	2.85	2.28	1.73	1.26	0.85	0.49	0.16	-0.13	-0.41	-0.67	-0.93	-1.18	-1.43	-1.67	-1.90
29	2.78	2.21	1.66	1.18	0.77	0.40	0.06	-0.24	-0.53	-0.80	-1.07	-1.33	-1.58	-1.83	-2.08
30	2.62	2.04	1.50	1.02	0.60	0.23	-0.11	-0.41	-0.70	-0.98	-1.25	-1.51	-1.76	-2.01	-2.26
31	2.81	2.23	1.68	1.19	0.78	0.40	0.05	-0.26	-0.56	-0.84	-1.12	-1.39	-1.66	-1.91	-2.17
32	2.64	2.07	1.53	1.05	0.63	0.26	-0.09	-0.40	-0.70	-0.99	-1.27	-1.54	-1.81	-2.07	-2.33
33	2.69	2.14	1.61	1.14	0.72	0.35	0.00	-0.31	-0.61	-0.90	-1.18	-1.45	-1.72	-1.98	-2.23
34	2.58	2.05	1.52	1.05	0.64	0.27	-0.07	-0.39	-0.69	-0.97	-1.26	-1.53	-1.79	-2.05	-2.31
35	2.65	2.11	1.60	1.14	0.74	0.38	0.04	-0.27	-0.56	-0.85	-1.13	-1.40	-1.66	-1.92	-2.18
36	2.62	2.09	1.59	1.15	0.77	0.42	0.10	-0.20	-0.49	-0.77	-1.05	-1.32	-1.58	-1.84	-2.09
37	2.73	2.21	1.72	1.29	0.92	0.58	0.25	-0.04	-0.33	-0.61	-0.89	-1.16	-1.42	-1.68	-1.93
38	2.52	2.04	1.57	1.16	0.79	0.45	0.13	-0.17	-0.45	-0.74	-1.01	-1.28	-1.54	-1.80	-2.05
39	2.32	1.87	1.41	1.01	0.64	0.31	-0.01	-0.31	-0.60	-0.88	-1.15	-1.42	-1.68	-1.94	-2.19
40	2.27	1.83	1.38	0.97	0.61	0.28	-0.04	-0.34	-0.63	-0.91	-1.18	-1.45	-1.71	-1.97	-2.22
41	2.22	1.82	1.40	1.01	0.66	0.33	0.02	-0.27	-0.56	-0.84	-1.11	-1.38	-1.64	-1.90	-2.16
42	2.25	1.87	1.47	1.10	0.76	0.44	0.13	-0.16	-0.45	-0.73	-1.00	-1.27	-1.53	-1.79	-2.04
43	2.31	1.94	1.55	1.19	0.86	0.55	0.24	-0.05	-0.33	-0.61	-0.88	-1.14	-1.40	-1.66	-1.91
44	2.29	1.90	1.50	1.14	0.83	0.54	0.27	0.00	-0.27	-0.53	-0.80	-1.06	-1.31	-1.56	-1.81
45	2.25	1.85	1.44	1.07	0.76	0.49	0.23	-0.02	-0.27	-0.53	-0.78	-1.04	-1.29	-1.54	-1.78
46	2.06	1.64	1.22	0.84	0.52	0.24	-0.03	-0.29	-0.55	-0.81	-1.07	-1.33	-1.58	-1.83	-2.08
47	2.08	1.64	1.20	0.81	0.47	0.17	-0.12	-0.39	-0.67	-0.94	-1.21	-1.47	-1.74	-1.99	-2.25
48	2.20	1.74	1.28	0.87	0.51	0.20	-0.11	-0.39	-0.68	-0.96	-1.25	-1.52	-1.79	-2.06	-2.33
49	2.03	1.55	1.08	0.65	0.29	-0.04	-0.36	-0.65	-0.95	-1.24	-1.53	-1.81	-2.09	-2.37	-2.64
50	2.32	1.84	1.38	0.97	0.61	0.29	-0.01	-0.30	-0.59	-0.88	-1.16	-1.43	-1.71	-1.98	-2.24
51	2.30	1.82	1.35	0.93	0.56	0.23	-0.09	-0.39	-0.69	-0.98	-1.27	-1.55	-1.83	-2.11	-2.38
52	2.10	1.60	1.12	0.68	0.30	-0.04	-0.37	-0.68	-0.98	-1.28	-1.58	-1.87	-2.15	-2.44	-2.71
53	2.31	1.80	1.31	0.87	0.48	0.13	-0.21	-0.53	-0.84	-1.14	-1.44	-1.74	-2.03	-2.32	-2.60
54	2.17	1.66	1.17	0.73	0.34	-0.01	-0.34	-0.66	-0.97	-1.28	-1.58	-1.87	-2.16	-2.44	-2.72
55	2.26	1.74	1.24	0.79	0.40	0.04	-0.30	-0.63	-0.94	-1.26	-1.56	-1.86	-2.15	-2.44	-2.73
56	2.33	1.81	1.31	0.86	0.47	0.11	-0.23	-0.56	-0.88	-1.19	-1.49	-1.79	-2.09	-2.38	-2.66
57	2.24	1.72	1.22	0.77	0.38	0.02	-0.32	-0.64	-0.96	-1.27	-1.57	-1.87	-2.16	-2.45	-2.73
58	2.21	1.67	1.16	0.70	0.30	-0.07	-0.43	-0.76	-1.09	-1.41	-1.73	-2.04	-2.34	-2.64	-2.93
59	2.34	1.80	1.28	0.81	0.39	0.01	-0.35	-0.70	-1.04	-1.37	-1.70	-2.01	-2.33	-2.64	-2.94
60	2.31	1.77	1.25	0.79	0.38	-0.01	-0.37	-0.71	-1.05	-1.38	-1.71	-2.03	-2.34	-2.65	-2.95
61	2.17	1.64	1.13	0.67	0.26	-0.12	-0.48	-0.83	-1.17	-1.50	-1.82	-2.14	-2.45	-2.76	-3.06

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casse d'espansione

PUNTO	FRANCO DESTRO (m)														
	Portata (m³/s)														
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
62	2.15	1.63	1.12	0.66	0.26	-0.13	-0.49	-0.83	-1.17	-1.50	-1.82	-2.14	-2.45	-2.76	-3.06
63	2.24	1.76	1.28	0.83	0.43	0.05	-0.31	-0.65	-0.99	-1.32	-1.64	-1.96	-2.27	-2.58	-2.88
64	1.95	1.48	1.01	0.56	0.16	-0.22	-0.58	-0.93	-1.26	-1.59	-1.91	-2.23	-2.54	-2.85	-3.15
65	2.20	1.76	1.29	0.85	0.45	0.08	-0.28	-0.62	-0.95	-1.28	-1.60	-1.92	-2.23	-2.53	-2.83
66	2.12	1.69	1.24	0.80	0.41	0.05	-0.30	-0.64	-0.97	-1.29	-1.61	-1.93	-2.24	-2.54	-2.85
67	2.11	1.68	1.23	0.80	0.41	0.05	-0.29	-0.62	-0.95	-1.27	-1.59	-1.91	-2.22	-2.52	-2.82
68	2.14	1.71	1.27	0.86	0.48	0.13	-0.18	-0.50	-0.81	-1.13	-1.44	-1.75	-2.05	-2.36	-2.65
69	2.04	1.64	1.22	0.82	0.45	0.11	-0.20	-0.50	-0.81	-1.12	-1.43	-1.74	-2.04	-2.34	-2.64
70	1.97	1.58	1.16	0.76	0.40	0.06	-0.24	-0.55	-0.86	-1.17	-1.48	-1.79	-2.09	-2.39	-2.69
71	1.90	1.55	1.18	0.80	0.45	0.12	-0.18	-0.48	-0.78	-1.09	-1.40	-1.70	-2.00	-2.30	-2.59
72	1.65	1.34	1.00	0.65	0.32	0.00	-0.29	-0.58	-0.88	-1.18	-1.48	-1.78	-2.07	-2.37	-2.66
73	1.77	1.45	1.12	0.78	0.46	0.15	-0.14	-0.42	-0.72	-1.01	-1.31	-1.60	-1.90	-2.19	-2.48
74	1.72	1.41	1.09	0.76	0.44	0.14	-0.14	-0.42	-0.71	-1.00	-1.29	-1.59	-1.88	-2.17	-2.45
75	1.88	1.57	1.24	0.91	0.59	0.28	0.00	-0.28	-0.57	-0.86	-1.15	-1.44	-1.73	-2.02	-2.31
76	2.12	1.80	1.46	1.13	0.82	0.52	0.23	-0.04	-0.33	-0.61	-0.90	-1.18	-1.47	-1.75	-2.03
77	2.24	1.91	1.58	1.25	0.93	0.64	0.36	0.08	-0.20	-0.48	-0.76	-1.05	-1.33	-1.61	-1.89
78	2.29	1.96	1.63	1.31	1.01	0.71	0.44	0.17	-0.10	-0.38	-0.66	-0.94	-1.22	-1.49	-1.77
79	2.17	1.85	1.53	1.21	0.91	0.62	0.35	0.09	-0.18	-0.46	-0.74	-1.01	-1.29	-1.57	-1.84
80	2.04	1.72	1.40	1.09	0.80	0.51	0.25	-0.01	-0.28	-0.55	-0.82	-1.09	-1.37	-1.64	-1.91
81	1.91	1.58	1.27	0.96	0.68	0.40	0.14	-0.12	-0.38	-0.65	-0.92	-1.19	-1.46	-1.73	-2.00
82	1.99	1.65	1.32	0.99	0.69	0.39	0.12	-0.15	-0.42	-0.70	-0.97	-1.25	-1.53	-1.80	-2.07
83	2.38	2.03	1.70	1.37	1.06	0.77	0.49	0.22	-0.06	-0.33	-0.61	-0.89	-1.16	-1.44	-1.71
84	2.21	1.86	1.53	1.20	0.90	0.60	0.32	0.05	-0.22	-0.50	-0.78	-1.05	-1.33	-1.60	-1.88
85	2.26	1.92	1.59	1.26	0.95	0.66	0.38	0.11	-0.17	-0.44	-0.72	-1.00	-1.27	-1.55	-1.82
86	2.27	1.93	1.60	1.27	0.97	0.68	0.40	0.13	-0.14	-0.41	-0.69	-0.96	-1.24	-1.51	-1.78
87	2.34	2.00	1.67	1.35	1.05	0.76	0.48	0.22	-0.06	-0.33	-0.60	-0.88	-1.15	-1.42	-1.69
88	2.28	1.95	1.62	1.30	1.00	0.71	0.44	0.17	-0.10	-0.37	-0.64	-0.92	-1.19	-1.46	-1.73
89	2.40	2.07	1.75	1.44	1.14	0.86	0.59	0.32	0.05	-0.21	-0.49	-0.76	-1.03	-1.30	-1.57
90	2.44	2.13	1.81	1.50	1.21	0.93	0.66	0.39	0.13	-0.14	-0.41	-0.68	-0.95	-1.22	-1.49
91	2.27	1.96	1.65	1.35	1.06	0.78	0.51	0.25	-0.01	-0.28	-0.55	-0.82	-1.09	-1.36	-1.63
92	2.17	1.88	1.58	1.29	1.01	0.73	0.47	0.21	-0.06	-0.32	-0.59	-0.86	-1.13	-1.39	-1.66
93	1.70	1.41	1.12	0.83	0.55	0.28	0.02	-0.24	-0.50	-0.76	-1.03	-1.30	-1.56	-1.83	-2.10
94	1.99	1.71	1.42	1.14	0.86	0.59	0.33	0.07	-0.19	-0.45	-0.72	-0.98	-1.25	-1.52	-1.78
95	2.26	1.99	1.71	1.43	1.15	0.89	0.63	0.37	0.12	-0.15	-0.41	-0.67	-0.94	-1.20	-1.47
96	2.09	1.83	1.55	1.28	1.00	0.74	0.48	0.23	-0.03	-0.28	-0.55	-0.81	-1.07	-1.34	-1.60
97	1.95	1.69	1.42	1.15	0.88	0.61	0.36	0.11	-0.14	-0.40	-0.66	-0.92	-1.19	-1.45	-1.71
98	1.75	1.50	1.24	0.97	0.70	0.44	0.19	-0.06	-0.31	-0.57	-0.83	-1.09	-1.35	-1.62	-1.88
99	1.81	1.58	1.34	1.09	0.84	0.59	0.34	0.10	-0.15	-0.40	-0.66	-0.92	-1.18	-1.44	-1.70
100	1.84	1.63	1.39	1.15	0.90	0.66	0.42	0.18	-0.07	-0.31	-0.57	-0.82	-1.08	-1.34	-1.60
101	2.19	1.98	1.75	1.52	1.28	1.05	0.81	0.58	0.34	0.10	-0.15	-0.40	-0.66	-0.91	-1.17
102	2.00	1.79	1.58	1.36	1.14	0.91	0.69	0.47	0.24	0.00	-0.24	-0.49	-0.73	-0.98	-1.24
103	1.98	1.78	1.58	1.37	1.15	0.94	0.72	0.50	0.28	0.05	-0.18	-0.42	-0.67	-0.91	-1.16
104	1.88	1.67	1.46	1.24	1.03	0.82	0.62	0.41	0.20	-0.01	-0.23	-0.46	-0.69	-0.93	-1.17
105	1.75	1.53	1.31	1.08	0.87	0.67	0.47	0.27	0.07	-0.14	-0.35	-0.57	-0.79	-1.02	-1.25
106	1.75	1.53	1.31	1.10	0.90	0.71	0.53	0.34	0.15	-0.04	-0.24	-0.45	-0.66	-0.88	-1.10
107	1.69	1.46	1.25	1.04	0.85	0.67	0.49	0.31	0.13	-0.06	-0.25	-0.45	-0.66	-0.87	-1.09
108	1.63	1.41	1.20	1.01	0.83	0.65	0.48	0.31	0.13	-0.05	-0.24	-0.43	-0.63	-0.83	-1.04
109	1.70	1.47	1.26	1.07	0.88	0.71	0.54	0.37	0.20	0.02	-0.16	-0.34	-0.54	-0.74	-0.94
110	1.60	1.39	1.19	1.01	0.84	0.67	0.51	0.35	0.19	0.02	-0.15	-0.33	-0.51	-0.70	-0.90
111	1.43	1.22	1.02	0.84	0.67	0.50	0.34	0.18	0.02	-0.14	-0.31	-0.48	-0.66	-0.84	-1.04
112	1.45	1.23	1.03	0.85	0.69	0.53	0.37	0.22	0.07	-0.09	-0.25	-0.42	-0.59	-0.77	-0.95
113	1.47	1.25	1.06	0.88	0.71	0.55	0.40	0.25	0.10	-0.06	-0.21	-0.38	-0.55	-0.72	-0.90
114	1.50	1.27	1.07	0.89	0.72	0.56	0.41	0.26	0.11	-0.04	-0.19	-0.35	-0.51	-0.68	-0.85
115	1.44	1.21	1.01	0.83	0.66	0.50	0.35	0.21	0.06	-0.09	-0.24	-0.40	-0.56	-0.72	-0.90
116	1.52	1.28	1.07	0.89	0.72	0.56	0.40	0.26	0.11	-0.04	-0.18	-0.33	-0.48	-0.63	-0.79
117	1.57	1.30	1.04	0.79	0.57	0.36	0.18	0.00	-0.17	-0.33	-0.49	-0.64	-0.78	-0.92	-1.05
118	1.62	1.30	1.02	0.76	0.54	0.35	0.17	0.00	-0.16	-0.32	-0.47	-0.61	-0.74	-0.87	-0.99
119	1.78	1.45	1.18	0.94	0.73	0.54	0.36	0.19	0.03	-0.12	-0.27	-0.41	-0.54	-0.67	-0.78
120	2.19	1.83	1.56	1.34	1.14	0.95	0.78	0.62	0.46	0.31	0.16	0.02	-0.11	-0.23	-0.35
121	2.47	2.07	1.78	1.56	1.36	1.19	1.03	0.87	0.72	0.58	0.44	0.32	0.20	0.08	-0.03
122	3.48	3.06	2.76	2.53	2.33	2.14	1.97	1.81	1.66	1.52	1.38	1.25	1.13	1.02	0.91
123	3.48	3.05	2.73	2.49	2.27	2.08	1.90	1.73	1.57	1.42	1.27	1.14	1.01	0.89	0.79
124	3.83	3.40	3.08	2.83	2.61	2.41	2.22	2.04	1.87	1.70	1.55	1.41	1.28	1.16	1.04
125	3.88	3.40	3.02	2.72	2.46	2.23	2.04	1.86	1.70	1.54	1.41	1.28	1.15	1.04	0.93
126	3.75	3.29	2.91	2.61	2.36	2.14	1.95	1.78	1.62	1.48	1.35	1.23	1.11	1.00	0.90

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce d'espansione

PUNTO	FRANCO DESTRO (m)														
	Portata (m ³ /s)														
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
127	3.99	3.52	3.15	2.84	2.57	2.34	2.12	1.93	1.76	1.60	1.45	1.32	1.20	1.09	0.98
128	4.07	3.59	3.22	2.92	2.67	2.45	2.25	2.07	1.91	1.76	1.62	1.49	1.37	1.25	1.15
129	5.08	4.58	4.19	3.86	3.59	3.35	3.14	2.94	2.76	2.60	2.44	2.30	2.16	2.03	1.91
130	5.25	4.75	4.35	4.02	3.73	3.48	3.25	3.04	2.84	2.66	2.49	2.33	2.18	2.03	1.90
131	5.45	4.92	4.49	4.13	3.84	3.57	3.33	3.10	2.89	2.70	2.51	2.34	2.17	2.01	1.85
132	5.72	5.19	4.75	4.38	4.07	3.80	3.55	3.31	3.10	2.90	2.71	2.53	2.36	2.19	2.04
133	5.81	5.28	4.84	4.47	4.16	3.87	3.62	3.38	3.16	2.95	2.75	2.57	2.39	2.22	2.06
134	6.22	5.74	5.33	4.97	4.67	4.39	4.14	3.91	3.69	3.49	3.30	3.12	2.94	2.77	2.61
135	6.45	5.97	5.56	5.21	4.91	4.65	4.40	4.17	3.95	3.74	3.55	3.36	3.18	3.01	2.85
136	6.77	6.28	5.87	5.52	5.24	4.97	4.72	4.48	4.26	4.05	3.85	3.66	3.48	3.31	3.14
137	6.74	6.21	5.76	5.38	5.07	4.79	4.54	4.31	4.10	3.90	3.72	3.54	3.37	3.20	3.04
138	6.73	6.20	5.76	5.38	5.10	4.83	4.60	4.37	4.17	3.97	3.79	3.61	3.44	3.27	3.11
139	5.68	5.14	4.68	4.28	3.98	3.70	3.44	3.21	2.99	2.78	2.58	2.39	2.21	2.04	1.87
140	6.89	6.33	5.85	5.44	5.13	4.84	4.59	4.36	4.13	3.93	3.73	3.54	3.36	3.19	3.02
141	7.15	6.59	6.10	5.67	5.33	5.04	4.78	4.54	4.31	4.10	3.90	3.72	3.54	3.36	3.20
142	8.05	7.46	6.94	6.50	6.16	5.88	5.62	5.40	5.18	4.99	4.80	4.62	4.44	4.27	4.11
143	8.02	7.42	6.89	6.44	6.09	5.80	5.54	5.30	5.09	4.89	4.70	4.52	4.35	4.19	4.03
144	8.87	8.27	7.73	7.26	6.89	6.58	6.31	6.07	5.85	5.64	5.44	5.25	5.08	4.90	4.74
145	5.47	5.31	5.17	5.05	4.92	4.81	4.70	4.59	4.48	4.38	4.28	4.19	4.09	4.00	3.91
146	4.64	4.44	4.28	4.15	4.01	3.88	3.76	3.64	3.53	3.42	3.32	3.21	3.11	3.01	2.91
147	4.45	4.22	4.02	3.86	3.72	3.58	3.45	3.33	3.21	3.09	2.98	2.87	2.76	2.66	2.56
148	4.98	4.75	4.55	4.39	4.24	4.09	3.94	3.81	3.68	3.56	3.45	3.34	3.24	3.14	3.04
149	2.76	2.46	2.24	2.05	1.89	1.76	1.64	1.53	1.42	1.32	1.23	1.14	1.05	0.96	0.87
150	2.35	2.04	1.80	1.58	1.39	1.22	1.08	0.96	0.85	0.76	0.67	0.59	0.51	0.44	0.37
151	2.66	2.29	2.03	1.81	1.63	1.47	1.34	1.22	1.11	1.01	0.91	0.83	0.75	0.68	0.61
152	3.33	2.93	2.65	2.46	2.30	2.17	2.03	1.90	1.78	1.67	1.56	1.46	1.37	1.28	1.20
153	4.06	3.65	3.35	3.15	2.96	2.78	2.60	2.43	2.27	2.13	2.00	1.89	1.78	1.68	1.59
154	4.29	3.85	3.49	3.21	2.98	2.77	2.58	2.41	2.26	2.12	1.99	1.86	1.75	1.64	1.54
155	4.18	3.73	3.37	3.08	2.83	2.60	2.40	2.21	2.05	1.91	1.78	1.66	1.54	1.43	1.32
156	5.06	4.61	4.24	3.95	3.69	3.47	3.26	3.07	2.91	2.77	2.65	2.53	2.40	2.29	2.18
157	5.63	5.30	4.99	4.73	4.49	4.27	4.06	3.87	3.71	3.56	3.43	3.30	3.17	3.05	2.93
158	5.27	4.95	4.66	4.41	4.18	3.96	3.76	3.57	3.40	3.25	3.10	2.96	2.83	2.70	2.58
159	4.98	4.62	4.32	4.05	3.81	3.59	3.39	3.19	3.01	2.84	2.67	2.51	2.36	2.22	2.08
160	5.92	5.53	5.20	4.90	4.64	4.39	4.17	3.95	3.75	3.56	3.38	3.20	3.03	2.87	2.72
161	6.18	5.80	5.47	5.17	4.91	4.66	4.43	4.22	4.01	3.82	3.64	3.46	3.30	3.13	2.98
162	5.81	5.43	5.11	4.83	4.59	4.36	4.14	3.94	3.74	3.56	3.38	3.21	3.05	2.89	2.74

3.4 Influenza del livello in Po sul tratto terminale dell'asta

Per il tratto terminale dell'asta (punti 1-34) è stata inoltre valutata la portata compatibile al variare del livello di valle in Po. In questo caso la portata è stata limitata a valori tra 200 e 700 m³/s. Nella Tabella 3.5 e nella Tabella 3.6 sono riportati i valori delle portate compatibili relative ai livelli in Po di 25 m s.l.m. e 29 m s.l.m. Nella Tabella 3.7 e nella Tabella 3.8, invece, sono mostrati i franchi per prefissati valori di portata, sempre relativamente a livelli in Po di 25 m s.l.m. e 29 m s.l.m. rispettivamente.

Tabella 3.5. Portata compatibile con franchi prefissati, ottenuta con scabrezza calibrata e livello in Po pari a 25 m s.l.m. I valori in sinistra per i punti 1-12 non sono riportati a causa dell'assenza di una quota di contenimento. Altrove, i valori mancanti indicano portata compatibile superiore a 700 m³/s.

PUNTO	PORTATA COMPATIBILE (m ³ /s)							
	SPONDA SINISTRA				SPONDA DESTRA			
	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0
1								
2								
3								
4								
5					639			
6					586			
7					517	652		
8					447	554		
9					380	447	636	
10					363	424	578	
11					618			
12					511	695		
13	613				522	695		
14	463	568			523	656		
15	472	573			557	682		
16	403	468	589	699	538	643		
17	416	482	607		440	515	649	
18	444	506	612	697	411	468	563	646
19	391	442	526	601	403	457	545	622
20	422	478	569	645	381	429	506	579
21	425	478	565	638	401	452	533	604
22	386	431	501	564	400	447	522	586
23	328	364	421	471	421	471	547	612
24	367	408	471	526	424	473	547	609
25	378	420	483	538	483	538	618	682
26	393	437	500	556	474	526	603	664
27	381	421	481	531	410	453	517	572
28	347	384	438	482	381	421	479	528
29	377	416	472	519	371	409	465	510
30	340	376	427	469	351	388	441	484
31	358	394	447	490	373	410	464	508
32	343	379	430	471	356	392	444	487
33	346	382	434	476	366	403	457	500
34	404	445	502	550	356	393	446	489

Tabella 3.6. Portata compatibile con franchi prefissati, ottenuta con scabrezza calibrata e livello in Po pari a 29 m s.l.m. I valori in sinistra per i punti 1-12 non sono riportati a causa dell'assenza di una quota di contenimento. Altrove, i valori mancanti indicano portata compatibile superiore a 700 m³/s.

PUNTO	PORTATA COMPATIBILE (m ³ /s)							
	SPONDA SINISTRA				SPONDA DESTRA			
	Franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0
1					<200	225		
2					<200	268		
3					<200	328		
4					<200	<200	566	
5					<200	<200	523	
6					<200	228	569	
7					<200	212	545	
8					<200	<200	486	
9					<200	<200	385	609
10					<200	<200	371	590
11					460	673		
12					369	563		
13	500	684			398	580		
14	344	485	678		433	577		
15	376	503	676		486	616		
16	277	386	534	646	478	590		
17	304	411	555	664	346	453	599	
18	378	463	577	664	326	412	526	612
19	307	386	491	571	328	407	512	593
20	361	437	540	618	296	371	472	550
21	371	442	539	614	337	409	505	579
22	325	389	476	543	346	411	498	565
23	233	295	378	440	378	440	527	593
24	305	364	444	505	386	446	528	592
25	330	386	462	521	462	521	604	668
26	357	411	484	542	454	511	590	651
27	345	396	465	519	382	433	504	560
28	307	353	418	468	350	398	464	517
29	348	395	458	508	341	387	450	500
30	304	348	409	456	319	363	425	473
31	330	373	433	480	347	391	451	499
32	315	356	415	460	330	372	431	478
33	319	361	420	466	342	386	445	492
34	388	432	495	544	331	374	434	480

Tabella 3.7. Franco sinistro e destro per prefissate portate, ottenuto con scabrezza calibrata e livello in Po pari a 25 m s.l.m. I valori in sinistra per i punti 1-12 non sono riportati a causa dell'assenza di una quota di contenimento.

PUNTO	FRANCO SINISTRO (m)										
	Portata (m ³ /s)										
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
13	2.97	2.58	2.20	1.86	1.57	1.37	1.22	1.11	1.02	0.94	0.86
14	2.71	2.31	1.92	1.56	1.26	1.04	0.87	0.74	0.63	0.52	0.42
15	2.79	2.37	1.98	1.62	1.31	1.08	0.90	0.76	0.63	0.51	0.40
16	2.53	2.11	1.70	1.33	1.01	0.77	0.57	0.41	0.27	0.13	0.00
17	2.60	2.17	1.77	1.39	1.08	0.83	0.63	0.47	0.32	0.18	0.04
18	2.86	2.42	1.98	1.58	1.24	0.96	0.73	0.53	0.34	0.16	-0.01
19	2.58	2.13	1.69	1.28	0.94	0.65	0.41	0.20	0.00	-0.18	-0.37
20	2.79	2.33	1.89	1.48	1.13	0.84	0.59	0.37	0.17	-0.02	-0.21
21	2.84	2.37	1.92	1.50	1.15	0.85	0.59	0.36	0.15	-0.05	-0.24
22	2.65	2.16	1.70	1.27	0.90	0.58	0.30	0.06	-0.17	-0.38	-0.60
23	2.20	1.71	1.24	0.81	0.43	0.12	-0.17	-0.41	-0.65	-0.87	-1.09
24	2.53	2.04	1.57	1.13	0.75	0.42	0.13	-0.12	-0.37	-0.60	-0.83
25	2.62	2.13	1.65	1.21	0.83	0.50	0.20	-0.06	-0.31	-0.55	-0.78
26	2.76	2.27	1.78	1.34	0.95	0.61	0.30	0.03	-0.23	-0.47	-0.71
27	2.70	2.19	1.70	1.24	0.85	0.50	0.18	-0.10	-0.37	-0.63	-0.88
28	2.45	1.93	1.43	0.97	0.57	0.21	-0.12	-0.41	-0.69	-0.95	-1.21
29	2.72	2.20	1.69	1.22	0.82	0.45	0.11	-0.19	-0.48	-0.75	-1.02
30	2.41	1.89	1.38	0.91	0.50	0.13	-0.21	-0.51	-0.80	-1.08	-1.35
31	2.59	2.06	1.54	1.07	0.65	0.28	-0.07	-0.38	-0.68	-0.96	-1.24
32	2.44	1.92	1.41	0.94	0.52	0.15	-0.20	-0.51	-0.81	-1.10	-1.38
33	2.44	1.93	1.42	0.96	0.55	0.18	-0.17	-0.48	-0.78	-1.07	-1.35
34	2.90	2.40	1.90	1.44	1.03	0.66	0.32	0.00	-0.30	-0.58	-0.87
PUNTO	FRANCO DESTRO (m)										
	Portata (m ³ /s)										
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
1	3.31	3.09	2.91	2.76	2.63	2.52	2.36	2.24	2.13	2.02	1.92
2	3.20	2.95	2.72	2.52	2.35	2.21	2.02	1.87	1.74	1.60	1.48
3	3.16	2.89	2.65	2.44	2.27	2.12	1.91	1.76	1.61	1.47	1.34
4	2.85	2.58	2.33	2.11	1.93	1.77	1.56	1.41	1.27	1.14	1.01
5	2.71	2.43	2.16	1.93	1.74	1.58	1.38	1.23	1.10	0.97	0.85
6	2.67	2.36	2.07	1.81	1.60	1.42	1.23	1.09	0.97	0.85	0.74
7	2.57	2.24	1.93	1.66	1.43	1.24	1.04	0.92	0.80	0.70	0.61
8	2.42	2.08	1.74	1.44	1.19	0.99	0.81	0.71	0.62	0.53	0.45
9	2.22	1.85	1.49	1.16	0.89	0.69	0.53	0.43	0.35	0.28	0.21
10	2.14	1.76	1.40	1.07	0.80	0.60	0.44	0.34	0.26	0.20	0.13
11	2.90	2.52	2.16	1.83	1.55	1.35	1.20	1.10	1.02	0.96	0.89
12	2.75	2.37	1.99	1.65	1.37	1.17	1.02	0.92	0.84	0.76	0.69
13	2.80	2.41	2.03	1.69	1.40	1.20	1.05	0.94	0.85	0.77	0.69
14	2.90	2.50	2.11	1.75	1.45	1.23	1.06	0.93	0.82	0.71	0.61
15	3.05	2.63	2.24	1.88	1.57	1.34	1.16	1.02	0.89	0.77	0.66
16	3.08	2.66	2.25	1.88	1.56	1.32	1.12	0.96	0.82	0.68	0.55
17	2.72	2.29	1.89	1.51	1.20	0.95	0.75	0.59	0.44	0.30	0.16
18	2.68	2.24	1.80	1.40	1.06	0.78	0.55	0.35	0.16	-0.02	-0.19
19	2.66	2.21	1.77	1.36	1.02	0.73	0.49	0.28	0.08	-0.10	-0.29
20	2.53	2.07	1.63	1.22	0.87	0.58	0.33	0.11	-0.09	-0.28	-0.47
21	2.70	2.23	1.78	1.36	1.01	0.71	0.45	0.22	0.01	-0.19	-0.38
22	2.75	2.26	1.80	1.37	1.00	0.68	0.40	0.16	-0.07	-0.28	-0.50
23	2.90	2.41	1.94	1.51	1.13	0.82	0.53	0.29	0.05	-0.17	-0.39
24	2.94	2.45	1.98	1.54	1.16	0.83	0.54	0.29	0.04	-0.19	-0.42
25	3.32	2.83	2.35	1.91	1.53	1.20	0.90	0.64	0.39	0.15	-0.08
26	3.30	2.81	2.32	1.88	1.49	1.15	0.84	0.57	0.31	0.07	-0.17
27	2.92	2.41	1.92	1.46	1.07	0.72	0.40	0.12	-0.15	-0.41	-0.66
28	2.73	2.21	1.71	1.25	0.85	0.49	0.16	-0.13	-0.41	-0.67	-0.93
29	2.67	2.15	1.64	1.17	0.77	0.40	0.06	-0.24	-0.53	-0.80	-1.07
30	2.51	1.99	1.48	1.01	0.60	0.23	-0.11	-0.41	-0.70	-0.98	-1.25
31	2.71	2.18	1.66	1.19	0.77	0.40	0.05	-0.26	-0.56	-0.84	-1.12
32	2.55	2.03	1.52	1.05	0.63	0.26	-0.09	-0.40	-0.70	-0.99	-1.27
33	2.61	2.10	1.59	1.13	0.72	0.35	0.00	-0.31	-0.61	-0.90	-1.18
34	2.51	2.01	1.51	1.05	0.64	0.27	-0.07	-0.39	-0.69	-0.97	-1.26

Tabella 3.8. Franco sinistro e destro per prefissate portate, ottenuto con scabrezza calibrata e livello in Po pari a 29 m s.l.m. I valori in sinistra per i punti 1-12 non sono riportati a causa dell'assenza di una quota di contenimento.

PUNTO	FRANCO SINISTRO (m)										
	Portata (m ³ /s)										
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
13	1.54	1.44	1.35	1.25	1.17	1.08	1.00	0.92	0.84	0.76	0.67
14	1.33	1.22	1.10	0.99	0.88	0.77	0.67	0.57	0.46	0.36	0.25
15	1.43	1.31	1.18	1.06	0.94	0.82	0.71	0.59	0.48	0.36	0.24
16	1.21	1.08	0.94	0.80	0.66	0.52	0.39	0.26	0.12	-0.01	-0.14
17	1.29	1.16	1.01	0.87	0.73	0.59	0.45	0.31	0.18	0.04	-0.10
18	1.61	1.45	1.27	1.09	0.92	0.75	0.57	0.40	0.22	0.05	-0.13
19	1.40	1.22	1.03	0.83	0.65	0.45	0.27	0.08	-0.11	-0.29	-0.47
20	1.63	1.45	1.24	1.04	0.85	0.65	0.45	0.26	0.07	-0.12	-0.31
21	1.72	1.52	1.30	1.09	0.88	0.67	0.46	0.26	0.06	-0.14	-0.34
22	1.58	1.36	1.12	0.88	0.65	0.42	0.19	-0.03	-0.25	-0.47	-0.68
23	1.15	0.92	0.68	0.43	0.19	-0.05	-0.28	-0.51	-0.73	-0.95	-1.17
24	1.52	1.28	1.03	0.77	0.52	0.27	0.03	-0.21	-0.45	-0.67	-0.90
25	1.70	1.44	1.16	0.89	0.63	0.36	0.11	-0.14	-0.38	-0.62	-0.85
26	1.90	1.63	1.33	1.04	0.76	0.48	0.22	-0.04	-0.29	-0.53	-0.77
27	1.90	1.60	1.28	0.97	0.68	0.38	0.10	-0.17	-0.43	-0.68	-0.93
28	1.69	1.38	1.04	0.72	0.41	0.10	-0.19	-0.47	-0.74	-1.00	-1.26
29	2.01	1.68	1.33	0.99	0.67	0.35	0.05	-0.24	-0.52	-0.80	-1.07
30	1.73	1.39	1.03	0.68	0.36	0.04	-0.27	-0.56	-0.85	-1.12	-1.39
31	1.94	1.59	1.21	0.86	0.52	0.19	-0.13	-0.43	-0.72	-1.01	-1.28
32	1.85	1.49	1.11	0.74	0.40	0.07	-0.25	-0.56	-0.85	-1.14	-1.42
33	1.88	1.52	1.14	0.77	0.43	0.10	-0.22	-0.52	-0.82	-1.11	-1.39
34	2.36	2.00	1.62	1.25	0.92	0.58	0.27	-0.04	-0.34	-0.62	-0.90
PUNTO	FRANCO DESTRO (m)										
	Portata (m ³ /s)										
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
1	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.61	0.58	0.56	0.53	0.50	0.47
2	0.74	0.71	0.68	0.65	0.61	0.57	0.53	0.48	0.43	0.39	0.34
3	0.79	0.76	0.72	0.68	0.64	0.59	0.54	0.48	0.42	0.37	0.31
4	0.67	0.63	0.59	0.54	0.49	0.44	0.38	0.32	0.26	0.20	0.13
5	0.64	0.60	0.55	0.50	0.45	0.39	0.33	0.27	0.20	0.14	0.08
6	0.73	0.68	0.63	0.57	0.51	0.45	0.39	0.32	0.26	0.20	0.13
7	0.71	0.66	0.60	0.54	0.48	0.42	0.36	0.29	0.23	0.16	0.10
8	0.65	0.60	0.54	0.47	0.41	0.35	0.28	0.22	0.15	0.09	0.02
9	0.55	0.49	0.42	0.35	0.28	0.21	0.15	0.08	0.01	-0.05	-0.12
10	0.56	0.48	0.41	0.33	0.26	0.19	0.12	0.05	-0.01	-0.08	-0.15
11	1.42	1.33	1.24	1.16	1.09	1.01	0.94	0.87	0.80	0.73	0.66
12	1.30	1.21	1.12	1.03	0.95	0.87	0.80	0.72	0.64	0.57	0.49
13	1.37	1.27	1.18	1.08	1.00	0.91	0.83	0.75	0.67	0.59	0.50
14	1.52	1.41	1.29	1.18	1.07	0.96	0.86	0.76	0.65	0.55	0.44
15	1.69	1.57	1.44	1.32	1.20	1.08	0.97	0.85	0.74	0.62	0.50
16	1.76	1.63	1.49	1.35	1.21	1.07	0.94	0.81	0.67	0.54	0.41
17	1.41	1.28	1.13	0.99	0.85	0.71	0.57	0.43	0.30	0.16	0.02
18	1.43	1.27	1.09	0.91	0.74	0.57	0.39	0.22	0.04	-0.13	-0.31
19	1.48	1.30	1.11	0.91	0.73	0.53	0.35	0.16	-0.03	-0.21	-0.39
20	1.37	1.19	0.98	0.78	0.59	0.39	0.19	0.00	-0.19	-0.38	-0.57
21	1.58	1.38	1.16	0.95	0.74	0.53	0.32	0.12	-0.08	-0.28	-0.48
22	1.68	1.46	1.22	0.98	0.75	0.52	0.29	0.07	-0.15	-0.37	-0.58
23	1.85	1.62	1.38	1.13	0.89	0.65	0.42	0.19	-0.03	-0.25	-0.47
24	1.93	1.69	1.44	1.18	0.93	0.68	0.44	0.20	-0.04	-0.26	-0.49
25	2.40	2.14	1.86	1.59	1.33	1.06	0.81	0.56	0.32	0.08	-0.15
26	2.44	2.17	1.87	1.58	1.30	1.02	0.76	0.50	0.25	0.01	-0.23
27	2.12	1.82	1.50	1.19	0.90	0.60	0.32	0.05	-0.21	-0.46	-0.71
28	1.97	1.66	1.32	1.00	0.69	0.38	0.09	-0.19	-0.46	-0.72	-0.98
29	1.96	1.63	1.28	0.94	0.62	0.30	0.00	-0.29	-0.57	-0.85	-1.12
30	1.83	1.49	1.13	0.78	0.46	0.14	-0.17	-0.46	-0.75	-1.02	-1.29
31	2.06	1.71	1.33	0.98	0.64	0.31	-0.01	-0.31	-0.60	-0.89	-1.16
32	1.96	1.60	1.22	0.85	0.51	0.18	-0.14	-0.45	-0.74	-1.03	-1.31
33	2.05	1.69	1.31	0.94	0.60	0.27	-0.05	-0.35	-0.65	-0.94	-1.22
34	1.97	1.61	1.23	0.86	0.53	0.19	-0.12	-0.43	-0.73	-1.01	-1.29

3.5 Valutazione dell'incertezza

Al fine di valutare l'incertezza sulle portate compatibili per franchi prefissati, sono state ripetute le simulazioni in moto permanente per portate comprese tra 200 e 900 m³/s con valori di scabrezza incrementati e ridotti del 15%. Le simulazioni sono limitate al caso di livello del Po a valle di 22 m s.l.m. In realtà, per una valutazione cautelativa delle portate compatibili, è possibile considerare solo i risultati relativi ad una scabrezza maggiorata, che sono riportati nel seguito. Nella Tabella 3.9 sono mostrate le portate compatibili per franchi prefissati, mentre nella Tabella 3.10 e nella Tabella 3.11 sono mostrati, per valori discreti di portata, i franchi in sinistra e destra rispettivamente.

Tabella 3.9. Portata compatibile con franchi prefissati, ottenuta con scabrezza maggiorata del 15% e livello in Po pari a 22 m s.l.m. I valori in sinistra per i punti 1-12 e 35-44 non sono riportati a causa dell'assenza di una quota di contenimento. Altrove, i valori mancanti indicano portata compatibile superiore a 900 m³/s.

PUNTO	PORTATA COMPATIBILE (m ³ /s)							
	SPONDA SINISTRA				SPONDA DESTRA			
	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0
1								
2					836			
3					768	886		
4					650	766		
5					589	707	885	
6					540	667	868	
7					475	600	820	
8					416	510	741	
9					352	416	588	792
10					338	393	532	738
11					562	772		
12					467	636	892	
13	556	730			475	629	862	
14	425	521	696	832	480	601	783	
15	433	524	680	800	510	624	784	
16	373	428	538	638	491	587	724	827
17	381	437	548	645	400	466	586	684
18	405	462	558	636	378	427	513	589
19	360	403	479	547	371	417	496	567
20	386	435	517	586	350	392	461	526
21	387	434	511	577	368	410	482	546
22	354	394	456	513	367	408	475	533
23	302	336	385	429	385	429	498	556
24	338	374	430	479	388	431	498	555
25	346	383	439	488	439	488	561	619
26	360	397	454	504	431	477	546	601
27	349	384	437	483	375	412	470	519
28	319	351	397	438	349	384	435	479
29	346	380	429	472	341	374	423	464
30	313	344	389	427	323	355	400	440
31	330	362	407	446	342	375	422	463
32	316	348	392	430	328	360	405	444
33	319	351	396	434	337	370	417	457

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce d'espansione

PUNTO	PORTATA COMPATIBILE (m ³ /s)							
	SPONDA SINISTRA				SPONDA DESTRA			
	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0
34	371	405	459	502	328	361	407	446
35					338	372	421	462
36					341	377	429	472
37					358	395	450	496
38					342	379	433	477
39					324	361	413	456
40					320	357	408	451
41					325	363	416	460
42					336	375	431	477
43					348	388	447	494
44					342	386	451	502
45	318	361	425	478	332	376	442	496
46	329	371	433	485	302	342	400	450
47	349	390	452	500	299	337	391	437
48	348	387	445	492	306	343	395	439
49	337	374	428	473	284	318	367	405
50	340	378	433	479	319	356	408	453
51	350	387	442	487	314	350	400	442
52	344	380	433	475	288	321	368	405
53	318	352	400	440	307	342	389	428
54	348	383	435	477	293	326	373	409
55	350	384	435	476	300	334	380	416
56	337	372	420	460	308	342	388	426
57	358	392	444	485	297	331	376	412
58	352	385	434	473	291	323	367	401
59	340	373	419	456	302	335	378	412
60	345	378	424	462	300	333	377	411
61	321	354	398	435	289	320	364	397
62	345	378	425	463	288	319	363	396
63	349	382	430	469	304	338	382	418
64	351	384	433	471	277	307	352	385
65	337	371	417	456	306	340	385	421
66	347	382	431	471	300	335	381	417
67	340	375	424	465	299	334	381	418
68	273	305	353	389	305	341	389	430
69	303	339	389	431	300	337	386	428
70	320	357	408	453	294	330	380	420
71	261	298	349	388	296	335	387	430
72	290	331	385	429	274	314	369	411
73	289	330	386	431	291	333	389	434
74	324	367	426	475	287	330	386	433
75	346	388	451	499	308	350	408	456
76	333	376	437	486	340	383	445	494
77	345	388	452	501	356	400	465	514
78	356	401	467	518	367	413	479	530
79	350	396	463	514	352	397	464	515
80	358	405	473	525	334	380	446	498
81	315	361	426	478	315	361	426	478
82	358	403	469	519	321	365	427	477
83	341	385	449	499	376	423	489	539
84	326	369	432	482	352	396	461	512
85	357	402	468	518	360	405	471	521
86	328	373	436	486	362	408	475	525
87	362	408	475	526	374	421	489	539
88	325	370	434	484	367	414	481	532
89	343	389	455	507	389	439	507	558
90	319	365	430	481	400	450	519	570
91	322	369	434	486	376	426	494	546
92	364	413	483	535	368	417	486	539
93	336	385	454	506	295	343	408	461
94	329	377	446	499	343	392	462	515

*Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce
d'espansione*

PUNTO	PORTATA COMPATIBILE (m ³ /s)							
	SPONDA SINISTRA				SPONDA DESTRA			
	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0
95	359	409	480	533	392	444	516	569
96	355	406	477	531	367	418	490	544
97	347	398	470	524	345	396	468	522
98	303	354	424	479	315	366	437	492
99	269	324	396	451	336	390	464	520
100	286	342	416	473	347	403	479	536
101	319	377	455	513	419	478	555	611
102	303	364	445	506	392	454	534	593
103	284	348	432	495	396	459	542	602
104	293	357	444	510	372	437	525	589
105	284	347	434	502	338	403	493	561
106	239	302	393	465	344	414	511	582
107	248	314	408	483	332	403	503	577
108	221	285	382	460	323	398	501	578
109	204	265	359	436	337	413	518	596
110	229	299	403	486	324	403	514	596
111	263	336	444	529	282	357	467	551
112	222	290	396	482	285	362	476	564
113	274	351	465	554	289	368	483	572
114	238	308	417	506	293	371	488	579
115		261	361	448	275	350	466	557
116	295	373	490	583	289	365	481	574
117	284	343	435	514	281	339	430	508
118	415	494	609	704	280	337	430	510
119	547	637	773	889	310	376	478	564
120	306	375	481	568	402	483	601	698
121	352	431	550	648	471	562	697	815
122	573	672	829		787			
123	798				740	862		
124	712	825			841			
125	745	869			800			
126					773			
127					798			
128					854			
129								
130								
131								
132								
133								
134								
135								
136								
137								
138								
139								
140								
141								
142								
143								
144								
145								
146	877							
147	539	662	847					
148	529	649	834					
149	888				763			
150	790				488	622	862	
151					594	756		
152								
153								
154								

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casse d'espansione

PUNTO	PORTATA COMPATIBILE (m³/s)							
	SPONDA SINISTRA				SPONDA DESTRA			
	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0	franco 1 m	franco 70 cm	franco 30 cm	franco 0
155								
156								
157								
158								
159								
160								
161								
162								

Tabella 3.10. Franco sinistro per prefissate portate, ottenuto con scabrezza maggiorata del 15% e livello in Po pari a 22 m s.l.m. I valori in sinistra per i punti 1-12 e 35-44 non sono riportati a causa dell'assenza di una quota di contenimento.

PUNTO	FRANCO SINISTRO (m)															
	Portata (m³/s)															
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13	3.14	2.51	2.05	1.68	1.42	1.23	1.11	1.01	0.92	0.84	0.75	0.67	0.58	0.49	0.40	
14	2.87	2.23	1.76	1.39	1.11	0.89	0.75	0.63	0.51	0.40	0.29	0.18	0.07	-0.04	-0.16	
15	2.93	2.29	1.81	1.43	1.15	0.92	0.77	0.63	0.50	0.37	0.25	0.13	0.00	-0.13	-0.25	
16	2.66	2.01	1.53	1.14	0.83	0.60	0.42	0.26	0.11	-0.03	-0.18	-0.32	-0.47	-0.62	-0.76	
17	2.71	2.07	1.58	1.19	0.88	0.64	0.46	0.29	0.14	-0.02	-0.17	-0.32	-0.47	-0.62	-0.78	
18	2.95	2.29	1.78	1.37	1.03	0.75	0.53	0.33	0.14	-0.05	-0.24	-0.43	-0.62	-0.80	-0.98	
19	2.66	1.99	1.48	1.07	0.72	0.43	0.20	-0.01	-0.22	-0.42	-0.61	-0.81	-1.00	-1.19	-1.37	
20	2.85	2.19	1.68	1.26	0.90	0.61	0.37	0.15	-0.06	-0.27	-0.47	-0.67	-0.86	-1.06	-1.25	
21	2.89	2.22	1.70	1.27	0.90	0.60	0.35	0.12	-0.10	-0.32	-0.53	-0.74	-0.95	-1.15	-1.35	
22	2.68	2.00	1.47	1.03	0.65	0.33	0.06	-0.19	-0.43	-0.66	-0.89	-1.11	-1.33	-1.55	-1.76	
23	2.23	1.55	1.01	0.57	0.18	-0.14	-0.41	-0.67	-0.91	-1.15	-1.38	-1.61	-1.84	-2.05	-2.27	
24	2.55	1.87	1.34	0.89	0.50	0.17	-0.12	-0.38	-0.64	-0.88	-1.13	-1.36	-1.59	-1.82	-2.04	
25	2.62	1.95	1.42	0.97	0.56	0.23	-0.07	-0.34	-0.61	-0.86	-1.11	-1.35	-1.58	-1.81	-2.04	
26	2.75	2.08	1.54	1.09	0.67	0.33	0.02	-0.26	-0.54	-0.80	-1.05	-1.30	-1.54	-1.78	-2.01	
27	2.67	1.99	1.45	0.99	0.56	0.21	-0.11	-0.41	-0.69	-0.96	-1.22	-1.48	-1.73	-1.97	-2.21	
28	2.41	1.73	1.18	0.71	0.28	-0.09	-0.42	-0.72	-1.02	-1.30	-1.57	-1.84	-2.10	-2.36	-2.61	
29	2.67	1.99	1.43	0.96	0.52	0.14	-0.19	-0.51	-0.81	-1.10	-1.39	-1.66	-1.93	-2.20	-2.46	
30	2.35	1.67	1.12	0.65	0.20	-0.18	-0.51	-0.83	-1.14	-1.43	-1.72	-2.00	-2.27	-2.53	-2.80	
31	2.53	1.84	1.28	0.81	0.35	-0.03	-0.38	-0.71	-1.02	-1.32	-1.62	-1.90	-2.19	-2.46	-2.73	
32	2.38	1.71	1.15	0.68	0.23	-0.16	-0.51	-0.83	-1.15	-1.46	-1.75	-2.04	-2.32	-2.60	-2.87	
33	2.37	1.72	1.18	0.71	0.26	-0.12	-0.47	-0.80	-1.12	-1.42	-1.72	-2.01	-2.29	-2.56	-2.84	
34	2.83	2.19	1.65	1.19	0.74	0.36	0.01	-0.32	-0.63	-0.94	-1.24	-1.52	-1.81	-2.08	-2.35	
35																
36																
37																
38																
39																
40																
41																
42																
43																
44																
45	2.04	1.55	1.13	0.77	0.44	0.16	-0.13	-0.41	-0.69	-0.97	-1.25	-1.52	-1.79	-2.06	-2.32	
46	2.15	1.65	1.21	0.84	0.50	0.20	-0.09	-0.38	-0.67	-0.95	-1.23	-1.51	-1.78	-2.05	-2.31	

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce d'espansione

PUNTO	FRANCO SINISTRO (m)														
	Portata (m ³ /s)														
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
47	2.36	1.83	1.38	0.99	0.63	0.31	0.00	-0.30	-0.60	-0.90	-1.19	-1.47	-1.76	-2.03	-2.31
48	2.41	1.86	1.39	0.99	0.60	0.27	-0.05	-0.37	-0.68	-0.99	-1.29	-1.59	-1.88	-2.17	-2.45
49	2.36	1.79	1.31	0.89	0.50	0.15	-0.18	-0.51	-0.83	-1.14	-1.45	-1.75	-2.05	-2.34	-2.63
50	2.35	1.80	1.32	0.92	0.53	0.19	-0.14	-0.46	-0.77	-1.08	-1.38	-1.68	-1.97	-2.26	-2.54
51	2.47	1.90	1.42	1.00	0.60	0.25	-0.09	-0.42	-0.74	-1.06	-1.37	-1.67	-1.97	-2.26	-2.55
52	2.46	1.88	1.38	0.95	0.54	0.18	-0.17	-0.51	-0.84	-1.16	-1.48	-1.79	-2.09	-2.39	-2.69
53	2.26	1.66	1.16	0.72	0.30	-0.07	-0.42	-0.77	-1.10	-1.43	-1.75	-2.07	-2.38	-2.68	-2.98
54	2.52	1.92	1.42	0.98	0.56	0.19	-0.16	-0.51	-0.84	-1.17	-1.49	-1.80	-2.11	-2.41	-2.71
55	2.55	1.95	1.44	1.00	0.56	0.19	-0.17	-0.52	-0.86	-1.20	-1.52	-1.84	-2.16	-2.46	-2.76
56	2.45	1.84	1.33	0.89	0.45	0.08	-0.29	-0.63	-0.98	-1.31	-1.64	-1.95	-2.27	-2.57	-2.88
57	2.63	2.03	1.51	1.07	0.63	0.26	-0.11	-0.45	-0.79	-1.12	-1.45	-1.77	-2.08	-2.38	-2.68
58	2.62	2.00	1.47	1.01	0.57	0.17	-0.20	-0.56	-0.91	-1.26	-1.60	-1.92	-2.25	-2.56	-2.87
59	2.54	1.91	1.37	0.91	0.45	0.05	-0.34	-0.71	-1.07	-1.42	-1.77	-2.11	-2.44	-2.77	-3.09
60	2.57	1.95	1.41	0.95	0.49	0.09	-0.29	-0.66	-1.02	-1.37	-1.72	-2.06	-2.39	-2.72	-3.04
61	2.34	1.72	1.19	0.74	0.28	-0.12	-0.50	-0.87	-1.23	-1.58	-1.93	-2.27	-2.60	-2.92	-3.24
62	2.54	1.93	1.41	0.95	0.50	0.10	-0.28	-0.65	-1.01	-1.36	-1.71	-2.05	-2.38	-2.70	-3.02
63	2.52	1.95	1.44	0.99	0.54	0.14	-0.24	-0.61	-0.97	-1.32	-1.66	-2.00	-2.33	-2.65	-2.97
64	2.52	1.96	1.45	1.01	0.56	0.16	-0.22	-0.59	-0.95	-1.30	-1.64	-1.98	-2.31	-2.64	-2.95
65	2.35	1.82	1.32	0.88	0.44	0.05	-0.33	-0.70	-1.06	-1.41	-1.75	-2.08	-2.42	-2.74	-3.06
66	2.41	1.89	1.41	0.98	0.54	0.16	-0.21	-0.58	-0.93	-1.28	-1.62	-1.96	-2.29	-2.61	-2.93
67	2.34	1.83	1.34	0.91	0.48	0.11	-0.26	-0.62	-0.97	-1.32	-1.66	-1.99	-2.32	-2.64	-2.96
68	1.72	1.22	0.75	0.32	-0.09	-0.44	-0.78	-1.13	-1.47	-1.81	-2.15	-2.48	-2.81	-3.12	-3.44
69	1.95	1.47	1.02	0.61	0.21	-0.13	-0.47	-0.81	-1.15	-1.49	-1.82	-2.15	-2.47	-2.79	-3.11
70	2.07	1.61	1.16	0.76	0.36	0.02	-0.32	-0.66	-1.00	-1.33	-1.67	-2.00	-2.32	-2.64	-2.95
71	1.51	1.09	0.68	0.30	-0.09	-0.42	-0.75	-1.09	-1.43	-1.76	-2.09	-2.41	-2.74	-3.05	-3.37
72	1.68	1.30	0.93	0.56	0.19	-0.13	-0.45	-0.78	-1.10	-1.43	-1.76	-2.08	-2.40	-2.71	-3.02
73	1.66	1.28	0.92	0.56	0.20	-0.12	-0.43	-0.75	-1.07	-1.40	-1.72	-2.04	-2.35	-2.66	-2.97
74	1.89	1.52	1.17	0.82	0.46	0.15	-0.16	-0.47	-0.79	-1.11	-1.43	-1.74	-2.05	-2.36	-2.67
75	2.05	1.68	1.32	0.97	0.62	0.30	0.00	-0.32	-0.64	-0.95	-1.27	-1.58	-1.90	-2.21	-2.51
76	1.97	1.59	1.23	0.88	0.53	0.22	-0.08	-0.39	-0.71	-1.02	-1.33	-1.64	-1.95	-2.25	-2.55
77	2.06	1.68	1.31	0.96	0.62	0.31	0.01	-0.30	-0.61	-0.92	-1.23	-1.53	-1.84	-2.14	-2.44
78	2.12	1.74	1.38	1.04	0.71	0.40	0.11	-0.19	-0.50	-0.80	-1.11	-1.41	-1.71	-2.01	-2.31
79	2.07	1.69	1.34	1.00	0.67	0.37	0.08	-0.22	-0.52	-0.82	-1.12	-1.42	-1.72	-2.02	-2.32
80	2.10	1.73	1.38	1.05	0.73	0.44	0.15	-0.14	-0.44	-0.74	-1.04	-1.34	-1.63	-1.93	-2.22
81	1.81	1.44	1.10	0.77	0.45	0.16	-0.13	-0.41	-0.71	-1.00	-1.30	-1.59	-1.89	-2.18	-2.47
82	2.14	1.75	1.39	1.05	0.72	0.41	0.11	-0.18	-0.49	-0.79	-1.09	-1.39	-1.69	-1.98	-2.27
83	2.04	1.65	1.28	0.94	0.60	0.29	-0.01	-0.31	-0.61	-0.91	-1.21	-1.51	-1.81	-2.11	-2.40
84	1.93	1.54	1.18	0.83	0.50	0.19	-0.11	-0.41	-0.71	-1.01	-1.32	-1.61	-1.91	-2.21	-2.50
85	2.15	1.75	1.39	1.05	0.71	0.41	0.11	-0.19	-0.50	-0.80	-1.10	-1.40	-1.70	-1.99	-2.28
86	1.94	1.55	1.19	0.85	0.52	0.22	-0.08	-0.38	-0.68	-0.98	-1.28	-1.58	-1.87	-2.17	-2.46
87	2.16	1.77	1.42	1.08	0.75	0.45	0.15	-0.14	-0.44	-0.74	-1.04	-1.33	-1.63	-1.92	-2.21
88	1.91	1.52	1.17	0.83	0.50	0.20	-0.09	-0.39	-0.69	-0.98	-1.28	-1.57	-1.87	-2.16	-2.45
89	2.01	1.63	1.29	0.95	0.63	0.33	0.04	-0.25	-0.55	-0.84	-1.14	-1.43	-1.73	-2.02	-2.31
90	1.83	1.47	1.13	0.80	0.48	0.18	-0.11	-0.40	-0.70	-0.99	-1.28	-1.58	-1.87	-2.16	-2.45
91	1.83	1.47	1.14	0.82	0.50	0.21	-0.08	-0.37	-0.66	-0.96	-1.25	-1.54	-1.84	-2.12	-2.41
92	2.06	1.73	1.41	1.09	0.78	0.49	0.20	-0.09	-0.38	-0.67	-0.96	-1.25	-1.54	-1.83	-2.12
93	1.87	1.54	1.23	0.92	0.61	0.32	0.04	-0.25	-0.54	-0.83	-1.12	-1.41	-1.70	-1.98	-2.27
94	1.81	1.49	1.18	0.87	0.56	0.28	-0.01	-0.29	-0.58	-0.87	-1.16	-1.44	-1.73	-2.02	-2.31
95	1.98	1.66	1.36	1.05	0.75	0.47	0.19	-0.09	-0.38	-0.67	-0.96	-1.24	-1.53	-1.82	-2.10
96	1.94	1.63	1.33	1.03	0.73	0.45	0.17	-0.11	-0.39	-0.67	-0.96	-1.25	-1.54	-1.82	-2.11
97	1.88	1.57	1.28	0.98	0.69	0.41	0.13	-0.14	-0.43	-0.71	-1.00	-1.28	-1.57	-1.85	-2.14
98	1.61	1.31	1.02	0.73	0.43	0.16	-0.12	-0.39	-0.67	-0.96	-1.24	-1.53	-1.81	-2.10	-2.38
99	1.37	1.10	0.83	0.55	0.28	0.01	-0.26	-0.53	-0.81	-1.09	-1.37	-1.65	-1.93	-2.22	-2.50
100	1.44	1.19	0.92	0.66	0.38	0.12	-0.14	-0.41	-0.68	-0.95	-1.23	-1.51	-1.79	-2.07	-2.35
101	1.60	1.35	1.10	0.84	0.58	0.32	0.07	-0.19	-0.46	-0.73	-1.01	-1.28	-1.56	-1.84	-2.12
102	1.49	1.26	1.02	0.77	0.52	0.28	0.03	-0.22	-0.48	-0.74	-1.01	-1.28	-1.55	-1.82	-2.09
103	1.39	1.16	0.93	0.69	0.45	0.21	-0.02	-0.27	-0.52	-0.78	-1.04	-1.30	-1.57	-1.84	-2.11
104	1.45	1.20	0.96	0.73	0.50	0.27	0.05	-0.18	-0.42	-0.66	-0.91	-1.17	-1.43	-1.69	-1.95
105	1.42	1.17	0.92	0.68	0.45	0.23	0.01	-0.21	-0.44	-0.67	-0.91	-1.16	-1.41	-1.66	-1.92
106	1.19	0.94	0.71	0.48	0.27	0.06	-0.14	-0.35	-0.57	-0.79	-1.02	-1.25	-1.49	-1.73	-1.98
107	1.24	0.99	0.76	0.54	0.33	0.13	-0.07	-0.27	-0.48	-0.69	-0.91	-1.14	-1.37	-1.61	-1.85
108	1.10	0.86	0.64	0.43	0.23	0.04	-0.15	-0.35	-0.55	-0.75	-0.97	-1.18	-1.41	-1.64	-1.88
109	1.02	0.77	0.54	0.34	0.14	-0.05	-0.24	-0.43	-0.62	-0.82	-1.03	-1.24	-1.46	-1.69	-1.92
110	1.14	0.90	0.69	0.50	0.31	0.13	-0.05	-0.23	-0.42	-0.61	-0.80	-1.01	-1.22	-1.43	-1.66
111	1.29	1.05	0.84	0.65	0.46	0.28	0.10	-0.08	-0.26	-0.44	-0.63	-0.83	-1.04	-1.25	-1.47

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casse d'espansione

PUNTO	FRANCO SINISTRO (m)															
	Portata (m ³ /s)															
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	
112	1.11	0.87	0.66	0.47	0.28	0.11	-0.06	-0.23	-0.41	-0.58	-0.77	-0.96	-1.16	-1.37	-1.58	
113	1.34	1.10	0.89	0.70	0.52	0.35	0.18	0.01	-0.16	-0.33	-0.51	-0.70	-0.90	-1.10	-1.30	
114	1.19	0.94	0.73	0.54	0.36	0.19	0.02	-0.14	-0.31	-0.48	-0.66	-0.84	-1.02	-1.22	-1.42	
115	1.00	0.75	0.53	0.34	0.16	-0.01	-0.17	-0.34	-0.50	-0.67	-0.84	-1.01	-1.20	-1.39	-1.58	
116	1.46	1.20	0.98	0.78	0.60	0.43	0.27	0.11	-0.05	-0.21	-0.38	-0.54	-0.71	-0.88	-1.06	
117	1.48	1.19	0.92	0.67	0.44	0.24	0.05	-0.13	-0.31	-0.48	-0.65	-0.80	-0.96	-1.10	-1.25	
118	2.15	1.81	1.53	1.28	1.06	0.86	0.68	0.50	0.33	0.17	0.01	-0.13	-0.27	-0.41	-0.54	
119	2.60	2.26	1.99	1.75	1.54	1.34	1.16	0.99	0.82	0.66	0.50	0.36	0.23	0.10	-0.03	
120	1.65	1.28	1.03	0.80	0.60	0.41	0.23	0.06	-0.11	-0.27	-0.42	-0.56	-0.69	-0.82	-0.94	
121	1.90	1.50	1.23	1.01	0.81	0.63	0.46	0.30	0.14	-0.01	-0.15	-0.28	-0.41	-0.52	-0.64	
122	2.74	2.32	2.04	1.81	1.61	1.42	1.24	1.07	0.91	0.76	0.62	0.49	0.37	0.25	0.14	
123	3.47	3.05	2.75	2.51	2.29	2.09	1.91	1.73	1.56	1.40	1.26	1.12	1.00	0.88	0.77	
124	3.33	2.91	2.61	2.35	2.13	1.92	1.72	1.53	1.35	1.19	1.03	0.89	0.76	0.64	0.52	
125	3.57	3.09	2.73	2.43	2.18	1.96	1.76	1.58	1.42	1.26	1.12	0.99	0.86	0.74	0.63	
126	3.95	3.49	3.13	2.84	2.59	2.37	2.18	2.00	1.84	1.70	1.56	1.44	1.32	1.20	1.10	
127	4.31	3.85	3.48	3.17	2.90	2.67	2.45	2.26	2.08	1.92	1.78	1.64	1.52	1.40	1.28	
128	4.96	4.48	4.11	3.82	3.56	3.34	3.13	2.95	2.78	2.62	2.48	2.34	2.22	2.10	1.99	
129	5.30	4.80	4.41	4.09	3.82	3.58	3.36	3.15	2.97	2.80	2.64	2.49	2.35	2.21	2.09	
130	5.29	4.79	4.39	4.06	3.78	3.52	3.28	3.07	2.86	2.68	2.51	2.34	2.19	2.04	1.90	
131	5.65	5.12	4.69	4.34	4.05	3.77	3.52	3.29	3.07	2.87	2.68	2.50	2.33	2.16	2.00	
132	5.86	5.32	4.88	4.53	4.22	3.93	3.68	3.44	3.22	3.01	2.82	2.63	2.45	2.28	2.12	
133	6.09	5.55	5.12	4.76	4.44	4.15	3.89	3.64	3.42	3.21	3.01	2.82	2.63	2.46	2.29	
134	6.08	5.58	5.16	4.81	4.51	4.23	3.97	3.73	3.51	3.30	3.10	2.91	2.73	2.56	2.39	
135	6.05	5.55	5.14	4.79	4.49	4.22	3.96	3.72	3.50	3.29	3.08	2.89	2.71	2.53	2.36	
136	6.10	5.59	5.17	4.84	4.54	4.27	4.01	3.76	3.54	3.32	3.12	2.93	2.74	2.56	2.39	
137	6.69	6.15	5.70	5.34	5.04	4.76	4.51	4.27	4.05	3.85	3.65	3.47	3.29	3.12	2.95	
138	6.53	5.99	5.54	5.19	4.90	4.63	4.39	4.16	3.94	3.74	3.54	3.36	3.18	3.00	2.84	
139	6.85	6.29	5.82	5.46	5.15	4.87	4.61	4.36	4.14	3.92	3.72	3.52	3.33	3.15	2.98	
140	6.95	6.37	5.88	5.50	5.19	4.90	4.64	4.40	4.18	3.96	3.76	3.56	3.37	3.19	3.02	
141	7.47	6.89	6.39	5.99	5.67	5.38	5.11	4.87	4.64	4.42	4.22	4.02	3.83	3.65	3.48	
142	7.38	6.76	6.24	5.83	5.50	5.22	4.96	4.73	4.51	4.30	4.10	3.91	3.73	3.55	3.38	
143	7.71	7.09	6.55	6.13	5.79	5.50	5.24	5.00	4.78	4.57	4.38	4.19	4.01	3.84	3.67	
144	7.30	6.67	6.13	5.69	5.34	5.04	4.77	4.52	4.29	4.07	3.87	3.67	3.49	3.31	3.14	
145	4.22	4.06	3.92	3.78	3.66	3.54	3.42	3.31	3.20	3.09	2.99	2.89	2.79	2.69	2.60	
146	2.71	2.51	2.35	2.21	2.07	1.94	1.82	1.70	1.58	1.47	1.36	1.26	1.15	1.05	0.95	
147	2.12	1.88	1.69	1.53	1.38	1.24	1.10	0.97	0.85	0.73	0.61	0.50	0.40	0.29	0.19	
148	2.14	1.90	1.69	1.53	1.37	1.22	1.08	0.94	0.82	0.70	0.58	0.47	0.37	0.27	0.17	
149	2.89	2.61	2.39	2.20	2.04	1.91	1.78	1.66	1.55	1.45	1.35	1.25	1.16	1.07	0.98	
150	2.79	2.48	2.25	2.04	1.85	1.69	1.56	1.44	1.33	1.24	1.15	1.06	0.98	0.91	0.83	
151	3.13	2.78	2.53	2.31	2.13	1.98	1.84	1.72	1.61	1.51	1.41	1.33	1.25	1.18	1.11	
152	3.22	2.84	2.58	2.38	2.22	2.06	1.92	1.78	1.66	1.55	1.44	1.35	1.26	1.17	1.09	
153	3.76	3.36	3.08	2.86	2.66	2.47	2.29	2.13	1.98	1.84	1.72	1.61	1.51	1.41	1.31	
154	3.94	3.50	3.16	2.89	2.66	2.45	2.27	2.10	1.94	1.80	1.67	1.55	1.44	1.33	1.23	
155	4.25	3.81	3.46	3.17	2.92	2.69	2.49	2.30	2.15	2.01	1.88	1.74	1.62	1.50	1.39	
156	4.68	4.23	3.87	3.58	3.32	3.09	2.88	2.70	2.54	2.40	2.26	2.13	2.00	1.88	1.77	
157	4.90	4.54	4.23	3.96	3.71	3.49	3.28	3.10	2.94	2.79	2.65	2.51	2.38	2.25	2.13	
158	4.88	4.53	4.24	3.98	3.75	3.53	3.32	3.14	2.97	2.81	2.66	2.51	2.37	2.24	2.11	
159	4.70	4.33	4.02	3.75	3.50	3.28	3.06	2.86	2.67	2.49	2.32	2.16	2.00	1.85	1.72	
160	4.83	4.43	4.09	3.79	3.52	3.26	3.03	2.81	2.60	2.40	2.21	2.02	1.85	1.69	1.53	
161	5.13	4.74	4.41	4.10	3.83	3.57	3.34	3.11	2.90	2.70	2.51	2.33	2.16	1.99	1.84	
162	5.62	5.24	4.92	4.63	4.37	4.13	3.91	3.69	3.49	3.30	3.11	2.94	2.77	2.61	2.45	

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casse d'espansione

Tabella 3.11. Franco destro per prefissate portate, ottenuto con scabrezza maggiorata del 15% e livello in Po pari a 22 m s.l.m.

PUNTO	FRANCO DESTRO (m)														
	Portata (m ³ /s)														
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
1	4.17	3.47	3.03	2.79	2.64	2.41	2.27	2.14	2.01	1.90	1.78	1.67	1.57	1.47	1.37
2	3.98	3.25	2.79	2.51	2.34	2.08	1.92	1.76	1.61	1.47	1.34	1.21	1.09	0.97	0.85
3	3.82	3.14	2.69	2.42	2.24	1.97	1.80	1.63	1.48	1.33	1.18	1.05	0.92	0.79	0.67
4	3.35	2.73	2.32	2.06	1.88	1.61	1.44	1.29	1.14	1.00	0.86	0.74	0.62	0.50	0.38
5	3.17	2.54	2.13	1.86	1.68	1.42	1.26	1.11	0.97	0.84	0.72	0.60	0.48	0.37	0.27
6	3.06	2.42	2.01	1.71	1.52	1.26	1.11	0.97	0.85	0.74	0.63	0.53	0.43	0.33	0.24
7	2.92	2.28	1.85	1.54	1.32	1.07	0.93	0.81	0.70	0.60	0.51	0.42	0.33	0.25	0.16
8	2.74	2.09	1.64	1.31	1.08	0.84	0.72	0.62	0.53	0.45	0.37	0.29	0.20	0.12	0.04
9	2.49	1.83	1.37	1.01	0.77	0.56	0.45	0.36	0.28	0.21	0.14	0.06	-0.01	-0.09	-0.17
10	2.37	1.73	1.27	0.91	0.66	0.46	0.35	0.27	0.19	0.12	0.05	-0.02	-0.09	-0.16	-0.24
11	3.09	2.47	2.01	1.66	1.41	1.21	1.10	1.02	0.94	0.87	0.80	0.73	0.66	0.59	0.51
12	2.93	2.30	1.84	1.48	1.23	1.04	0.93	0.84	0.75	0.68	0.60	0.53	0.45	0.37	0.29
13	2.97	2.34	1.88	1.51	1.25	1.06	0.94	0.84	0.75	0.67	0.58	0.50	0.41	0.32	0.23
14	3.06	2.42	1.95	1.58	1.30	1.08	0.94	0.82	0.70	0.59	0.48	0.37	0.26	0.15	0.04
15	3.19	2.55	2.07	1.69	1.41	1.18	1.03	0.89	0.76	0.63	0.51	0.39	0.26	0.13	0.01
16	3.21	2.56	2.08	1.69	1.38	1.15	0.97	0.81	0.66	0.52	0.37	0.23	0.08	-0.07	-0.21
17	2.83	2.19	1.70	1.31	1.00	0.76	0.58	0.41	0.26	0.10	-0.05	-0.20	-0.35	-0.50	-0.66
18	2.77	2.11	1.60	1.19	0.85	0.57	0.35	0.15	-0.04	-0.23	-0.42	-0.61	-0.80	-0.98	-1.16
19	2.74	2.07	1.56	1.15	0.80	0.51	0.28	0.07	-0.14	-0.34	-0.53	-0.73	-0.92	-1.11	-1.29
20	2.59	1.93	1.42	1.00	0.64	0.35	0.11	-0.11	-0.32	-0.53	-0.73	-0.93	-1.12	-1.32	-1.51
21	2.75	2.08	1.56	1.13	0.76	0.46	0.21	-0.02	-0.24	-0.46	-0.67	-0.88	-1.09	-1.29	-1.49
22	2.78	2.10	1.57	1.13	0.75	0.43	0.16	-0.09	-0.33	-0.56	-0.79	-1.01	-1.23	-1.45	-1.66
23	2.93	2.25	1.71	1.27	0.88	0.56	0.29	0.03	-0.21	-0.45	-0.68	-0.91	-1.14	-1.35	-1.57
24	2.96	2.28	1.75	1.30	0.91	0.58	0.29	0.03	-0.23	-0.47	-0.72	-0.95	-1.18	-1.41	-1.63
25	3.32	2.65	2.12	1.67	1.26	0.93	0.63	0.36	0.09	-0.16	-0.41	-0.65	-0.88	-1.11	-1.34
26	3.29	2.62	2.08	1.63	1.21	0.87	0.56	0.28	0.01	-0.26	-0.51	-0.76	-1.00	-1.24	-1.47
27	2.89	2.21	1.67	1.21	0.78	0.43	0.11	-0.19	-0.47	-0.74	-1.00	-1.26	-1.51	-1.75	-1.99
28	2.69	2.01	1.46	0.99	0.56	0.19	-0.14	-0.44	-0.74	-1.02	-1.29	-1.56	-1.82	-2.08	-2.33
29	2.62	1.94	1.38	0.91	0.47	0.09	-0.24	-0.56	-0.86	-1.15	-1.44	-1.71	-1.98	-2.25	-2.51
30	2.45	1.77	1.22	0.75	0.30	-0.08	-0.41	-0.73	-1.04	-1.33	-1.62	-1.90	-2.17	-2.43	-2.70
31	2.65	1.96	1.40	0.93	0.47	0.09	-0.26	-0.59	-0.90	-1.20	-1.50	-1.78	-2.07	-2.34	-2.61
32	2.49	1.82	1.26	0.79	0.34	-0.05	-0.40	-0.72	-1.04	-1.35	-1.64	-1.93	-2.21	-2.49	-2.76
33	2.54	1.89	1.35	0.88	0.43	0.05	-0.30	-0.63	-0.95	-1.25	-1.55	-1.84	-2.12	-2.39	-2.67
34	2.44	1.80	1.26	0.80	0.35	-0.03	-0.38	-0.71	-1.02	-1.33	-1.63	-1.91	-2.20	-2.47	-2.74
35	2.51	1.87	1.34	0.89	0.46	0.08	-0.26	-0.58	-0.90	-1.20	-1.50	-1.78	-2.06	-2.34	-2.61
36	2.49	1.86	1.35	0.92	0.51	0.15	-0.18	-0.50	-0.81	-1.11	-1.41	-1.69	-1.98	-2.25	-2.52
37	2.59	1.99	1.49	1.07	0.66	0.30	-0.03	-0.35	-0.66	-0.96	-1.25	-1.54	-1.82	-2.09	-2.36
38	2.40	1.83	1.35	0.94	0.53	0.18	-0.15	-0.47	-0.78	-1.08	-1.37	-1.66	-1.94	-2.21	-2.48
39	2.20	1.66	1.20	0.79	0.39	0.04	-0.29	-0.61	-0.92	-1.22	-1.51	-1.80	-2.08	-2.35	-2.62
40	2.15	1.62	1.16	0.75	0.36	0.01	-0.32	-0.64	-0.95	-1.25	-1.54	-1.83	-2.11	-2.38	-2.65
41	2.11	1.63	1.19	0.80	0.41	0.07	-0.26	-0.57	-0.88	-1.18	-1.47	-1.76	-2.04	-2.31	-2.58
42	2.15	1.69	1.27	0.89	0.51	0.17	-0.15	-0.46	-0.77	-1.07	-1.36	-1.64	-1.92	-2.20	-2.47
43	2.20	1.75	1.35	0.98	0.62	0.28	-0.04	-0.35	-0.65	-0.95	-1.24	-1.52	-1.80	-2.07	-2.34
44	2.18	1.71	1.30	0.94	0.61	0.31	0.01	-0.28	-0.58	-0.87	-1.15	-1.43	-1.71	-1.98	-2.24
45	2.14	1.65	1.23	0.87	0.54	0.26	-0.03	-0.31	-0.59	-0.87	-1.15	-1.42	-1.69	-1.96	-2.22
46	1.95	1.45	1.01	0.64	0.30	0.00	-0.29	-0.58	-0.87	-1.15	-1.43	-1.71	-1.98	-2.25	-2.51
47	1.97	1.44	0.99	0.60	0.24	-0.08	-0.39	-0.69	-0.99	-1.29	-1.58	-1.86	-2.15	-2.42	-2.70
48	2.07	1.52	1.05	0.65	0.26	-0.07	-0.39	-0.71	-1.02	-1.33	-1.63	-1.93	-2.22	-2.51	-2.79
49	1.90	1.33	0.85	0.43	0.04	-0.31	-0.64	-0.97	-1.29	-1.60	-1.91	-2.21	-2.51	-2.80	-3.09
50	2.18	1.63	1.15	0.75	0.36	0.02	-0.31	-0.63	-0.94	-1.25	-1.55	-1.85	-2.14	-2.43	-2.71
51	2.17	1.60	1.12	0.70	0.30	-0.05	-0.39	-0.72	-1.04	-1.36	-1.67	-1.97	-2.27	-2.56	-2.85
52	1.96	1.38	0.88	0.45	0.04	-0.32	-0.67	-1.01	-1.34	-1.66	-1.98	-2.29	-2.59	-2.89	-3.19
53	2.17	1.57	1.07	0.63	0.21	-0.16	-0.51	-0.86	-1.19	-1.52	-1.84	-2.16	-2.47	-2.77	-3.07
54	2.03	1.43	0.93	0.49	0.07	-0.30	-0.65	-1.00	-1.33	-1.66	-1.98	-2.29	-2.60	-2.90	-3.20
55	2.11	1.51	1.00	0.56	0.12	-0.25	-0.61	-0.96	-1.30	-1.64	-1.96	-2.28	-2.60	-2.90	-3.20
56	2.19	1.58	1.07	0.63	0.19	-0.18	-0.55	-0.89	-1.24	-1.57	-1.90	-2.21	-2.53	-2.83	-3.14
57	2.09	1.49	0.97	0.53	0.09	-0.28	-0.65	-0.99	-1.33	-1.66	-1.99	-2.31	-2.62	-2.92	-3.22
58	2.06	1.44	0.91	0.45	0.01	-0.39	-0.76	-1.12	-1.47	-1.82	-2.16	-2.48	-2.81	-3.12	-3.43
59	2.19	1.56	1.02	0.56	0.10	-0.30	-0.69	-1.06	-1.42	-1.77	-2.12	-2.46	-2.79	-3.12	-3.44
60	2.16	1.54	1.00	0.54	0.08	-0.32	-0.70	-1.07	-1.43	-1.78	-2.13	-2.47	-2.80	-3.13	-3.45
61	2.03	1.41	0.88	0.43	-0.03	-0.43	-0.81	-1.18	-1.54	-1.89	-2.24	-2.58	-2.91	-3.23	-3.55

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce d'espansione

PUNTO	FRANCO SINISTRO (m)														
	Portata (m ³ /s)														
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
62	2.01	1.40	0.88	0.42	-0.03	-0.43	-0.81	-1.18	-1.54	-1.89	-2.24	-2.58	-2.91	-3.23	-3.55
63	2.12	1.55	1.04	0.59	0.14	-0.26	-0.64	-1.01	-1.37	-1.72	-2.06	-2.40	-2.73	-3.05	-3.37
64	1.83	1.27	0.76	0.32	-0.13	-0.53	-0.91	-1.28	-1.64	-1.99	-2.33	-2.67	-3.00	-3.33	-3.64
65	2.08	1.55	1.05	0.61	0.17	-0.23	-0.60	-0.97	-1.33	-1.68	-2.02	-2.35	-2.69	-3.01	-3.33
66	2.00	1.48	1.00	0.57	0.13	-0.25	-0.62	-0.99	-1.34	-1.69	-2.03	-2.37	-2.70	-3.02	-3.34
67	1.99	1.48	0.99	0.56	0.13	-0.24	-0.61	-0.97	-1.32	-1.67	-2.01	-2.34	-2.67	-2.99	-3.31
68	2.02	1.52	1.05	0.62	0.21	-0.14	-0.48	-0.83	-1.17	-1.51	-1.85	-2.18	-2.51	-2.82	-3.14
69	1.93	1.45	1.00	0.59	0.19	-0.15	-0.49	-0.83	-1.17	-1.51	-1.84	-2.17	-2.49	-2.81	-3.13
70	1.85	1.39	0.94	0.54	0.14	-0.20	-0.54	-0.88	-1.22	-1.55	-1.89	-2.22	-2.54	-2.86	-3.17
71	1.80	1.38	0.97	0.59	0.20	-0.13	-0.46	-0.80	-1.14	-1.47	-1.80	-2.12	-2.45	-2.76	-3.08
72	1.56	1.18	0.81	0.44	0.07	-0.25	-0.57	-0.90	-1.22	-1.55	-1.88	-2.20	-2.52	-2.83	-3.14
73	1.68	1.30	0.94	0.58	0.22	-0.10	-0.41	-0.73	-1.05	-1.38	-1.70	-2.02	-2.33	-2.64	-2.95
74	1.63	1.26	0.91	0.56	0.20	-0.11	-0.42	-0.73	-1.05	-1.37	-1.69	-2.00	-2.31	-2.62	-2.93
75	1.78	1.41	1.05	0.70	0.35	0.03	-0.27	-0.59	-0.91	-1.22	-1.54	-1.85	-2.17	-2.48	-2.78
76	2.02	1.64	1.28	0.93	0.58	0.27	-0.03	-0.34	-0.66	-0.97	-1.28	-1.59	-1.90	-2.20	-2.50
77	2.14	1.76	1.39	1.04	0.70	0.39	0.09	-0.22	-0.53	-0.84	-1.15	-1.45	-1.76	-2.06	-2.36
78	2.19	1.81	1.45	1.11	0.78	0.47	0.18	-0.12	-0.43	-0.73	-1.04	-1.34	-1.64	-1.94	-2.24
79	2.08	1.70	1.35	1.01	0.68	0.38	0.09	-0.21	-0.51	-0.81	-1.11	-1.41	-1.71	-2.01	-2.31
80	1.94	1.57	1.22	0.89	0.57	0.28	-0.01	-0.30	-0.60	-0.90	-1.20	-1.50	-1.79	-2.09	-2.38
81	1.81	1.44	1.10	0.77	0.45	0.16	-0.13	-0.41	-0.71	-1.00	-1.30	-1.59	-1.89	-2.18	-2.47
82	1.89	1.50	1.14	0.80	0.47	0.16	-0.14	-0.43	-0.74	-1.04	-1.34	-1.64	-1.94	-2.23	-2.52
83	2.28	1.89	1.52	1.18	0.84	0.53	0.23	-0.07	-0.37	-0.67	-0.97	-1.27	-1.57	-1.87	-2.16
84	2.11	1.72	1.36	1.01	0.68	0.37	0.07	-0.23	-0.53	-0.83	-1.14	-1.43	-1.73	-2.03	-2.32
85	2.17	1.77	1.41	1.07	0.73	0.43	0.13	-0.17	-0.48	-0.78	-1.08	-1.38	-1.68	-1.97	-2.26
86	2.17	1.78	1.42	1.08	0.75	0.45	0.15	-0.15	-0.45	-0.75	-1.05	-1.35	-1.64	-1.94	-2.23
87	2.24	1.85	1.50	1.16	0.83	0.53	0.23	-0.06	-0.36	-0.66	-0.96	-1.25	-1.55	-1.84	-2.13
88	2.19	1.80	1.45	1.11	0.78	0.48	0.19	-0.11	-0.41	-0.70	-1.00	-1.29	-1.59	-1.88	-2.17
89	2.31	1.93	1.59	1.25	0.93	0.63	0.34	0.05	-0.25	-0.54	-0.84	-1.13	-1.43	-1.72	-2.01
90	2.35	1.99	1.65	1.32	1.00	0.70	0.41	0.12	-0.18	-0.47	-0.76	-1.06	-1.35	-1.64	-1.93
91	2.18	1.82	1.49	1.17	0.85	0.56	0.27	-0.02	-0.31	-0.61	-0.90	-1.19	-1.49	-1.77	-2.06
92	2.08	1.75	1.43	1.11	0.80	0.51	0.22	-0.07	-0.36	-0.65	-0.94	-1.23	-1.52	-1.81	-2.10
93	1.61	1.28	0.97	0.66	0.35	0.06	-0.22	-0.51	-0.80	-1.09	-1.38	-1.67	-1.96	-2.24	-2.53
94	1.90	1.58	1.27	0.96	0.65	0.37	0.08	-0.20	-0.49	-0.78	-1.07	-1.35	-1.64	-1.93	-2.22
95	2.18	1.86	1.56	1.25	0.95	0.67	0.39	0.11	-0.18	-0.47	-0.76	-1.04	-1.33	-1.62	-1.90
96	2.01	1.70	1.40	1.10	0.80	0.52	0.24	-0.04	-0.32	-0.60	-0.89	-1.18	-1.47	-1.75	-2.04
97	1.87	1.56	1.27	0.97	0.68	0.40	0.12	-0.15	-0.44	-0.72	-1.01	-1.29	-1.58	-1.86	-2.15
98	1.68	1.38	1.09	0.80	0.50	0.23	-0.05	-0.32	-0.60	-0.89	-1.17	-1.46	-1.74	-2.03	-2.31
99	1.74	1.47	1.20	0.92	0.65	0.38	0.11	-0.16	-0.44	-0.72	-1.00	-1.28	-1.56	-1.85	-2.13
100	1.77	1.52	1.25	0.99	0.71	0.45	0.19	-0.08	-0.35	-0.62	-0.90	-1.18	-1.46	-1.74	-2.02
101	2.12	1.87	1.62	1.36	1.10	0.84	0.59	0.33	0.06	-0.21	-0.49	-0.76	-1.04	-1.32	-1.60
102	1.93	1.70	1.46	1.21	0.96	0.72	0.47	0.22	-0.04	-0.30	-0.57	-0.84	-1.11	-1.38	-1.65
103	1.92	1.69	1.46	1.22	0.98	0.74	0.51	0.26	0.01	-0.25	-0.51	-0.77	-1.04	-1.31	-1.58
104	1.82	1.57	1.33	1.10	0.87	0.64	0.42	0.19	-0.05	-0.29	-0.54	-0.80	-1.06	-1.32	-1.58
105	1.68	1.43	1.18	0.94	0.71	0.49	0.27	0.05	-0.18	-0.41	-0.65	-0.90	-1.15	-1.40	-1.66
106	1.68	1.43	1.20	0.97	0.76	0.55	0.35	0.14	-0.08	-0.30	-0.53	-0.76	-1.00	-1.24	-1.49
107	1.62	1.37	1.14	0.92	0.71	0.51	0.31	0.11	-0.10	-0.31	-0.53	-0.76	-0.99	-1.23	-1.47
108	1.56	1.32	1.10	0.89	0.69	0.50	0.31	0.11	-0.09	-0.29	-0.51	-0.72	-0.95	-1.18	-1.42
109	1.63	1.38	1.15	0.95	0.75	0.56	0.37	0.18	-0.01	-0.21	-0.42	-0.63	-0.85	-1.08	-1.31
110	1.54	1.30	1.09	0.90	0.71	0.53	0.35	0.17	-0.02	-0.21	-0.40	-0.61	-0.82	-1.03	-1.26
111	1.37	1.13	0.92	0.73	0.54	0.36	0.18	0.00	-0.18	-0.36	-0.55	-0.75	-0.96	-1.17	-1.39
112	1.39	1.15	0.94	0.75	0.56	0.39	0.22	0.05	-0.13	-0.30	-0.49	-0.68	-0.88	-1.09	-1.30
113	1.40	1.16	0.95	0.76	0.58	0.41	0.24	0.07	-0.10	-0.27	-0.45	-0.64	-0.84	-1.04	-1.24
114	1.43	1.18	0.97	0.78	0.60	0.43	0.26	0.10	-0.07	-0.24	-0.42	-0.60	-0.78	-0.98	-1.18
115	1.36	1.11	0.89	0.70	0.52	0.35	0.19	0.02	-0.14	-0.31	-0.48	-0.65	-0.84	-1.03	-1.22
116	1.43	1.17	0.95	0.75	0.57	0.40	0.24	0.08	-0.08	-0.24	-0.41	-0.57	-0.74	-0.91	-1.09
117	1.46	1.17	0.90	0.65	0.42	0.22	0.03	-0.15	-0.33	-0.50	-0.67	-0.82	-0.98	-1.12	-1.27
118	1.51	1.17	0.89	0.64	0.42	0.22	0.04	-0.14	-0.31	-0.47	-0.63	-0.77	-0.91	-1.05	-1.18
119	1.66	1.32	1.05	0.81	0.60	0.40	0.22	0.05	-0.12	-0.28	-0.44	-0.58	-0.71	-0.84	-0.97
120	2.06	1.69	1.44	1.21	1.01	0.82	0.64	0.47	0.30	0.14	-0.01	-0.15	-0.28	-0.41	-0.53
121	2.34	1.94	1.67	1.45	1.25	1.07	0.90	0.74	0.58	0.43	0.29	0.16	0.03	-0.08	-0.20
122	3.34	2.92	2.64	2.41	2.21	2.02	1.84	1.67	1.51	1.36	1.22	1.09	0.97	0.85	0.74
123	3.32	2.90	2.60	2.36	2.14	1.94	1.76	1.58	1.41	1.25	1.11	0.97	0.85	0.73	0.62
124	3.67	3.25	2.95	2.69	2.47	2.26	2.06	1.87	1.69	1.53	1.37	1.23	1.10	0.98	0.86
125	3.71	3.23	2.87	2.57	2.32	2.10	1.90	1.72	1.56	1.40	1.26	1.13	1.00	0.88	0.77
126	3.57	3.11	2.75	2.46	2.21	1.99	1.80	1.62	1.46	1.32	1.18	1.06	0.94	0.82	0.72

Analisi dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza a valle delle casce d'espansione

PUNTO	FRANCO SINISTRO (m)															
	Portata (m ³ /s)															
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	
127	3.79	3.33	2.96	2.65	2.38	2.15	1.93	1.74	1.56	1.40	1.26	1.12	1.00	0.88	0.76	
128	3.87	3.39	3.02	2.73	2.47	2.25	2.04	1.86	1.69	1.53	1.39	1.25	1.13	1.01	0.90	
129	4.86	4.36	3.97	3.65	3.38	3.14	2.92	2.71	2.53	2.36	2.20	2.05	1.91	1.77	1.65	
130	5.02	4.52	4.12	3.79	3.51	3.25	3.01	2.80	2.59	2.41	2.24	2.07	1.92	1.77	1.63	
131	5.23	4.70	4.27	3.92	3.63	3.35	3.10	2.87	2.65	2.45	2.26	2.08	1.91	1.74	1.58	
132	5.51	4.97	4.53	4.18	3.87	3.58	3.33	3.09	2.87	2.66	2.47	2.28	2.10	1.93	1.77	
133	5.58	5.04	4.61	4.25	3.93	3.64	3.38	3.13	2.91	2.70	2.50	2.31	2.12	1.95	1.78	
134	6.02	5.52	5.10	4.75	4.45	4.17	3.91	3.67	3.45	3.24	3.04	2.85	2.67	2.50	2.33	
135	6.25	5.75	5.34	4.99	4.69	4.42	4.16	3.92	3.70	3.49	3.28	3.09	2.91	2.73	2.56	
136	6.56	6.05	5.63	5.30	5.00	4.73	4.47	4.22	4.00	3.78	3.58	3.39	3.20	3.02	2.85	
137	6.49	5.95	5.50	5.14	4.84	4.56	4.31	4.07	3.85	3.65	3.45	3.27	3.09	2.92	2.75	
138	6.50	5.96	5.51	5.16	4.87	4.60	4.36	4.13	3.91	3.71	3.51	3.33	3.15	2.97	2.81	
139	5.44	4.88	4.41	4.05	3.74	3.46	3.20	2.95	2.73	2.51	2.31	2.11	1.92	1.74	1.57	
140	6.65	6.07	5.58	5.20	4.89	4.60	4.34	4.10	3.88	3.66	3.46	3.26	3.07	2.89	2.72	
141	6.88	6.30	5.80	5.40	5.08	4.79	4.52	4.28	4.05	3.83	3.63	3.43	3.24	3.06	2.89	
142	7.80	7.18	6.66	6.25	5.92	5.64	5.38	5.15	4.93	4.72	4.52	4.33	4.15	3.97	3.80	
143	7.75	7.13	6.59	6.17	5.83	5.54	5.28	5.04	4.82	4.61	4.42	4.23	4.05	3.88	3.71	
144	8.62	7.99	7.45	7.01	6.66	6.36	6.09	5.84	5.61	5.39	5.19	4.99	4.81	4.63	4.46	
145	5.42	5.26	5.12	4.98	4.86	4.74	4.62	4.51	4.40	4.29	4.19	4.09	3.99	3.89	3.80	
146	4.58	4.38	4.22	4.08	3.94	3.81	3.69	3.57	3.45	3.34	3.23	3.13	3.02	2.92	2.82	
147	4.35	4.11	3.92	3.76	3.61	3.47	3.33	3.20	3.08	2.96	2.84	2.73	2.63	2.52	2.42	
148	4.87	4.63	4.42	4.26	4.10	3.95	3.81	3.67	3.55	3.43	3.31	3.20	3.10	3.00	2.90	
149	2.66	2.38	2.16	1.97	1.81	1.68	1.55	1.43	1.32	1.22	1.12	1.02	0.93	0.84	0.75	
150	2.20	1.89	1.66	1.45	1.26	1.10	0.97	0.85	0.74	0.65	0.56	0.47	0.39	0.32	0.24	
151	2.51	2.16	1.91	1.69	1.51	1.36	1.22	1.10	0.99	0.89	0.79	0.71	0.63	0.56	0.49	
152	3.16	2.78	2.52	2.32	2.16	2.00	1.86	1.72	1.60	1.49	1.38	1.29	1.20	1.11	1.03	
153	3.86	3.46	3.18	2.96	2.76	2.57	2.39	2.23	2.08	1.94	1.82	1.71	1.61	1.51	1.41	
154	4.08	3.64	3.30	3.03	2.80	2.59	2.41	2.24	2.08	1.94	1.81	1.69	1.58	1.47	1.37	
155	4.00	3.56	3.21	2.92	2.67	2.44	2.24	2.05	1.90	1.76	1.63	1.49	1.37	1.25	1.14	
156	4.88	4.43	4.07	3.78	3.52	3.29	3.08	2.90	2.74	2.60	2.46	2.33	2.20	2.08	1.97	
157	5.46	5.10	4.79	4.52	4.27	4.05	3.84	3.66	3.50	3.35	3.21	3.07	2.94	2.81	2.69	
158	5.10	4.75	4.46	4.20	3.97	3.75	3.54	3.36	3.19	3.03	2.88	2.73	2.59	2.46	2.33	
159	4.85	4.48	4.17	3.90	3.65	3.43	3.21	3.01	2.82	2.64	2.47	2.31	2.15	2.00	1.87	
160	5.79	5.39	5.05	4.75	4.48	4.22	3.99	3.77	3.56	3.36	3.17	2.98	2.81	2.65	2.49	
161	6.04	5.65	5.32	5.01	4.74	4.48	4.25	4.02	3.81	3.61	3.42	3.24	3.07	2.90	2.75	
162	5.67	5.29	4.97	4.68	4.42	4.18	3.96	3.74	3.54	3.35	3.16	2.99	2.82	2.66	2.50	

3.6 Considerazioni conclusive sui risultati

Dall'analisi dei risultati emerge chiaramente che i tratti più "critici" risultano:

- in sinistra idraulica, il tratto tra l'attraversamento dell'autostrada A1 e Casaltone (punti 106-115), dove la portata di 300 m³/s transita con un franco inferiore a 1 m;
- in destra idraulica, il tratto a valle di Sorbolo fino a Lentigione (punti 46-74), dove la portata compatibile con franco 1 m è di poco superiore a 300 m³/s. Il punto più critico risulta il numero 64 (immediatamente a monte della rotta del dicembre 2017, in corrispondenza della rampa di accesso all'argine).

Nel tratto vallivo, all'aumentare del livello in Po la portata compatibile si riduce di 20-30 m³/s per i franchi di 0 e 30 cm fino a 80-90 m³/s per franchi superiori.

Considerando l'incertezza nella determinazione della scabrezza, il franco può ridursi anche di 20-30 cm per un prefissato valore di portata, ad eccezione dei valori di portata più elevati (in realtà incompatibili con l'alveo), per i quali le differenze possono raggiungere i 50 cm. La portata compatibile a parità di franco si riduce circa del 10% (tra 30 e 40 m³/s), ad eccezione del tratto di monte in cui si osservano variazioni superiori in virtù dell'ampiezza delle sezioni.

4 Valutazione degli scenari per onde di piena con tempo di ritorno assegnato

4.1 Acquisizione degli idrogrammi con assegnato tempo di ritorno

Le onde di piena con tempo di ritorno assegnato ($TR = 20, 50, 100, 200, 500$ anni) sono state fornite da ARPAE [13] per 5 sezioni: Vetto, a valle della confluenza con Tassobbio, Cerezzola, Guardasone e a valle della confluenza con Termina-Masdone.

Sono disponibili diverse tipologie di idrogrammi:

- Idrogrammi sintetici (Synthetic Design Hydrographs, SDH), costruiti secondo il metodo proposto da Tomirotti e Mignosa (2017) [12];
- Idrogrammi equiprobabili caratterizzati da coppie portata al colmo-volume di pari tempo di ritorno (copule, [14]). Le forme d'onda proposte sono: triangolare, serbatoio lineare, Nash, idrogramma sintetico.

Sono inoltre stati forniti idrogrammi aggiuntivi che tengono conto delle analisi sul cambiamento climatico.

Nel presente capitolo sono descritte le analisi di dettaglio effettuate per gli idrogrammi sintetici. I confronti con alcuni idrogrammi derivati dalle copule sono invece mostrati nel capitolo 5.

4.2 Modellazione 1D della propagazione degli idrogrammi sintetici lungo l'asta fluviale

Il modello 1D disponibile (descritto al capitolo 1) comprende il tratto di asta del fiume Enza tra la traversa di Guardasone e la confluenza in Po. Lungo tale tratto sono presenti non trascurabili contributi laterali, soprattutto in sinistra idraulica, rappresentati dai torrenti Termina e Masdone. Gli idrogrammi sintetici con assegnato tempo di ritorno sono stati forniti da ARPAE sia in corrispondenza della sezione di Guardasone sia in corrispondenza della sezione immediatamente a valle della confluenza Termina-Masdone. Per dedurre l'onda di piena da imporre in ingresso dal Termina-Masdone (per ciascun tempo di ritorno) congruente sia con l'idrogramma imposto a Guardasone sia con quello a valle della confluenza,

non è sufficiente calcolare semplicemente la differenza tra i due idrogrammi, poiché occorre tenere conto della propagazione in alveo. Sarebbe quindi necessario impostare un modello inverso, considerando come incognita l'idrogramma proveniente dagli affluenti, oltre che collocare temporalmente le due onde a Guardasone e a valle della confluenza medesima, visto che non si tratta di onde di piena "osservate" ma di idrogrammi sintetici privi di una esatta collocazione temporale relativa.

Per questo motivo si è preferito simulare i diversi scenari con prefissato tempo di ritorno separando il modello in due tratti:

- da Guardasone a valle confluenza Termina-Masdone, utilizzando in ingresso gli idrogrammi ricavati per la sezione di Guardasone;
- da valle confluenza Termina-Masdone alla confluenza in Po, utilizzando gli idrogrammi disponibili a valle della confluenza Termina-Masdone (Figura 4-1).

In questo secondo caso il modello 1D è stato dunque limitato al tratto a valle della confluenza stessa. L'idrogramma sintetico corrispondente a ciascun tempo di ritorno è stato imposto come condizione al contorno di monte per la simulazione della propagazione di tali onde di piena lungo l'asta fluviale, con particolare riferimento al funzionamento delle casse d'espansione. A tal fine risulta interessante quantificare, per i diversi tempi di ritorno, il volume di piena al di sopra di prefissate soglie di portata (Figura 4-2). Dalle curve dei volumi sopra soglia è possibile desumere, per un certo tempo di ritorno e assumendo un valore di portata che si ritiene compatibile con l'asta fluviale a valle, il volume che il sistema di casse dovrebbe laminare (con un funzionamento ideale) per garantire il transito dell'onda di piena in sicurezza. Ad esempio, ritenendo compatibile con l'asta fluviale a valle una portata di $350 \text{ m}^3/\text{s}$, le casse (con funzionamento ideale) dovrebbero invasare un volume di $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per $TR = 100$ anni e di $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per $TR = 200$ anni.

I principali risultati ottenuti da questa modellazione sono descritti ai paragrafi 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3.

Per individuare eventuali criticità dell'asta fluviale nel tratto a monte della confluenza Termina-Masdone, sono state effettuate simulazioni analoghe con il modello 1D completo (che parte quindi dalla traversa di Guardasone), imponendo come condizione al contorno di monte gli idrogrammi sintetici relativi alla sezione di Guardasone e trascurando il contributo di Termina e Masdone. Chiaramente, da questo secondo set di simulazioni sono stati estratti solo i risultati relativi al tratto Guardasone-confluenza Termina-Masdone (si veda il paragrafo 4.2.4).

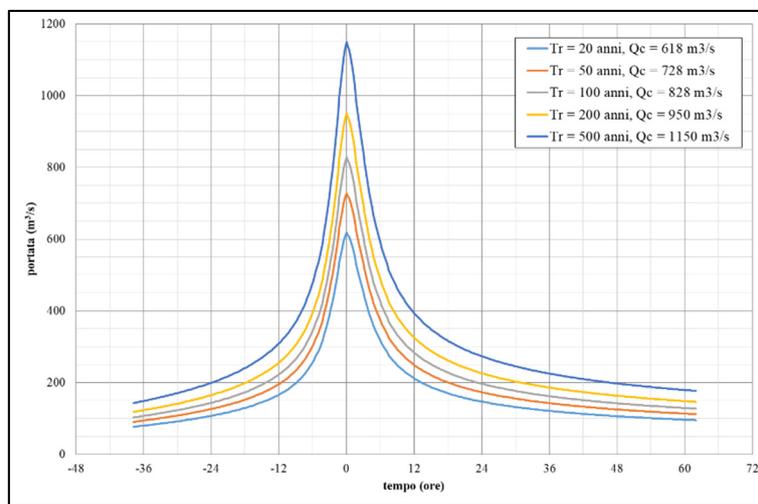


Figura 4-1. Idrogrammi sintetici a valle della confluenza Termina-Masdone per diversi tempi di ritorno.

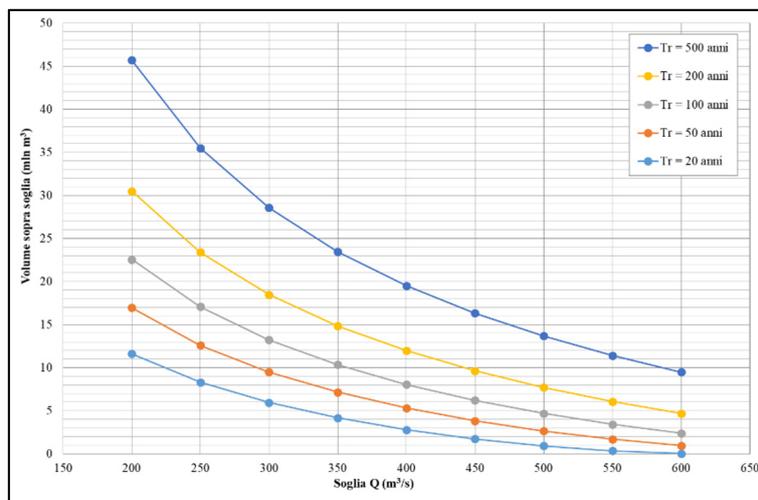


Figura 4-2. Volumi di piena al di sopra di prefissate soglie di portata per gli idrogrammi sintetici caratterizzati da diverso tempo di ritorno.

4.2.1 Propagazione lungo l'asta fluviale nel tratto compreso tra la confluenza Termina-Masdone e le casse

Dalle simulazioni sono stati estratti i massimi livelli idrici ottenuti, per i diversi tempi di ritorno, nel tratto di asta fluviale a monte delle casse d'espansione, utili a verificare la presenza di eventuali criticità nel tratto di alveo non soggetto a dettagliata modellazione 2D. Nella Figura 4-3 sono mostrate le mappe relative all'inviluppo delle massime quote idriche nel tratto considerato per i tre tempi di ritorno più elevati (TR = 100, 200, 500 anni).

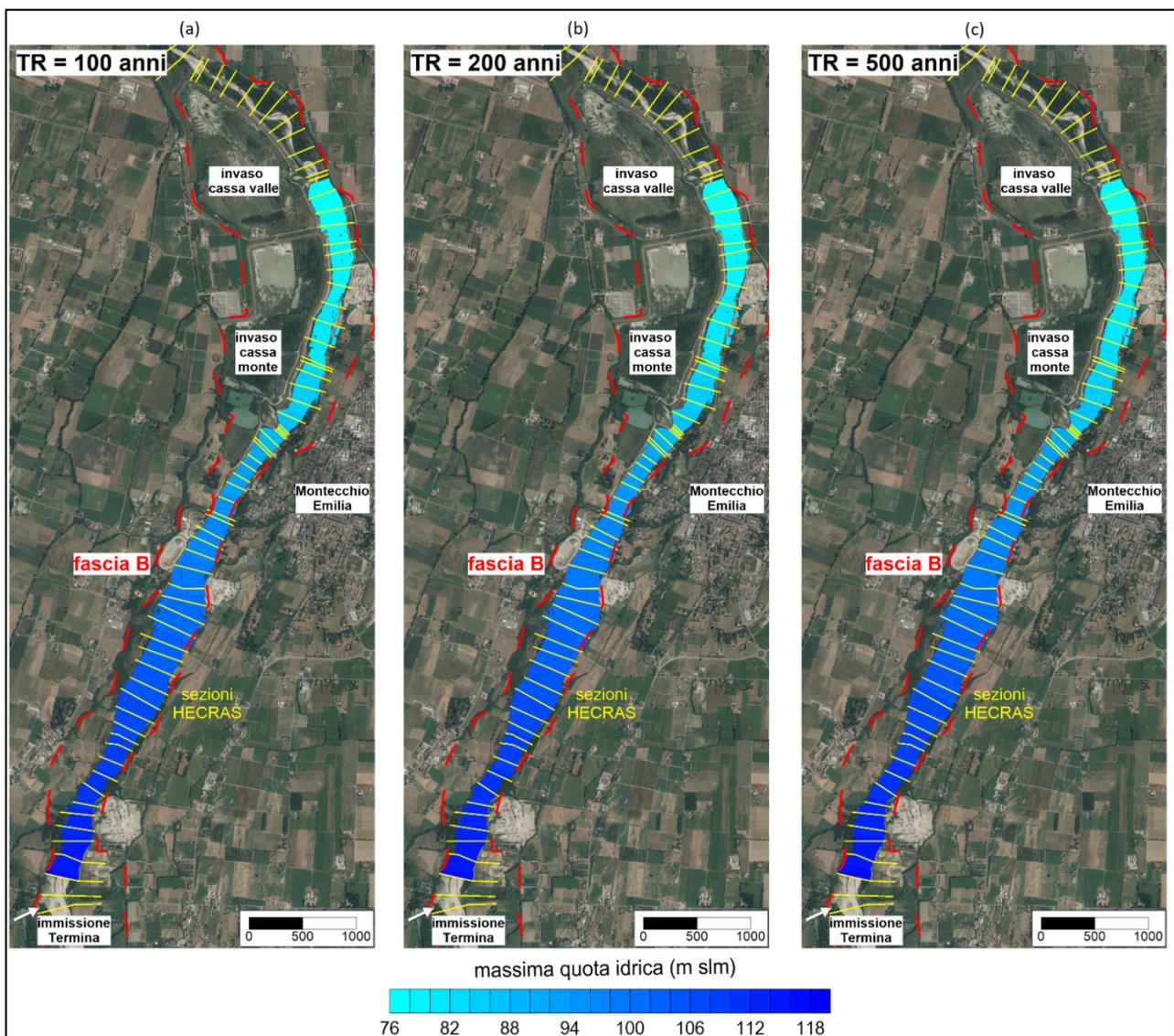


Figura 4-3. Massime quote idriche risultanti dalle simulazioni con modello 1D nel tratto tra la confluenza con Termina-Masdone e le casse d'espansione per (a) 100, (b) 200 e (c) 500 anni di tempo di ritorno. Ogni mappa è stata ottenuta per interpolazione tra le massime quote risultanti in ciascuna sezione (in giallo). La linea rossa identifica la Fascia B.

Tali mappe sono state ottenute interpolando linearmente tra le quote idriche massime ottenute per le diverse sezioni del modello 1D (strumento disponibile nel RAS Mapper). Tutti gli inviluppi sono ricompresi entro il tracciato della Fascia B, a parte una piccolissima zona in sponda destra compresa tra le sezioni 41057.4 e 40686.4 (a monte del ponte di Montecchio), che rimane comunque confinata dalla naturale altimetria del terreno.

4.2.2 Analisi del funzionamento delle casse

Dalla Figura 4-4 alla Figura 4-8 sono riportati i grafici che illustrano il funzionamento delle casse d'espansione per i diversi tempi di ritorno simulati. Nei grafici sono rappresentati contestualmente gli andamenti delle portate (in arrivo alla cassa, transitanti attraverso il manufatto in linea, sfioranti lateralmente nell'invaso fuori linea, rientranti in alveo dallo sfioratore di "troppo pieno", totali transitanti a valle della cassa) e dei livelli (a monte del manufatto, dentro l'invaso fuori linea), per ognuna delle due casse.

Per i tempi di ritorno inferiori (20 e 50 anni, Figura 4-4 e Figura 4-5 rispettivamente), una parte del volume di piena viene immagazzinato nella cassa fuori linea (sia di monte che di valle), ma i livelli raggiunti nell'invaso non sono tali da superare la quota dello sfioratore di "troppo pieno", che non entra mai in funzione. La portata uscente dal manufatto coincide dunque con la portata totale transitante a valle della cassa. Dall'analisi dei livelli a monte del manufatto è inoltre possibile osservare l'entrata in funzione dello sfioratore di superficie del manufatto in linea.

A partire da 100 anni di tempo di ritorno, si verifica invece il "rientro" di una parte del volume immagazzinato nelle casse verso l'alveo a valle, in virtù dell'entrata in funzione dello sfioratore di "troppo pieno". Ciò genera la formazione di un secondo picco di portata nell'idrogramma transitante a valle delle casse (dato dalla somma della portata che transita dal manufatto in linea e di quella restituita dal "troppo pieno"). L'effetto è particolarmente evidente per l'evento di 500 anni di tempo di ritorno, in cui il secondo picco di portata presenta un colmo superiore al primo (Figura 4-8). Dalle simulazioni degli eventi di questi

tempi di ritorno risulta anche che, nella prima fase della piena, lo scaricatore di troppo pieno funziona "al contrario", consentendo a parte del volume transitato in alveo a valle del manufatto principale di entrare nella cassa attraverso il troppo pieno stesso.

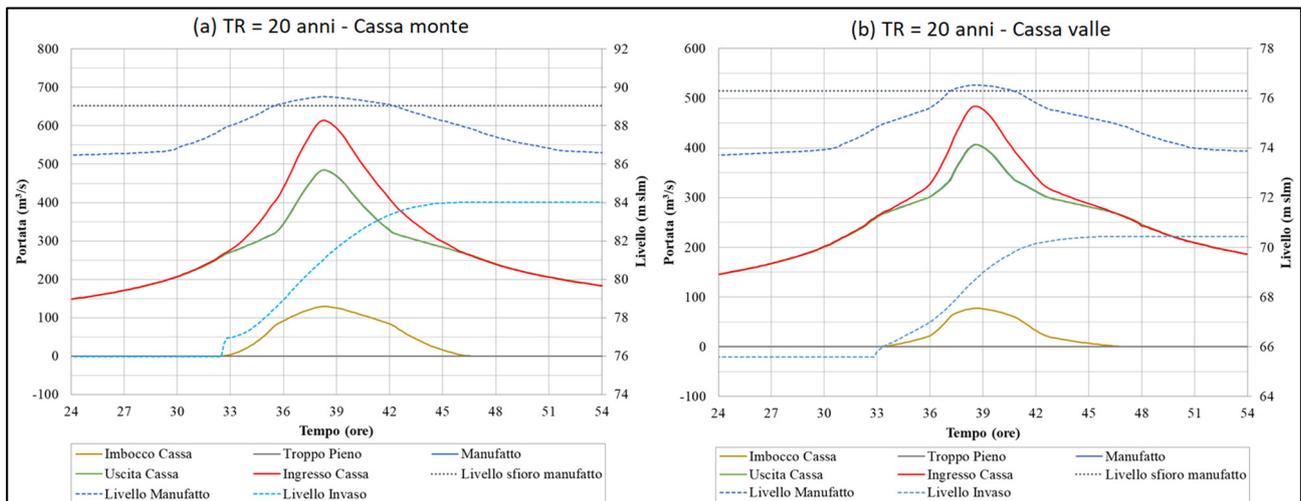


Figura 4-4. Funzionamento delle casse d'espansione per l'idrogramma sintetico con TR = 20 anni: (a) cassa di monte, (b) cassa di valle. Sono indicati contestualmente gli andamenti delle portate (linee continue, asse a sinistra) e dei livelli (linee tratteggiate, asse a destra).

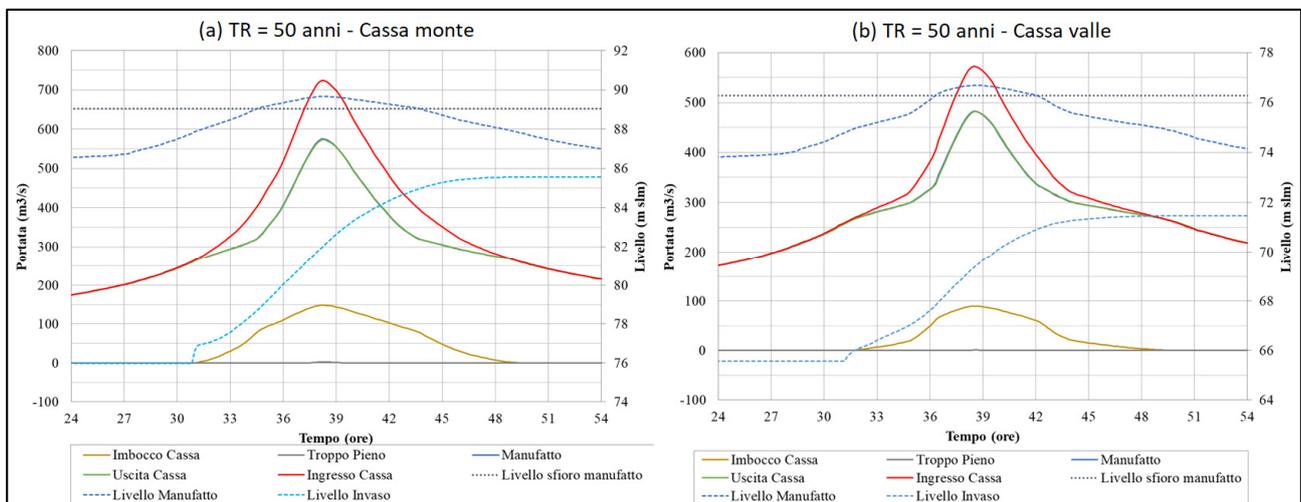


Figura 4-5. Funzionamento delle casse d'espansione per l'idrogramma sintetico con TR = 50 anni: (a) cassa di monte, (b) cassa di valle. Sono indicati contestualmente gli andamenti delle portate (linee continue, asse a sinistra) e dei livelli (linee tratteggiate, asse a destra).

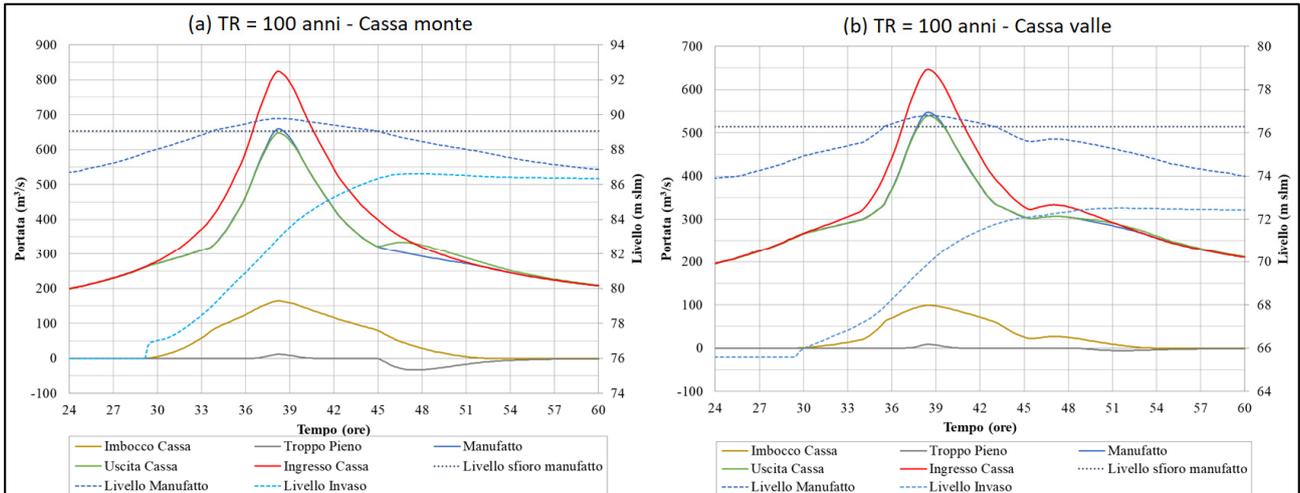


Figura 4-6. Funzionamento delle casse d’espansione per l’idrogramma sintetico con TR = 100 anni: (a) cassa di monte, (b) cassa di valle. Sono indicati contestualmente gli andamenti delle portate (linee continue, asse a sinistra) e dei livelli (linee tratteggiate, asse a destra).

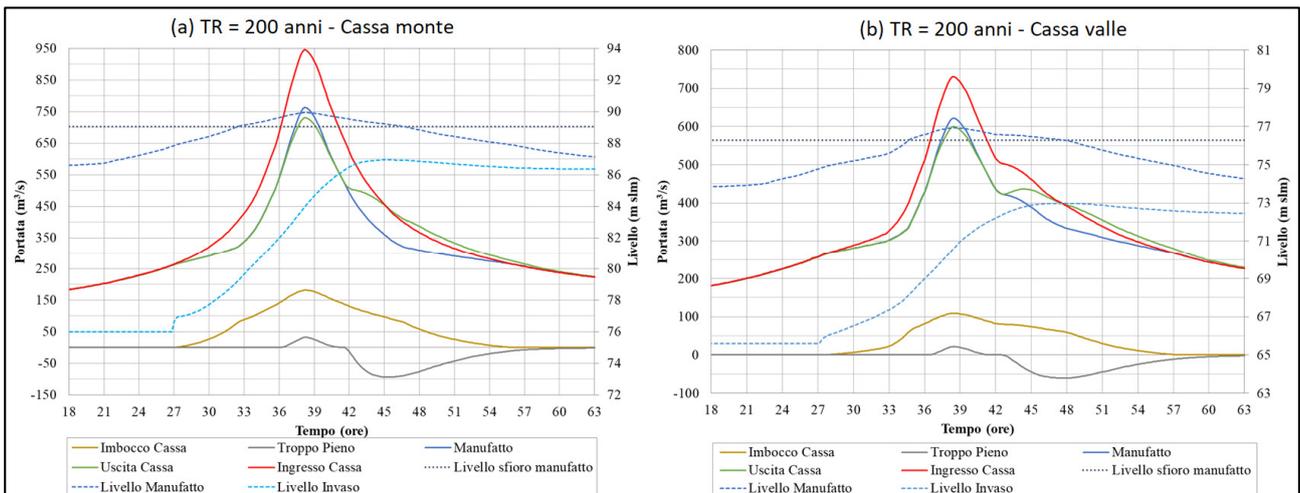


Figura 4-7. Funzionamento delle casse d’espansione per l’idrogramma sintetico con TR = 200 anni: (a) cassa di monte, (b) cassa di valle. Sono indicati contestualmente gli andamenti delle portate (linee continue, asse a sinistra) e dei livelli (linee tratteggiate, asse a destra).

Nella Tabella 4.1 sono sintetizzati i massimi livelli idrici raggiunti all’interno delle casse fuori linea per i diversi tempi di ritorno, nonché i volumi invasati. Si ricorda che il volume totale immagazzinabile nei due invasi al di sotto della quota dello sfioratore di “troppo pieno” è di poco inferiore a $9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Le casse risultano completamente riempite per gli eventi con tempo di ritorno superiore a 100 anni:

in questi casi viene sfruttato anche il volume disponibile al di sopra dello sfioratore di "troppo pieno".

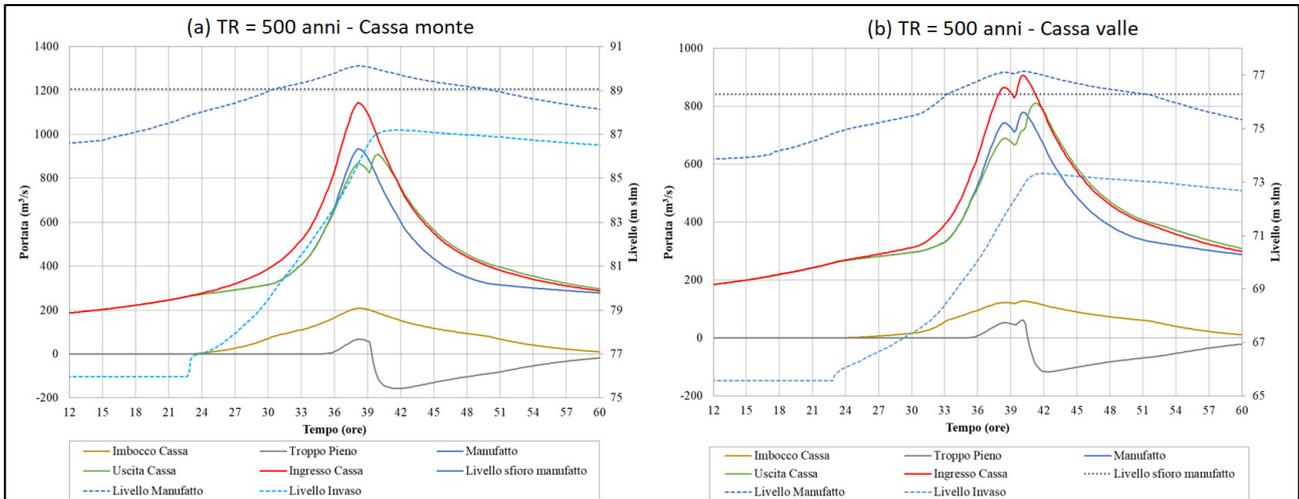


Figura 4-8. Funzionamento delle casse d’espansione per l’idrogramma sintetico con TR = 500 anni: (a) cassa di monte, (b) cassa di valle. Sono indicati contestualmente gli andamenti delle portate (linee continue, asse a sinistra) e dei livelli (linee tratteggiate, asse a destra).

La Tabella 4.2 riporta i valori della portata al colmo in alcune sezioni significative. In particolare, i valori relativi alle sezioni in ingresso e in uscita dal sistema di casse e ad una sezione intermedia tra le due casse consentono di quantificare l’efficienza di ognuna delle due casse, nonché del sistema complessivo. L’efficienza è definita come:

$$e = \frac{Q_{c, \text{ingresso cassa}} - Q_{c, \text{uscita cassa}}}{Q_{c, \text{ingresso cassa}}} \cdot 100$$

ed è riportata, per ciascun tempo di ritorno, nella Tabella 4.3 e nella Figura 4-9. Il sistema di casse mantiene una buona efficienza fino a 200 anni di tempo di ritorno (il colmo di portata in arrivo è ridotto del 33-36%), mentre per il tempo di ritorno più elevato (500 anni) si ha un calo dell’efficienza, specialmente per quanto riguarda la cassa di valle.

Tabella 4.1. Livelli massimi raggiunti e volumi immagazzinati nelle casse per diversi tempi di ritorno. Si ricorda che la quota dello sfioratore di troppo pieno è pari a 86.31 m s.l.m. per la cassa di monte e a 72.4 m s.l.m. per la cassa di valle.

Idrogramma sintetico	Livello max cassa (m s.l.m.)		Volume immagazzinato nelle casse ($\cdot 10^6$ m ³)		
	Monte	Valle	Monte	Valle	Totale
TR = 20 anni	84.02	70.44	3.41	1.58	4.99
TR = 50 anni	85.56	71.46	4.83	2.36	7.19
TR = 100 anni	86.63	72.52	5.89	3.35	9.24
TR = 200 anni	86.94	72.99	6.22	3.82	10.04
TR = 500 anni	87.20	73.32	6.50	4.15	10.65

Tabella 4.2. Portate al colmo in alcune sezioni significative per diversi tempi di ritorno.

Idrogramma sintetico	Portata al colmo (m ³ /s)			
	Ingresso cassa monte	Tra le casse	Uscita cassa valle	Sorbolo
TR = 20 anni	614	484	407	357
TR = 50 anni	724	573	482	413
TR = 100 anni	824	647	540	464
TR = 200 anni	947	730	600	519
TR = 500 anni	1145	907	810	715

Tabella 4.3. Efficienza delle casse (monte, valle e complessiva) per diversi tempi di ritorno.

Idrogramma sintetico	Efficienza casse (%)		
	Monte	Valle	Totale
TR = 20 anni	21.2	15.9	33.8
TR = 50 anni	20.9	15.9	33.4
TR = 100 anni	21.5	16.6	34.5
TR = 200 anni	22.8	17.8	36.6
TR = 500 anni	20.8	10.7	29.2

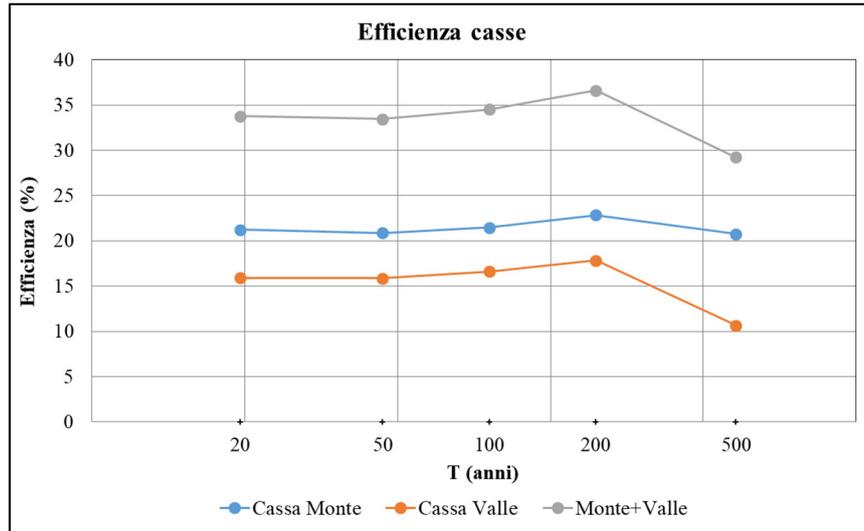


Figura 4-9. Efficienza delle casse (monte, valle e complessiva) per diversi tempi di ritorno.

4.2.3 Propagazione lungo l'asta fluviale a valle delle casse (esondazioni impedito)

La Figura 4-10 sintetizza l'andamento degli idrogrammi di portata transitanti a valle delle casse, ottenuti dal modello 1D, per i diversi tempi di ritorno. La propagazione delle onde di piena lungo l'asta di valle fornisce risultati non "realistici" per i tempi di ritorno più elevati, dal momento che il modello 1D non tiene conto della possibile tracimazione delle arginature per valori di portata superiori a quella compatibile. Se si osservano ad esempio gli andamenti delle portate a Sorbolo (Figura 4-11) per i tempi di ritorno superiori a 100 anni, è possibile notare che il colmo di portata supera i 500 m³/s (o addirittura i 700 m³/s per TR = 500 anni). L'analisi dell'efficienza idraulica dell'asta fluviale ha tuttavia mostrato che tali valori di portata non sono compatibili con l'assetto attuale del corso d'acqua (si veda il capitolo 3). Per questo motivo, si rimanda alle successive simulazioni con il modello 2D (paragrafo 4.3) per l'analisi della propagazione delle onde di piena lungo il tratto di asta fluviale a valle delle casse.

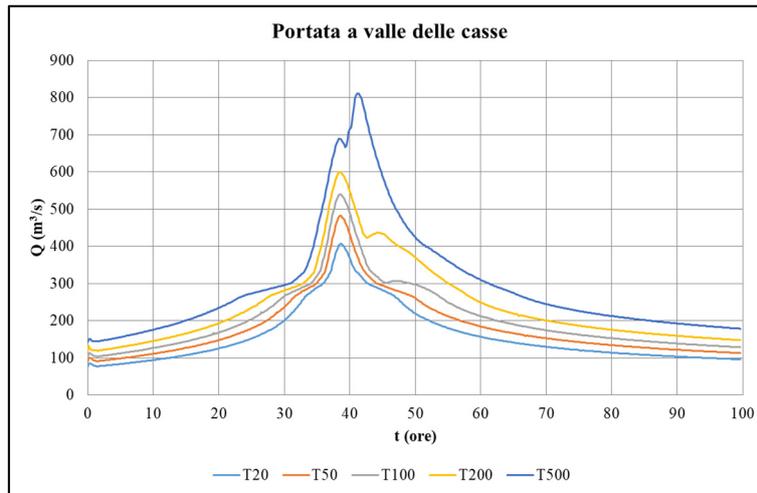


Figura 4-10. Idrogrammi di portata ottenuti dal modello 1D a valle delle casce per diversi tempi di ritorno.

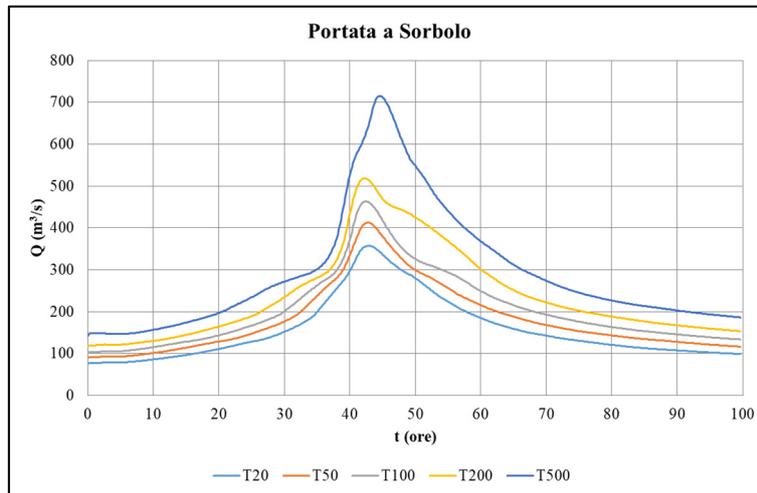


Figura 4-11. Idrogrammi di portata ottenuti dal modello 1D (esondazioni impedito) a Sorbolo per diversi tempi di ritorno.

4.2.4 Propagazione lungo l'asta fluviale tra Guardasone e la confluenza Termina-Masdone con modello 1D

Come detto, per questo tratto le simulazioni sono state condotte utilizzando il modello 1D a partire dalla sezione di Guardasone, imponendo come condizione al contorno di monte i corrispondenti idrogrammi sintetici forniti da ARPAE. La Figura 4-12 riporta le mappe relative all'involuppo delle massime quote idriche nel tratto compreso tra la traversa di Guardasone e la confluenza con Termina-Masdone per i tre tempi di ritorno più elevati (TR = 100, 200, 500 anni). Si ricorda che queste mappe sono ottenute interpolando linearmente tra le diverse

sezioni del modello 1D. Anche in questo tratto l'area coinvolta è sempre ricompresa all'interno della Fascia B, ad eccezione delle sezioni 45922.7 e 45766.8 in sinistra idraulica (in questo breve tratto la delimitazione della Fascia B risulta traslata di circa 30 m rispetto al gradino morfologico).

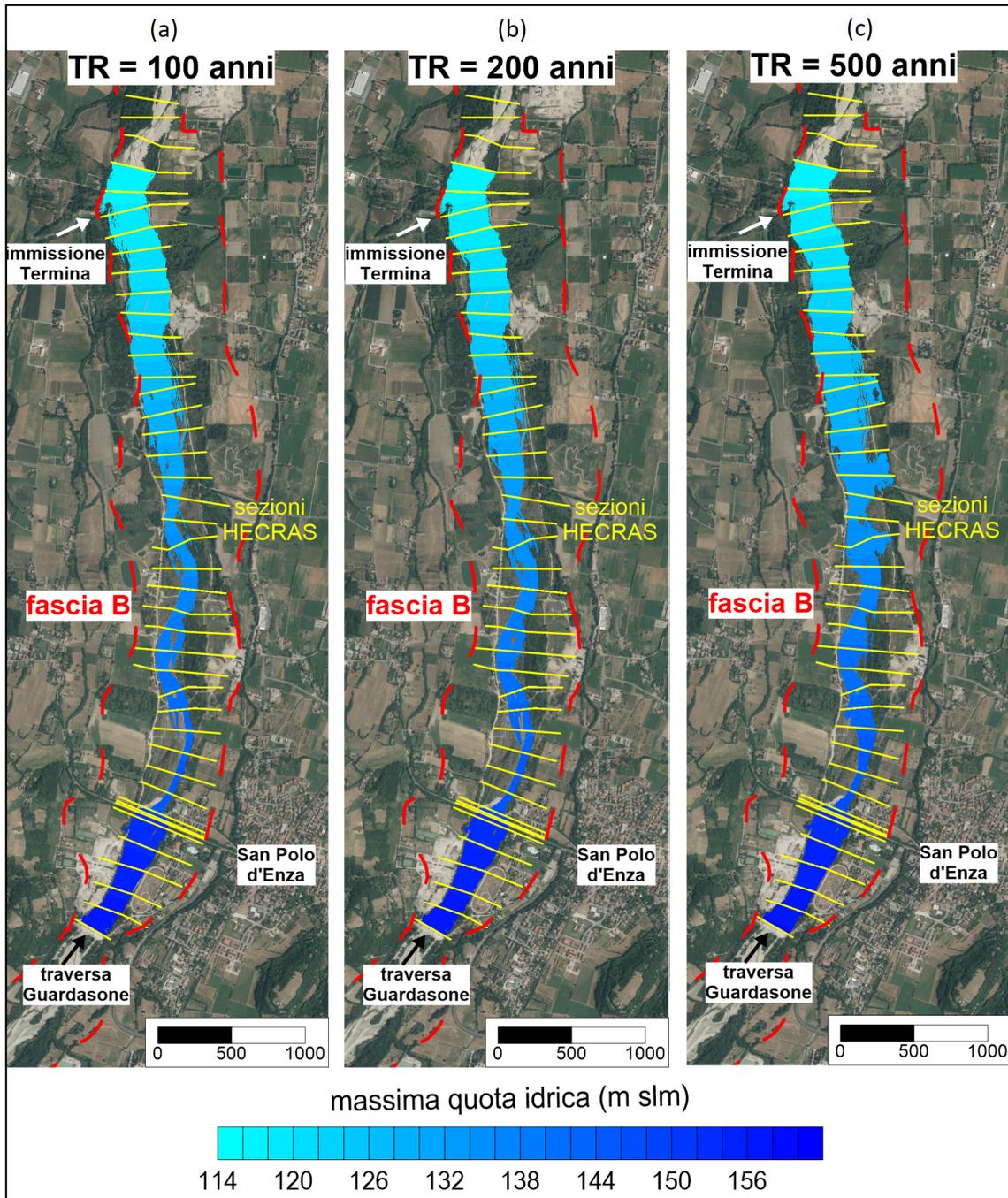


Figura 4-12. Massime quote idriche risultanti dalle simulazioni con modello 1D nel tratto tra la traversa di Guardasone e la confluenza con Termina-Masdone per (a) 100, (b) 200 e (c) 500 anni di tempo di ritorno. Ogni mappa è stata ottenuta per interpolazione tra le massime quote risultanti in ciascuna sezione (in giallo). La linea rossa identifica la Fascia B.

4.3 Modellazione 2D della propagazione delle onde di piena sintetiche lungo l'asta a valle delle casse (esondazioni consentite, senza rotte)

La propagazione delle onde di piena sintetiche a valle delle casse è stata analizzata sulla base dei risultati di simulazioni effettuate con il modello 2D precedentemente tarato (si veda il capitolo 2). Per meglio riflettere la situazione attuale dei contenimenti arginali, la batimetria è stata corretta imponendo sulla sommità arginale la quota desunta dal rilievo a terra del 2018 (in particolare per l'argine ricostruito nella zona di Lentigione). Inoltre, sulla base delle indicazioni di AIPo, è stata corretta la quota di una corda molle in sinistra idraulica in prossimità dell'abitato di Casaltone, oggetto di un recente intervento di ripresa in quota.

Come condizione al contorno di monte sono stati imposti gli idrogrammi in uscita dalle casse ottenuti dalla modellazione 1D (Figura 4-10) per i diversi tempi di ritorno.

In questo set di simulazioni, le arginature sono state considerate sormontabili ma non erodibili: è dunque consentita l'esondazione per tracimazione nei tratti dove il contenimento risulta insufficiente, ma si ipotizza che i sormonti non provochino alcuna rottura arginale. Si noti che è stata trascurata la modellazione dettagliata dell'allagamento al di fuori dell'arginatura (che infatti non sarà mostrato nei risultati).

La Tabella 4.4 sintetizza i valori del franco in sinistra e in destra idraulica desunto dai risultati della modellazione 2D nel tratto arginato dell'asta fluviale. Si rimanda alla Figura 3-1 e alla Tabella 4.4 per la posizione dei punti (numerati in ordine crescente da valle verso monte). Le quote di contenimento sono desunte dal rilievo arginale a terra del 2018, come già assunto per la definizione delle portate compatibili. Nella tabella sono evidenziati in viola i franchi inferiori a -20 cm, in rosso i franchi compresi tra -20 cm e 0, in arancione quelli compresi tra 0 e 30 cm, in giallo quelli tra 30 e 70 cm, e in verde i valori tra 70 cm e 1 m. Non sono invece evidenziati i franchi superiori a 1 m.

Il primo dato che emerge dall'analisi dei risultati è il fatto che, nel tratto compreso tra le casse e la zona a monte dell'attraversamento dell'A1, si

ottengono sempre franchi ampiamente positivi (superiori a 1 m). In effetti, anche l'analisi delle portate compatibili non evidenziava per questo tratto particolari criticità. Viceversa, a partire dalla zona immediatamente a monte dell'attraversamento dell'A1 fino ad arrivare alla confluenza in Po, le simulazioni restituiscono valori dei franchi decisamente inferiori.

Dall'analisi dei risultati, è possibile osservare che le onde di piena con tempo di ritorno pari a 20 e 50 anni transitano lungo l'intera asta fluviale senza dare origine ad alcun sormonto, nonostante i franchi siano inferiori a 70 cm in alcuni tratti (e in punti localizzati anche leggermente inferiori a 30 cm per TR = 50 anni).

Le prime tracimazioni si verificano durante la propagazione dell'onda di piena con TR = 100 anni, anche se il sormonto si limita a pochi cm. Vi sono tuttavia lunghi tratti in cui il franco, pur positivo, risulta inferiore a 30 cm: l'onda centennale non transita quindi in condizioni di sicurezza.

Per quanto riguarda l'onda di piena con TR = 200 anni, si possono identificare alcuni tratti in cui le tracimazioni sono significative, ed in generale i franchi sono inadeguati lungo buona parte dell'asta fluviale. Infine, la piena con TR = 500 anni genera sormonti molto diffusi lungo l'intera asta, con battenti che superano i 30 cm in alcuni tratti.

Dalla Figura 4-13 alla Figura 4-17 sono mostrate, per i diversi tempi di ritorno, le mappe delle massime profondità idriche ottenute dalle simulazioni nel tratto compreso tra l'A1 e la confluenza in Po. Si noti che sono escluse dalla rappresentazione eventuali aree allagate esterne alle arginature. A queste figure sono inoltre affiancate mappe con indicatori colorati in base al valore del franco (minimo tra destra e sinistra) lungo l'asta, in modo da poter identificare visivamente i tratti più critici. Inoltre, nella Figura 4-18 sono mostrati (per i tre tempi di ritorno superiori) i tratti di arginatura che risultano sormontati durante le simulazioni.

I risultati confermano alcune indicazioni già emerse dalla determinazione delle portate compatibili, ossia che i tratti più critici sono:

- in sinistra idraulica, il tratto di Casaltone (a valle dell'A1),

- in destra idraulica, la zona di Lentigione.

Inoltre, anche la zona a cavallo dell'attraversamento dell'A1 e alcuni punti nel tratto tra Sorbolo e Lentigione risultano piuttosto critici.

A valle di Lentigione e fino alla confluenza in Po non si verificano mai sormonti, nemmeno per i tempi di ritorno più elevati, grazie alle tracimazioni che avvengono a monte. Tuttavia, anche in questo tratto i franchi sono talvolta inadeguati (inferiori a 30 cm).

È stato stimato un volume esondato complessivo di circa $0.4 \cdot 10^6$ m³ per TR = 200 anni e di $6.6 \cdot 10^6$ m³ per TR = 500 anni.

La Figura 4-19 mette a confronto gli andamenti delle portate a Sorbolo ottenuti dalla modellazione 2D per i diversi tempi di ritorno. Rispetto ai risultati 1D con esondazioni impedito (Figura 4-11), si può notare come il colmo di portata per TR = 500 anni risulti decisamente inferiore, proprio in virtù delle tracimazioni.

La Figura 4-20, invece, riporta l'andamento delle portate a Coenzo (quindi poco prima della confluenza in Po): per TR = 500 anni, la portata si assesta attorno a 470 m³/s, di poco superiore a quella compatibile nel tratto di monte.

La Figura 4-21 permette di apprezzare l'effetto di laminazione lungo l'intera asta per i diversi tempi di ritorno: sono infatti riportati gli andamenti delle portate in alcune sezioni significative (valle casse, S. Ilario, Sorbolo, Coenzo). Tra valle casse e S. Ilario la laminazione è praticamente assente, mentre tra S. Ilario e Sorbolo la portata al colmo si riduce di circa 50 m³/s per TR = 20 anni e di circa 100 m³/s per tempi di ritorno tra 50 e 200 anni; infatti, le tracimazioni non sono particolarmente significative in termini di volume in questo tratto per le piene centennale e duecentennale; viceversa, per TR = 500 anni le esondazioni danno origine ad una perdita di volume più significativa e danno luogo ad una forte riduzione di portata. Infine, tra Sorbolo e Coenzo la portata al colmo si riduce ancora di circa 30 m³/s in assenza di esondazioni (o quando queste non sono rilevanti); per tempi di ritorno di 200 e 500 anni, invece, l'allontanamento di una parte del volume di piena per tracimazione raddoppia questo effetto.

Nella Figura 4-21 è anche riportato, per confronto, l'andamento della portata a Sorbolo ottenuto dal modello 1D con esondazioni impedito: come già sottolineato

in precedenza, la differenza rispetto al caso di esondazioni consentite è particolarmente evidente per TR = 500 anni (Figura 4-21e).

Sono infine rappresentate nella Figura 4-22 le portate al colmo lungo l'intera asta per i diversi tempi di ritorno. Nel tratto a monte dell'A1, come detto, la riduzione è praticamente nulla. Si osserva una prima significativa riduzione a cavallo dell'A1 (piuttosto evidente anche per i tempi di ritorno inferiori). Per i tempi di ritorno più elevati, le principali riduzioni della portata al colmo avvengono, proprio a causa delle tracimazioni, a valle dell'A1 (Casaltone) e poi nel tratto di Lentigione (già interessato dall'apertura di una breccia arginale durante l'evento del 2017).

Tabella 4.4. Franco destro e sinistro ottenuto dalle simulazioni 2D lungo l'asta fluviale per diversi tempi di ritorno. I valori in sinistra per i punti 1-12 e 35-44 non sono riportati a causa dell'assenza di una quota di contenimento.

PUNTO	Franchi (m)									
	TR 20		TR 50		TR 100		TR 200		TR 500	
	sinistra	destra	sinistra	destra	sinistra	destra	sinistra	destra	sinistra	Destra
1		3.09		2.85		2.70		2.62		2.60
2		2.84		2.56		2.39		2.31		2.28
3		2.74		2.47		2.29		2.21		2.18
4		2.37		2.11		1.94		1.85		1.82
5		2.18		1.92		1.74		1.65		1.62
6		2.06		1.78		1.58		1.49		1.46
7		1.91		1.61		1.40		1.31		1.27
8		1.70		1.38		1.16		1.05		1.01
9		1.43		1.09		0.85		0.73		0.69
10		1.33		0.99		0.75		0.64		0.59
11		2.08		1.75		1.50		1.39		1.34
12		1.91		1.57		1.32		1.20		1.15
13	2.11	1.94	1.77	1.60	1.52	1.35	1.40	1.23	1.35	1.18
14	1.82	2.01	1.46	1.65	1.20	1.39	1.06	1.25	1.01	1.20
15	1.87	2.13	1.51	1.77	1.25	1.51	1.10	1.36	1.04	1.30
16	1.59	2.14	1.22	1.77	0.94	1.49	0.79	1.34	0.72	1.27
17	1.65	1.77	1.29	1.41	1.01	1.13	0.85	0.97	0.78	0.90
18	1.86	1.68	1.46	1.28	1.16	0.98	0.98	0.80	0.90	0.72
19	1.55	1.63	1.16	1.24	0.85	0.93	0.67	0.75	0.58	0.66
20	1.75	1.49	1.36	1.10	1.04	0.78	0.85	0.59	0.77	0.51
21	1.78	1.64	1.38	1.24	1.06	0.92	0.86	0.72	0.77	0.63
22	1.54	1.64	1.13	1.23	0.80	0.90	0.60	0.70	0.50	0.60
23	1.09	1.79	0.67	1.37	0.34	1.04	0.13	0.83	0.03	0.73
24	1.41	1.82	0.99	1.40	0.65	1.06	0.43	0.84	0.33	0.74
25	1.49	2.19	1.07	1.77	0.73	1.43	0.51	1.21	0.41	1.11
26	1.61	2.15	1.19	1.73	0.84	1.38	0.62	1.16	0.51	1.05
27	1.52	1.74	1.09	1.31	0.74	0.96	0.50	0.72	0.39	0.61
28	1.25	1.53	0.82	1.10	0.46	0.74	0.22	0.50	0.10	0.38
29	1.50	1.45	1.07	1.02	0.70	0.65	0.46	0.41	0.34	0.29
30	1.19	1.29	0.75	0.85	0.38	0.48	0.14	0.24	0.02	0.12
31	1.35	1.47	0.91	1.03	0.53	0.65	0.28	0.40	0.16	0.28
32	1.21	1.32	0.78	0.89	0.40	0.51	0.15	0.26	0.03	0.14
33	1.23	1.40	0.80	0.97	0.43	0.60	0.18	0.35	0.06	0.23
34	1.71	1.32	1.28	0.89	0.91	0.52	0.67	0.28	0.54	0.15
35		1.40		0.98		0.62		0.38		0.26

Valutazione degli scenari per onde di piena con tempo di ritorno assegnato

PUNTO	Franchi (m)									
	TR 20		TR 50		TR 100		TR 200		TR 500	
	sinistra	destra	sinistra	destra	sinistra	destra	sinistra	destra	sinistra	Destra
36		1.39		0.99		0.66		0.42		0.31
37		1.53		1.13		0.80		0.58		0.46
38		1.39		1.00		0.68		0.45		0.34
39		1.23		0.85		0.53		0.31		0.20
40		1.20		0.82		0.50		0.27		0.16
41		1.22		0.86		0.55		0.33		0.22
42		1.31		0.95		0.65		0.43		0.33
43		1.39		1.05		0.76		0.54		0.44
44		1.33		1.00		0.72		0.53		0.44
45	1.16	1.26	0.83	0.93	0.56	0.66	0.38	0.48	0.29	0.39
46	1.24	1.04	0.89	0.69	0.61	0.41	0.43	0.23	0.34	0.14
47	1.40	1.01	1.04	0.65	0.74	0.35	0.55	0.16	0.45	0.06
48	1.41	1.07	1.03	0.69	0.72	0.38	0.53	0.19	0.42	0.08
49	1.32	0.86	0.93	0.47	0.61	0.15	0.41	-0.05	0.30	-0.16
50	1.34	1.17	0.96	0.79	0.65	0.48	0.45	0.28	0.35	0.18
51	1.43	1.13	1.04	0.74	0.72	0.42	0.52	0.22	0.41	0.11
52	1.38	0.88	0.98	0.48	0.65	0.15	0.45	-0.05	0.34	-0.16
53	1.15	1.06	0.75	0.66	0.41	0.32	0.20	0.11	0.09	0.00
54	1.41	0.92	1.01	0.52	0.67	0.18	0.46	-0.03	0.35	-0.14
55	1.43	0.99	1.01	0.57	0.67	0.23	0.46	0.02	0.35	-0.09
56	1.32	1.06	0.90	0.64	0.56	0.30	0.35	0.09	0.24	-0.02
57	1.50	0.96	1.09	0.55	0.74	0.20	0.54	0.00	0.43	-0.11
58	1.46	0.90	1.03	0.47	0.67	0.11	0.47	-0.09	0.35	-0.21
59	1.35	1.00	0.91	0.56	0.54	0.19	0.34	-0.01	0.20	-0.15
60	1.39	0.98	0.95	0.54	0.59	0.18	0.38	-0.03	0.24	-0.17
61	1.16	0.85	0.73	0.42	0.37	0.06	0.16	-0.15	0.02	-0.29
62	1.38	0.85	0.95	0.42	0.59	0.06	0.38	-0.15	0.24	-0.29
63	1.41	1.01	0.99	0.59	0.63	0.23	0.42	0.02	0.28	-0.12
64	1.43	0.74	1.01	0.32	0.65	-0.04	0.44	-0.25	0.30	-0.39
65	1.30	1.03	0.88	0.61	0.52	0.25	0.32	0.05	0.17	-0.10
66	1.39	0.98	0.98	0.57	0.63	0.22	0.43	0.02	0.27	-0.14
67	1.32	0.97	0.92	0.57	0.56	0.21	0.37	0.02	0.21	-0.15
68	0.72	1.02	0.33	0.63	-0.02	0.28	-0.21	0.09	-0.38	-0.08
69	0.99	0.97	0.61	0.59	0.27	0.25	0.08	0.06	-0.10	-0.12
70	1.14	0.92	0.76	0.54	0.42	0.20	0.23	0.01	0.05	-0.17
71	0.66	0.95	0.30	0.59	-0.03	0.26	-0.21	0.08	-0.41	-0.12
72	0.90	0.78	0.56	0.44	0.25	0.13	0.05	-0.07	-0.14	-0.26
73	0.89	0.91	0.56	0.58	0.25	0.27	0.05	0.07	-0.15	-0.13
74	1.14	0.88	0.82	0.56	0.51	0.25	0.31	0.05	0.10	-0.16
75	1.29	1.02	0.97	0.70	0.66	0.39	0.45	0.18	0.23	-0.04
76	1.19	1.24	0.87	0.92	0.57	0.62	0.34	0.39	0.11	0.16
77	1.27	1.35	0.95	1.03	0.65	0.73	0.41	0.49	0.17	0.25
78	1.33	1.40	1.02	1.09	0.73	0.80	0.48	0.55	0.23	0.30
79	1.29	1.30	0.99	1.00	0.69	0.70	0.45	0.46	0.20	0.21
80	1.33	1.17	1.04	0.88	0.75	0.59	0.50	0.34	0.25	0.09
81	1.04	1.04	0.75	0.75	0.47	0.47	0.22	0.22	-0.03	-0.03
82	1.32	1.07	1.01	0.76	0.71	0.46	0.44	0.19	0.17	-0.08
83	1.21	1.45	0.90	1.14	0.59	0.83	0.32	0.56	0.04	0.28
84	1.10	1.28	0.79	0.97	0.48	0.66	0.21	0.39	-0.07	0.11
85	1.31	1.33	1.00	1.02	0.70	0.72	0.43	0.45	0.14	0.16
86	1.12	1.35	0.81	1.04	0.51	0.74	0.24	0.47	-0.05	0.18
87	1.34	1.42	1.04	1.12	0.74	0.82	0.46	0.54	0.18	0.26
88	1.09	1.37	0.79	1.07	0.49	0.77	0.21	0.49	-0.07	0.21
89	1.21	1.51	0.91	1.21	0.61	0.91	0.34	0.64	0.05	0.35
90	1.05	1.57	0.75	1.27	0.46	0.98	0.19	0.71	-0.10	0.42
91	1.06	1.41	0.77	1.12	0.48	0.83	0.21	0.56	-0.07	0.28
92	1.33	1.35	1.04	1.06	0.76	0.78	0.49	0.51	0.21	0.23
93	1.15	0.89	0.87	0.61	0.59	0.33	0.32	0.06	0.04	-0.22
94	1.10	1.19	0.82	0.91	0.54	0.63	0.28	0.37	-0.01	0.08
95	1.28	1.48	1.01	1.21	0.73	0.93	0.47	0.67	0.18	0.38
96	1.26	1.33	0.98	1.05	0.71	0.78	0.45	0.52	0.17	0.24
97	1.20	1.19	0.94	0.93	0.67	0.66	0.41	0.40	0.12	0.11
98	0.94	1.01	0.68	0.75	0.41	0.48	0.15	0.22	-0.13	-0.06
99	0.76	1.13	0.51	0.88	0.25	0.62	0.00	0.37	-0.28	0.09
100	0.85	1.18	0.61	0.94	0.35	0.68	0.11	0.44	-0.17	0.16

Valutazione degli scenari per onde di piena con tempo di ritorno assegnato

PUNTO	Franchi (m)									
	TR 20		TR 50		TR 100		TR 200		TR 500	
	sinistra	destra	sinistra	destra	sinistra	destra	sinistra	destra	sinistra	Destra
101	1.03	1.55	0.79	1.31	0.55	1.07	0.31	0.83	0.04	0.56
102	0.94	1.38	0.71	1.15	0.48	0.92	0.25	0.69	-0.02	0.42
103	0.85	1.38	0.63	1.16	0.41	0.94	0.19	0.72	-0.08	0.45
104	0.86	1.23	0.66	1.03	0.43	0.80	0.23	0.60	-0.03	0.34
105	0.81	1.07	0.60	0.86	0.37	0.63	0.17	0.43	-0.08	0.18
106	0.58	1.07	0.39	0.88	0.17	0.66	-0.02	0.47	-0.25	0.24
107	0.63	1.01	0.44	0.82	0.23	0.61	0.04	0.42	-0.18	0.20
108	0.51	0.97	0.33	0.79	0.12	0.58	-0.06	0.40	-0.28	0.18
109	0.41	1.02	0.23	0.84	0.02	0.63	-0.16	0.45	-0.39	0.22
110	0.57	0.97	0.39	0.79	0.19	0.59	0.02	0.42	-0.22	0.18
111	0.71	0.79	0.54	0.62	0.34	0.42	0.16	0.24	-0.09	-0.01
112	0.53	0.81	0.36	0.64	0.16	0.44	-0.01	0.27	-0.27	0.01
113	0.77	0.83	0.60	0.66	0.40	0.46	0.23	0.29	-0.04	0.02
114	0.59	0.83	0.43	0.67	0.22	0.46	0.05	0.29	-0.23	0.01
115	0.41	0.77	0.24	0.60	0.04	0.40	-0.13	0.23	-0.43	-0.07
116	0.85	0.82	0.68	0.65	0.47	0.44	0.30	0.27	-0.05	-0.08
117	0.73	0.71	0.50	0.48	0.23	0.21	0.01	-0.01	-0.48	-0.50
118	1.31	0.67	1.09	0.45	0.84	0.20	0.62	-0.02	0.13	-0.51
119	1.79	0.85	1.58	0.64	1.32	0.38	1.11	0.17	0.62	-0.32
120	0.84	1.25	0.64	1.05	0.39	0.80	0.18	0.59	-0.31	0.10
121	1.00	1.44	0.80	1.24	0.59	1.03	0.40	0.84	-0.08	0.36
122	1.80	2.40	1.58	2.18	1.38	1.98	1.17	1.77	0.67	1.27
123	2.50	2.35	2.25	2.10	2.05	1.90	1.82	1.67	1.29	1.14
124	2.34	2.68	2.07	2.41	1.86	2.20	1.63	1.97	1.05	1.39
125	2.36	2.50	2.05	2.19	1.83	1.97	1.62	1.76	1.06	1.20
126	2.77	2.39	2.47	2.09	2.25	1.87	2.05	1.67	1.53	1.15
127	3.13	2.61	2.79	2.27	2.55	2.03	2.32	1.80	1.74	1.22
128	3.79	2.70	3.47	2.38	3.25	2.16	3.04	1.95	2.47	1.38
129	4.06	3.62	3.71	3.27	3.47	3.03	3.24	2.80	2.61	2.17
130	4.04	3.77	3.66	3.39	3.40	3.13	3.15	2.88	2.46	2.19
131	4.29	3.87	3.89	3.47	3.61	3.19	3.36	2.94	2.59	2.17
132	4.45	4.10	4.04	3.69	3.75	3.40	3.49	3.14	2.71	2.36
133	4.70	4.19	4.27	3.76	3.98	3.47	3.71	3.20	2.90	2.39
134	4.76	4.70	4.35	4.29	4.06	4.00	3.80	3.74	3.00	2.94
135	4.74	4.94	4.34	4.54	4.06	4.26	3.79	3.99	2.98	3.18
136	4.80	5.26	4.40	4.86	4.11	4.57	3.84	4.30	3.02	3.48
137	5.29	5.09	4.88	4.68	4.60	4.40	4.34	4.14	3.56	3.36
138	5.14	5.11	4.76	4.73	4.49	4.46	4.24	4.21	3.46	3.43
139	5.40	3.99	4.99	3.58	4.71	3.30	4.44	3.03	3.62	2.21
140	5.44	5.14	5.03	4.73	4.74	4.44	4.47	4.17	3.66	3.36
141	5.94	5.35	5.51	4.92	5.22	4.63	4.93	4.34	4.13	3.54
142	5.75	6.17	5.34	5.76	5.05	5.47	4.79	5.21	4.02	4.44
143	6.06	6.10	5.64	5.68	5.34	5.38	5.08	5.12	4.31	4.35
144	5.58	6.90	5.13	6.45	4.82	6.14	4.55	5.87	3.75	5.07
145	3.72	4.92	3.55	4.75	3.42	4.62	3.29	4.49	2.88	4.08
146	2.14	4.01	1.95	3.82	1.81	3.68	1.67	3.54	1.23	3.10
147	1.48	3.71	1.28	3.51	1.13	3.36	0.99	3.22	0.52	2.75
148	1.50	4.23	1.28	4.01	1.12	3.85	0.97	3.70	0.49	3.22
149	2.11	1.88	1.92	1.69	1.79	1.56	1.66	1.43	1.26	1.03
150	1.97	1.38	1.73	1.14	1.58	0.99	1.45	0.86	1.09	0.50
151	2.24	1.62	2.02	1.40	1.87	1.25	1.74	1.12	1.36	0.74
152	2.35	2.29	2.15	2.09	2.00	1.94	1.85	1.79	1.41	1.35
153	2.85	2.95	2.58	2.68	2.38	2.48	2.19	2.29	1.67	1.77
154	2.82	2.96	2.52	2.66	2.32	2.46	2.13	2.27	1.60	1.74
155	3.06	2.81	2.74	2.49	2.52	2.27	2.31	2.06	1.78	1.53
156	3.48	3.68	3.15	3.35	2.93	3.13	2.72	2.92	2.19	2.39
157	3.91	4.47	3.59	4.15	3.37	3.93	3.16	3.72	2.60	3.16
158	3.94	4.16	3.63	3.85	3.40	3.62	3.19	3.41	2.59	2.81
159	3.64	3.79	3.33	3.48	3.09	3.24	2.87	3.02	2.20	2.35
160	3.66	4.62	3.30	4.26	3.05	4.01	2.80	3.76	2.06	3.02
161	3.98	4.89	3.62	4.53	3.36	4.27	3.11	4.02	2.37	3.28
162	4.52	4.57	4.18	4.23	3.94	3.99	3.70	3.75	2.98	3.03

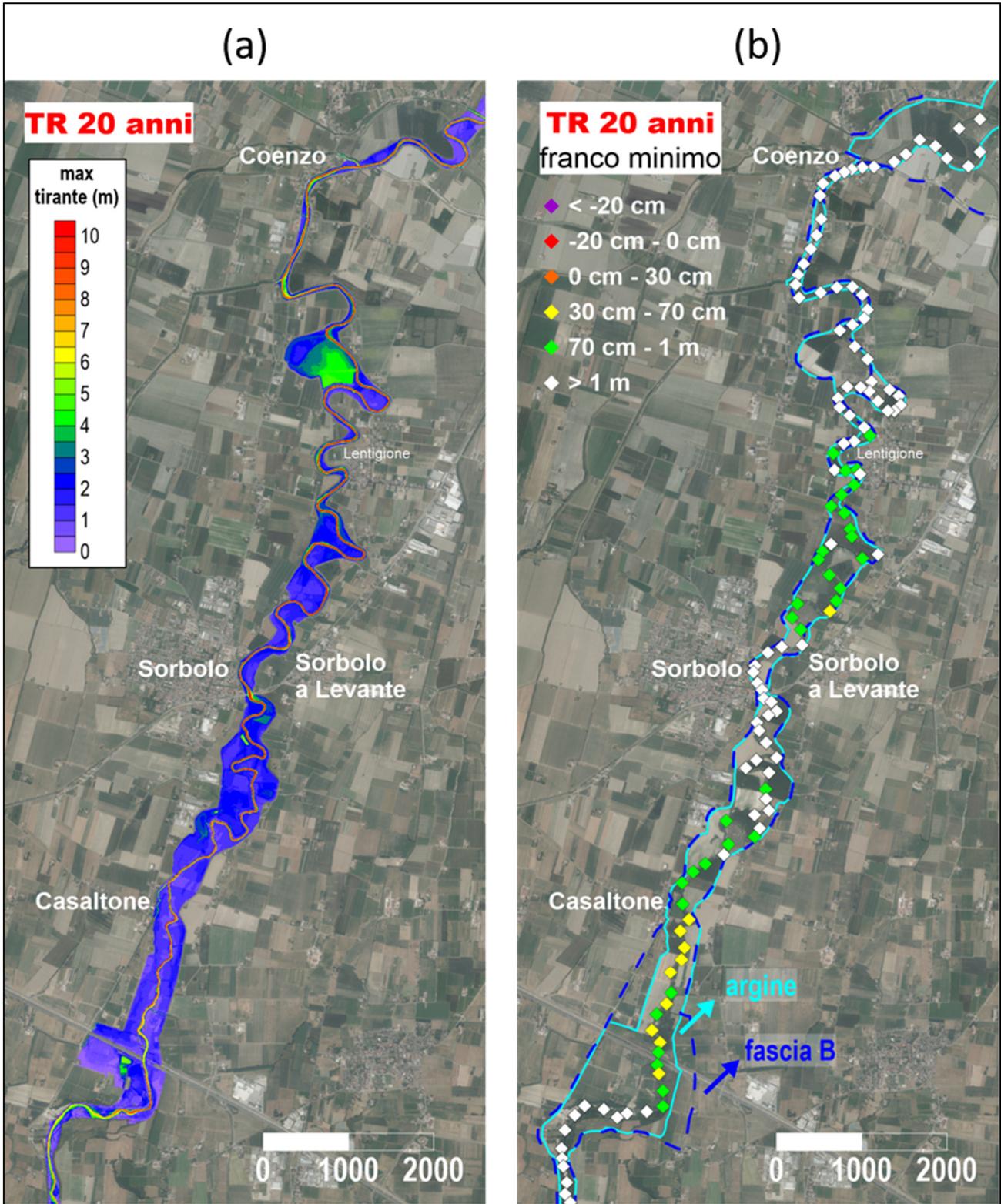


Figura 4-13. Propagazione dell'idrogramma sintetico con TR = 20 anni con il modello 2D. (a) mappa delle massime profondità idriche nel tratto tra A1 e confluenza in Po; (b) indicazione del franco minimo (tra destra e sinistra) per i vari punti individuati lungo l'asta.

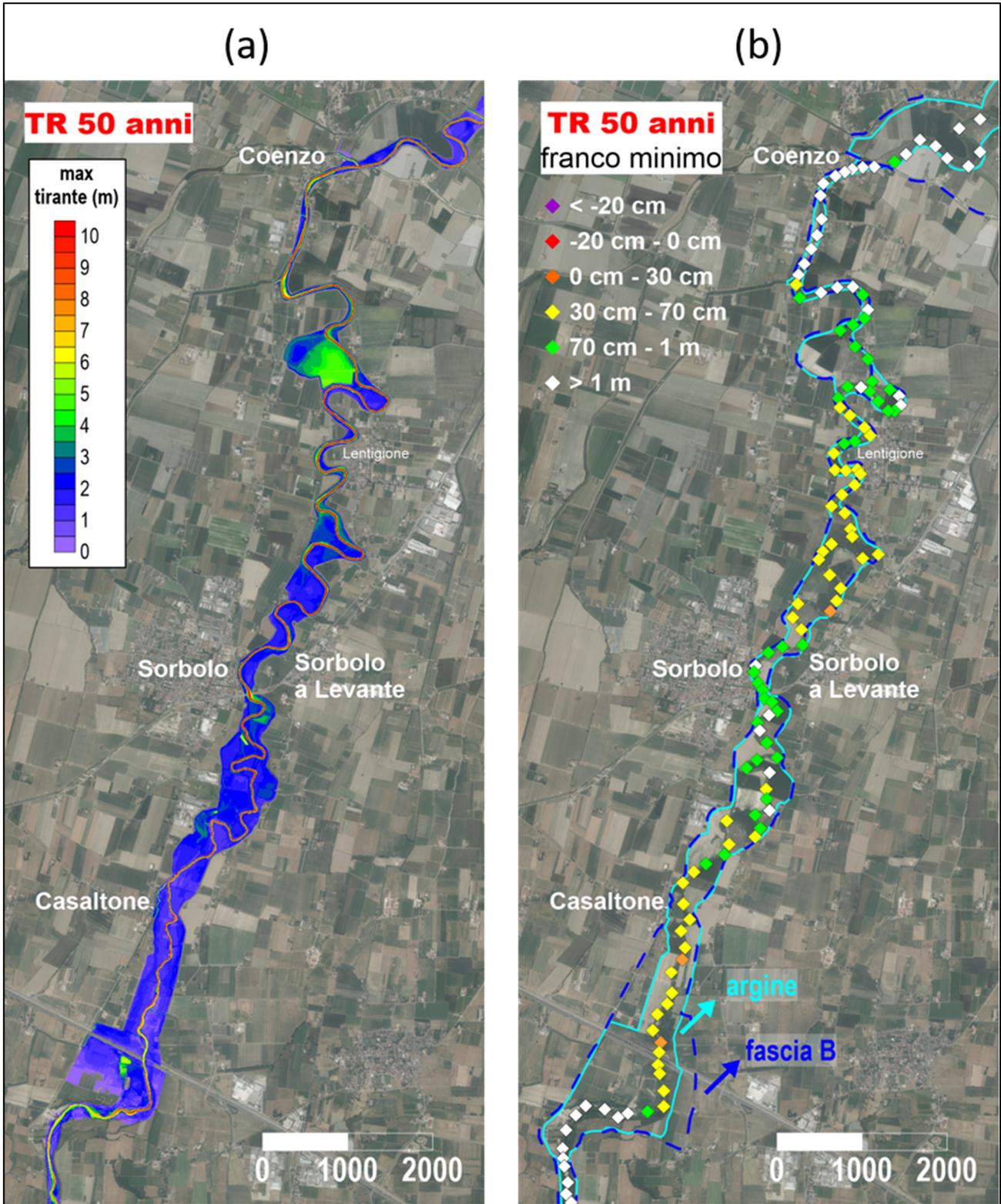


Figura 4-14. Propagazione dell'idrogramma sintetico con TR = 50 anni con il modello 2D. (a) mappa delle massime profondità idriche nel tratto tra A1 e confluenza in Po; (b) indicazione del franco minimo (tra destra e sinistra) per i vari punti individuati lungo l'asta.

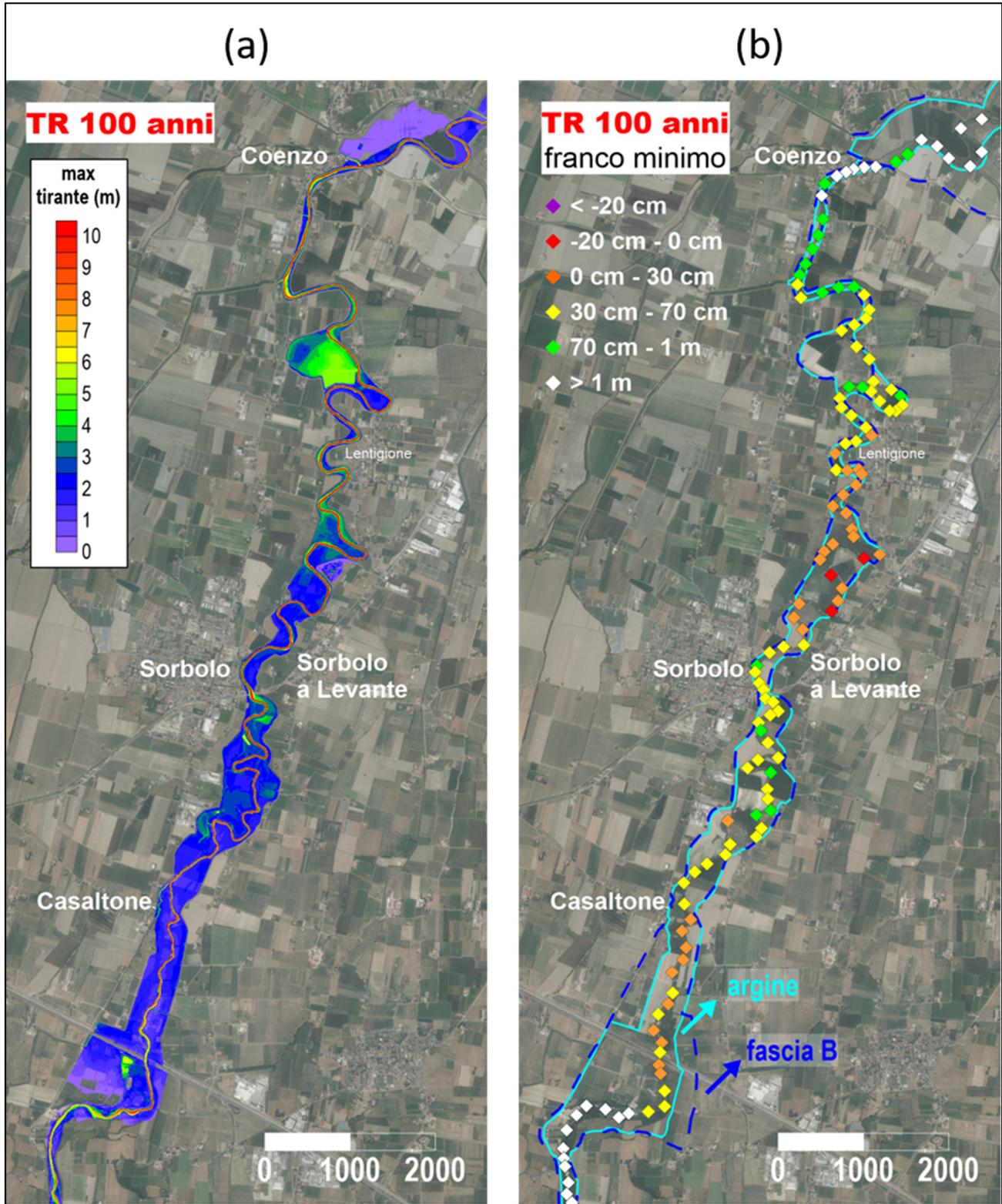


Figura 4-15. Propagazione dell'idrogramma sintetico con TR = 100 anni con il modello 2D. (a) mappa delle massime profondità idriche nel tratto tra A1 e confluenza in Po; (b) indicazione del franco minimo (tra destra e sinistra) per i vari punti individuati lungo l'asta. Si noti che le eventuali esondazioni al di fuori delle arginature non sono mostrati.

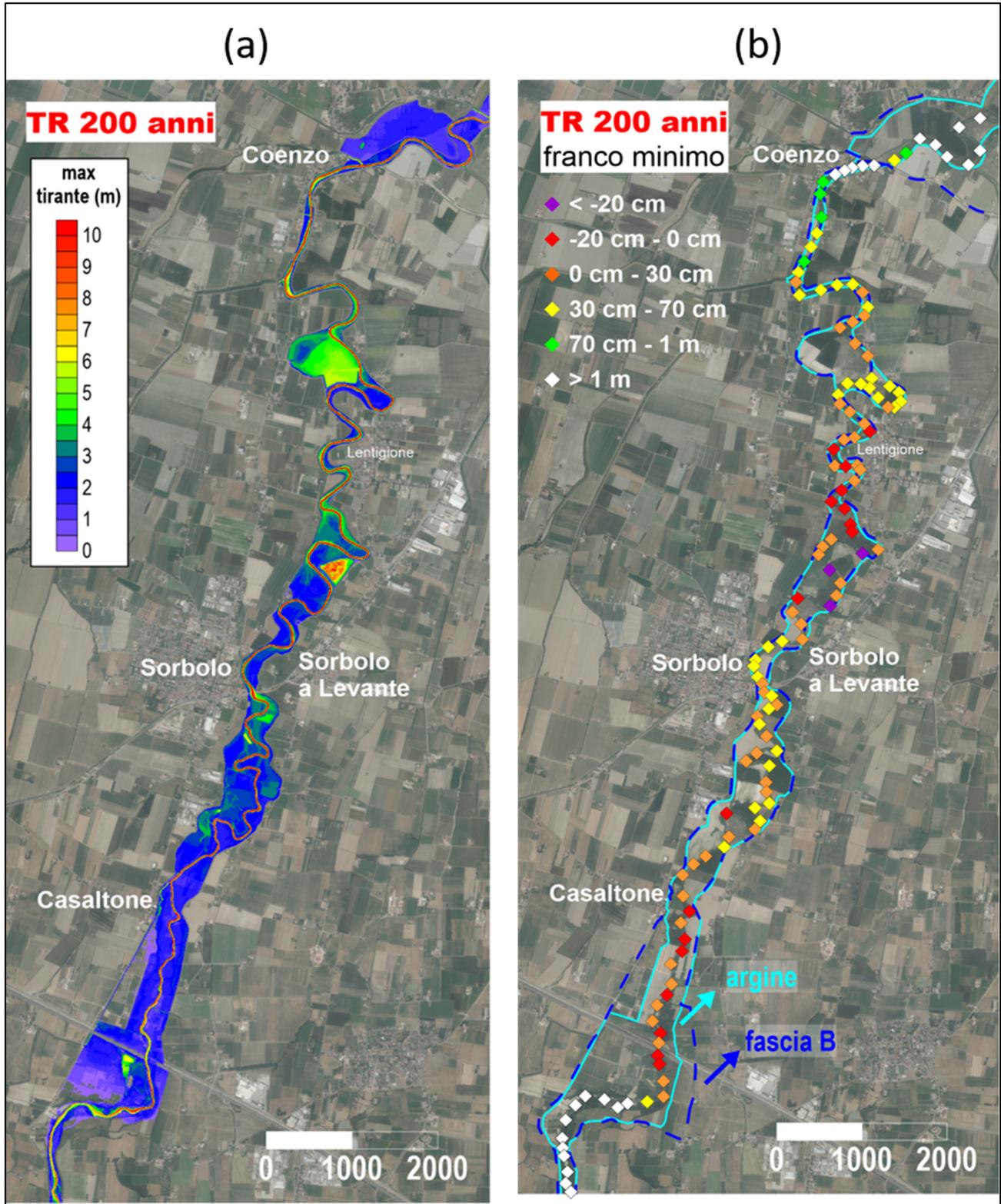


Figura 4-16. Propagazione dell'idrogramma sintetico con TR = 200 anni con il modello 2D. (a) mappa delle massime profondità idriche nel tratto tra A1 e confluenza in Po; (b) indicazione del franco minimo (tra destra e sinistra) per i vari punti individuati lungo l'asta. Si noti che le eventuali esondazioni al di fuori delle arginature non sono mostrati.

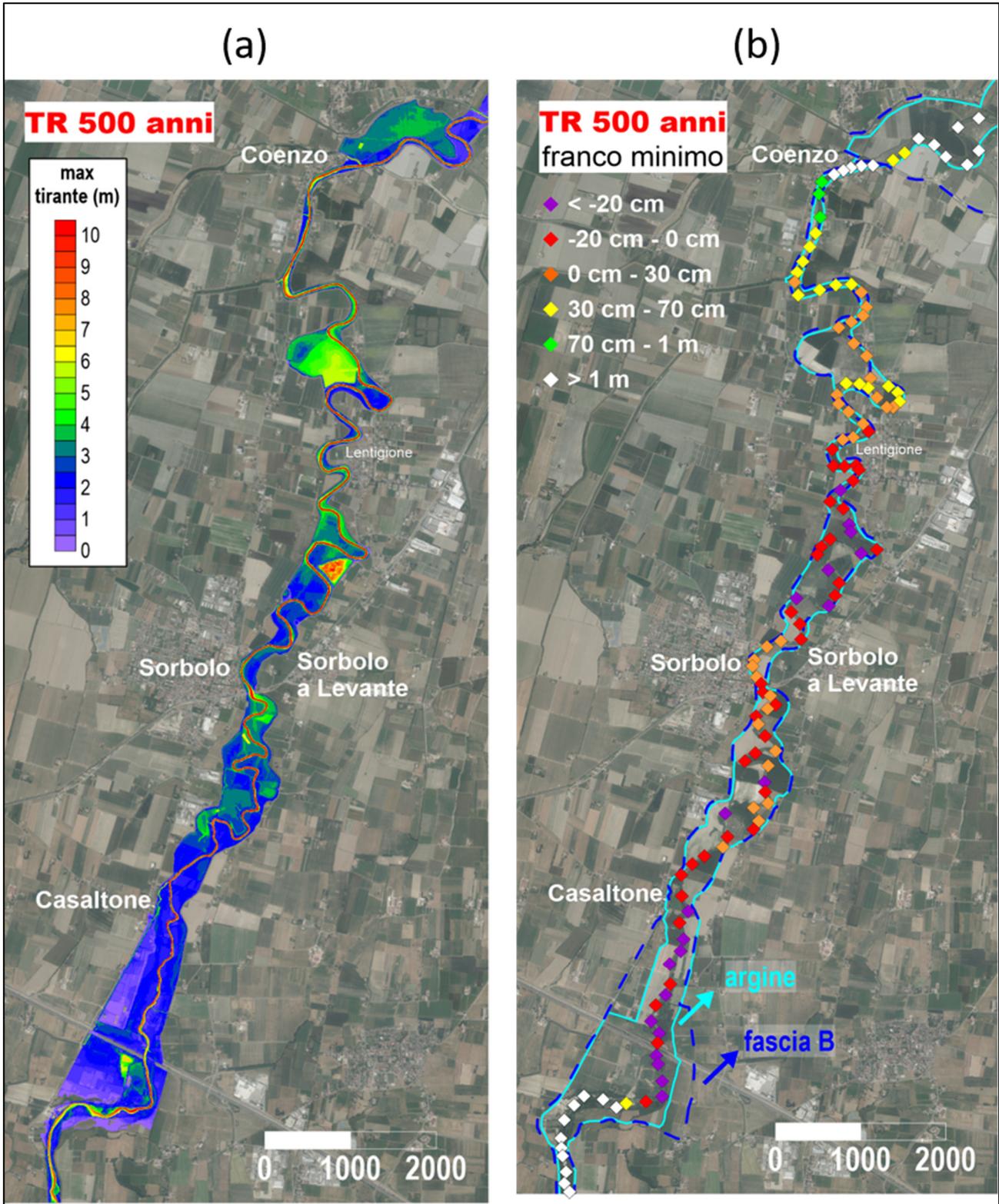


Figura 4-17. Propagazione dell'idrogramma sintetico con TR = 500 anni con il modello 2D. (a) mappa delle massime profondità idriche nel tratto tra A1 e confluenza in Po; (b) indicazione del franco minimo (tra destra e sinistra) per i vari punti individuati lungo l'asta. Si noti che le eventuali esondazioni al di fuori delle arginature non sono mostrati.

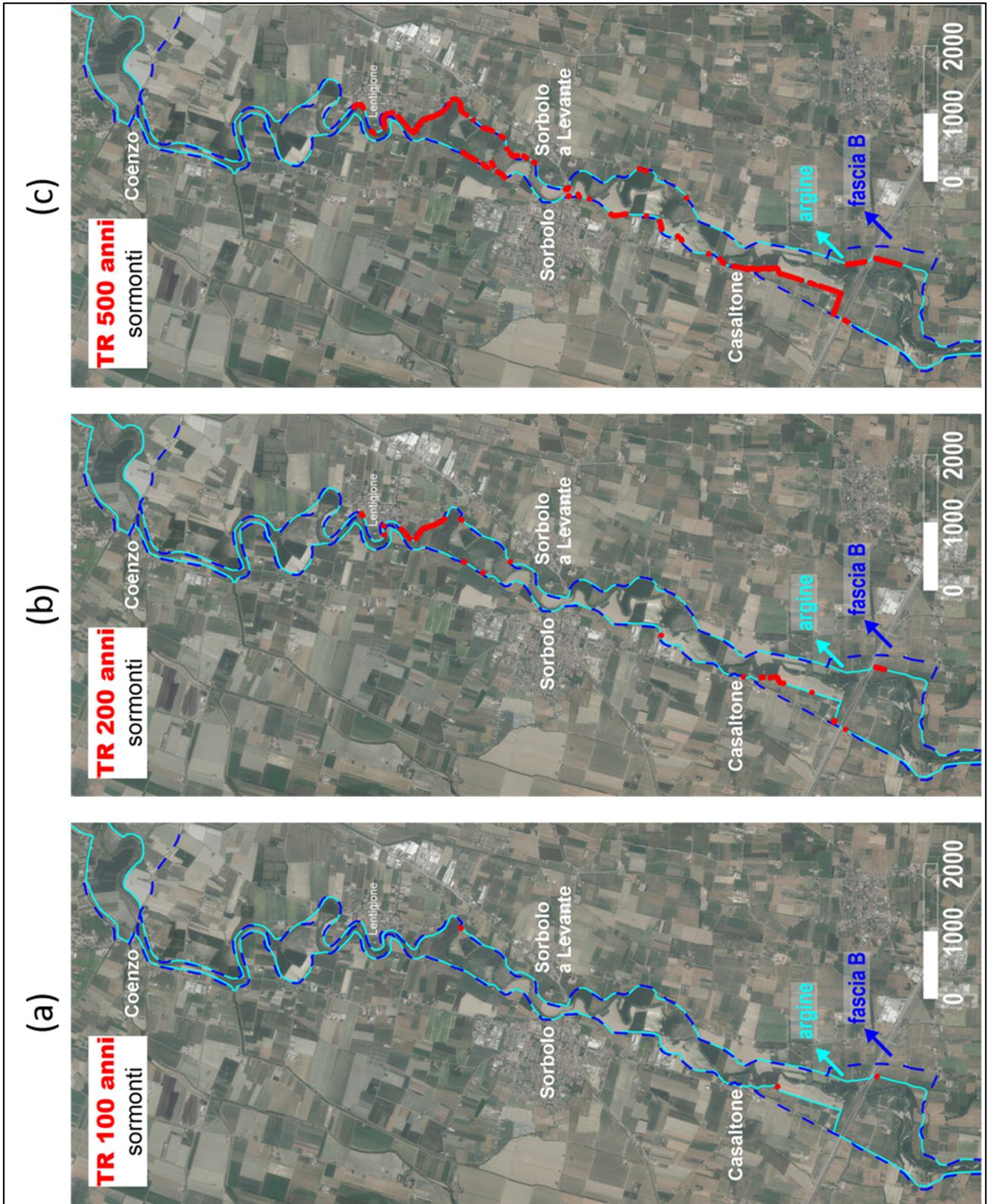


Figura 4-18. Identificazione dei tratti sormontati per: (a) TR = 100 anni, (b) TR = 200 anni, (c) TR = 500 anni, ottenuti dalle simulazioni 2D nel tratto tra A1 e confluenza in Po.

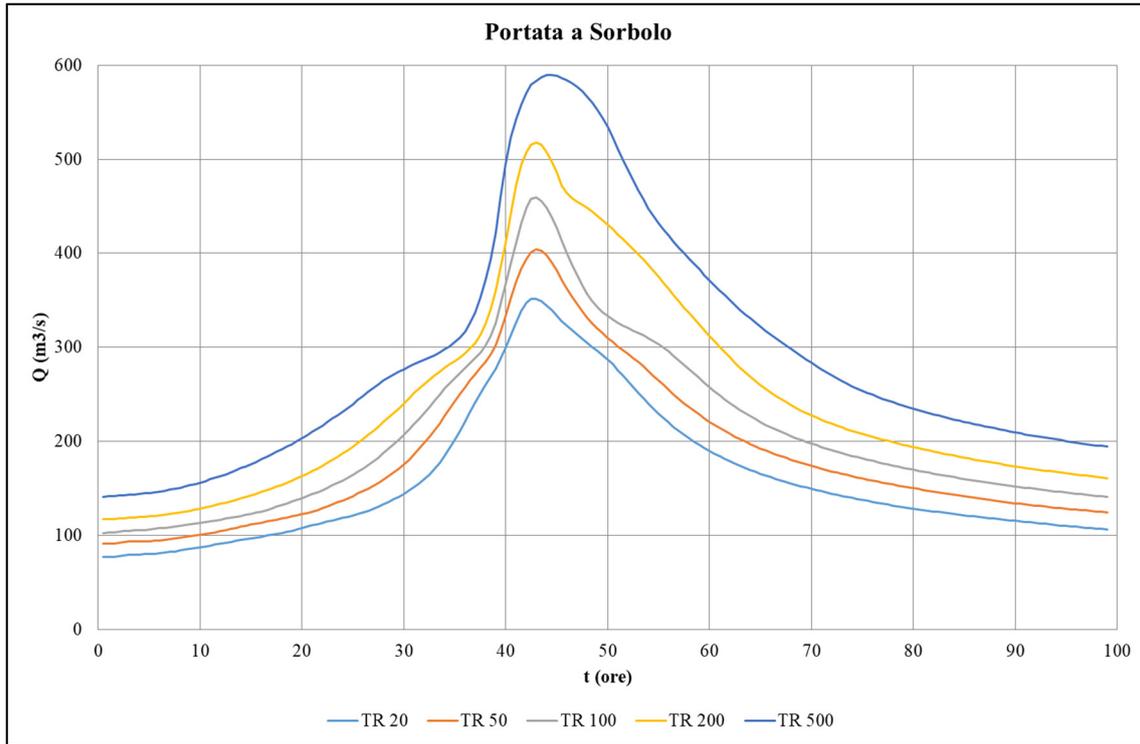


Figura 4-19. Idrogrammi di portata ottenuti dal modello 2D (esondazioni consentite) a Sorbolo per diversi tempi di ritorno.

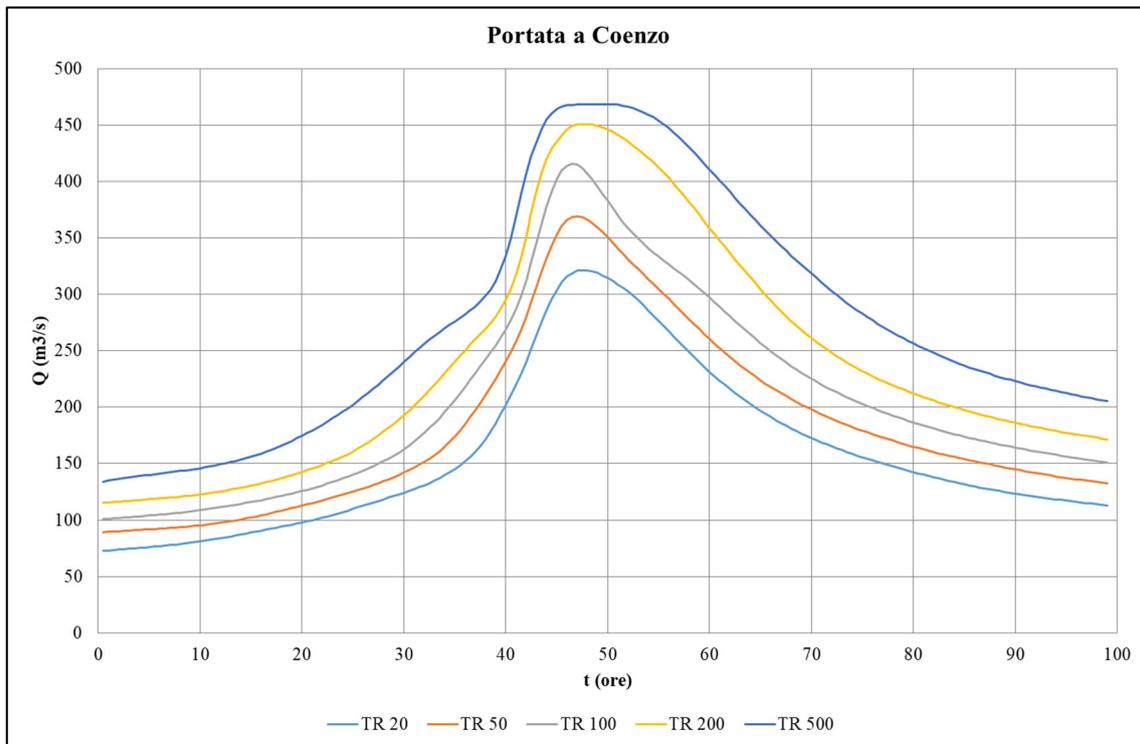


Figura 4-20. Idrogrammi di portata ottenuti dal modello 2D (esondazioni consentite) a Coenzo per diversi tempi di ritorno.

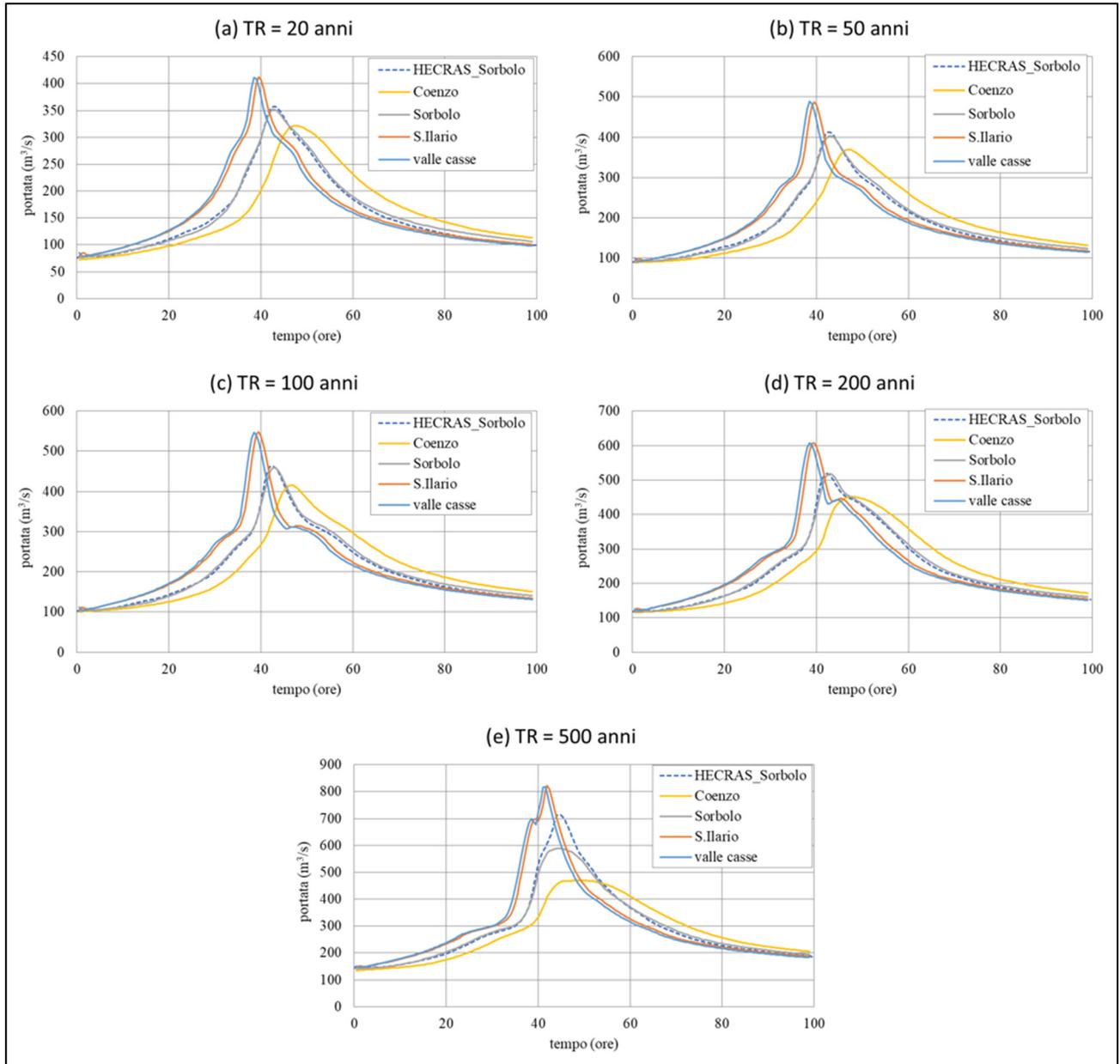


Figura 4-21. Idrogrammi di portata ottenuti dal modello 2D (esondazioni consentite) per diversi tempi di ritorno in alcune sezioni significative. Per confronto, sono riportati anche gli idrogrammi a Sorbolo derivanti dalla modellazione 1D con esondazioni impedito.

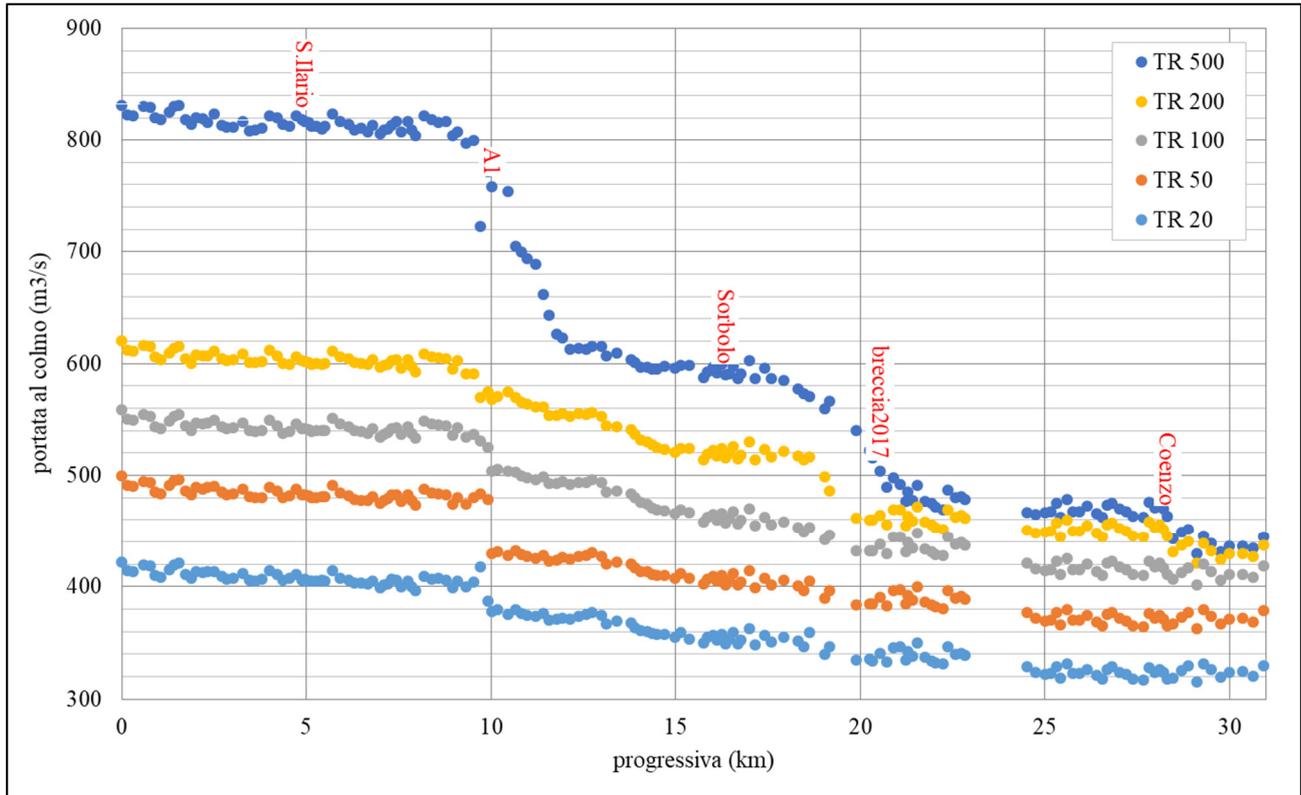


Figura 4-22. Valori della portata al colmo lungo l’asta ottenuti dal modello 2D (esondazioni consentite) per diversi tempi di ritorno.

4.4 Valutazione dell’incidenza del cambiamento climatico sulle analisi d’asta

L’analisi della propagazione dell’onda di piena sintetica con tempo di ritorno pari a 200 anni è stata ripetuta per valutare se e quanto, a causa del cambiamento climatico (CC), la sicurezza idraulica possa eventualmente ridursi nel futuro.

In base alle analisi condotte da ARPAE [13], l’idrogramma sintetico duecentennale “post CC” ha lo stesso volume di quello “pre CC” a valle della confluenza con Termina-Masdone (circa $95 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), ma la portata al colmo ha un valore incrementato circa del 37% (da $951 \text{ m}^3/\text{s}$ a $1307 \text{ m}^3/\text{s}$).

Simulando la propagazione lungo l’asta del torrente Enza con il modello 1D (con esondazioni impedito), analogamente a quanto esposto nel paragrafo 4.2, è possibile osservare che il volume immagazzinato nelle casse è sostanzialmente lo stesso (6.25 e $3.85 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per la cassa di monte e di valle, rispettivamente)

rispetto al caso "pre CC" (si confronti con Tabella 4.1). Tuttavia, la portata al colmo dell'idrogramma in uscita dalle casse "post CC" risulta maggiore rispetto al valore attuale. La Figura 4-23 mostra il confronto tra gli idrogrammi pre- e post-cambiamento climatico in alcune sezioni significative. A valle delle casse, la portata al colmo aumenta da circa 600 m³/s a circa 750 m³/s. Proseguendo verso valle, lo scostamento tra le portate al colmo pre- e post-CC si riduce, in virtù della laminazione che avviene lungo l'alveo. Ad esempio, a Sorbolo si ha un incremento della portata al colmo da 520 a 580 m³/s, che si ripercuote in un incremento di circa 25 cm nel livello massimo simulato (Figura 4-24).

La Figura 4-25 mostra le differenze in termini di massima quota idrica simulata lungo l'asta a valle delle casse (solo nel tratto critico a partire dall'A1) e fino alla confluenza in Po. L'incremento medio di livello "post CC" è di circa 32 cm rispetto ai valori attuali.

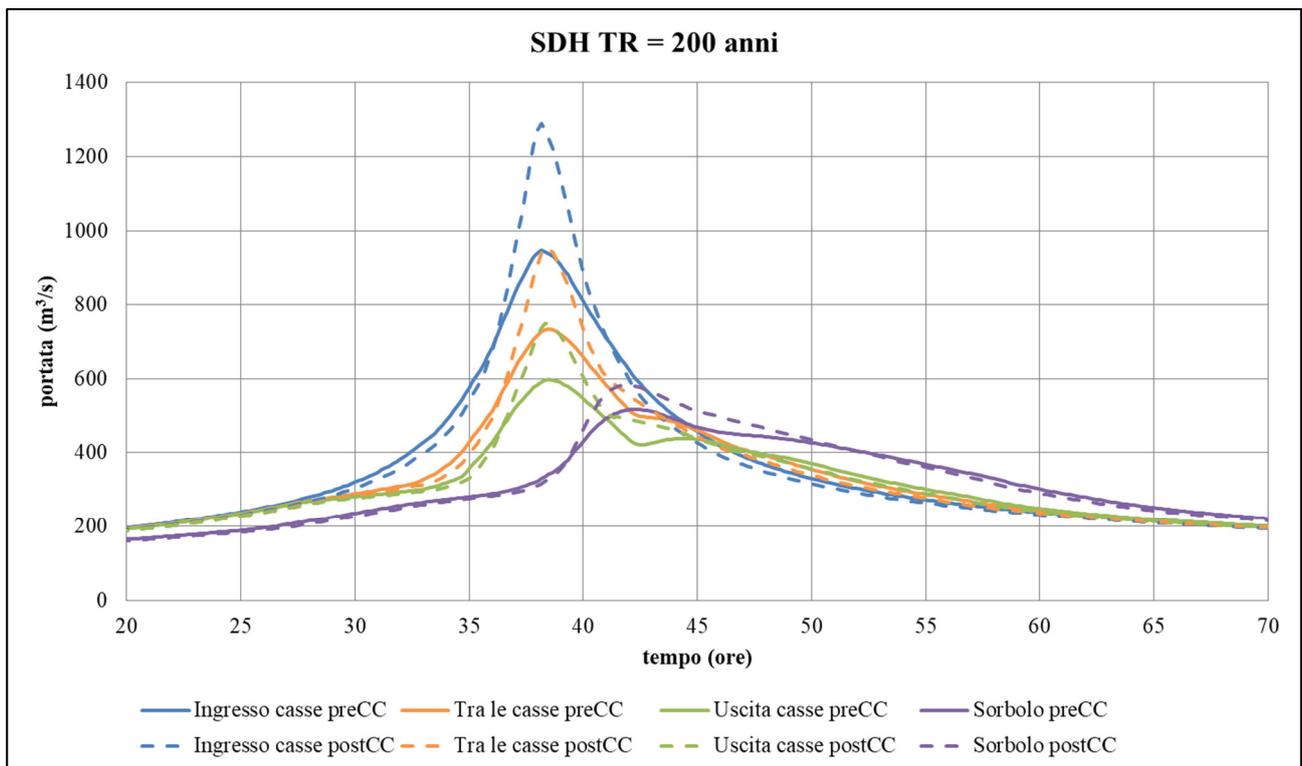


Figura 4-23. Confronto tra gli idrogrammi di portata in alcune sezioni significative, ottenuti dalla modellazione 1D, per TR = 200 anni allo stato attuale e in presenza di cambiamento climatico.

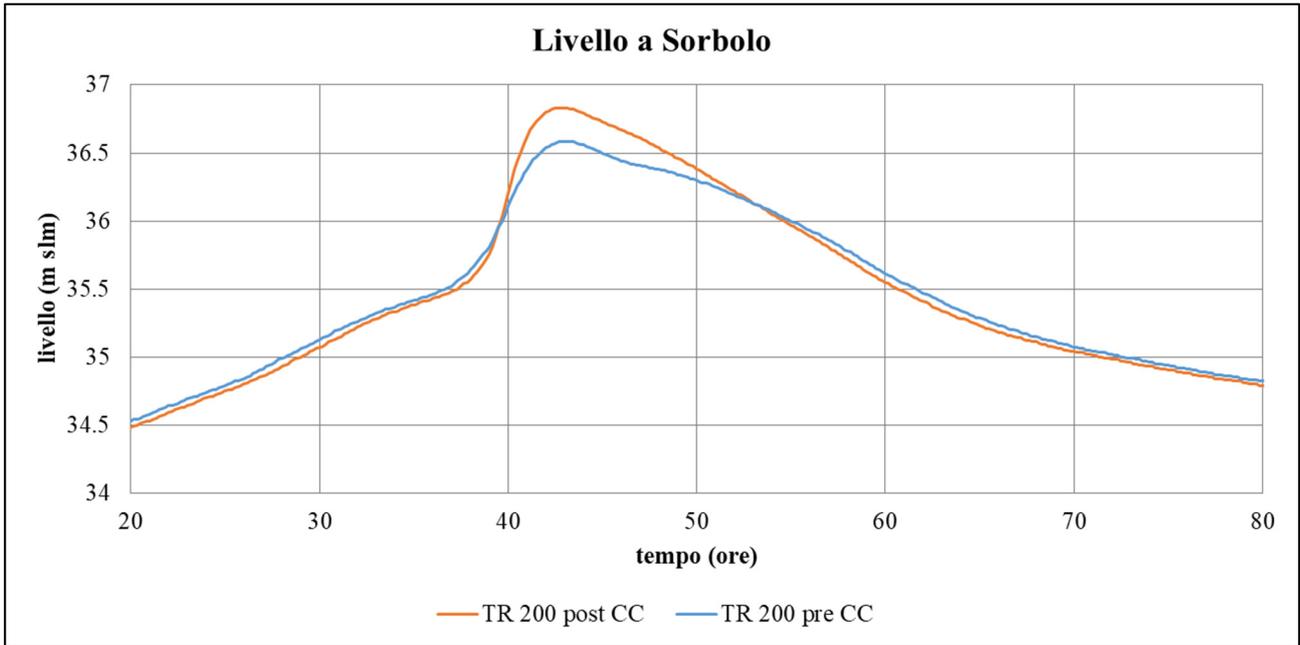


Figura 4-24. Confronto tra l'andamento del livello idrico a Sorbolo, ottenuto dalla modellazione 1D, per TR = 200 anni allo stato attuale e in presenza di cambiamento climatico.

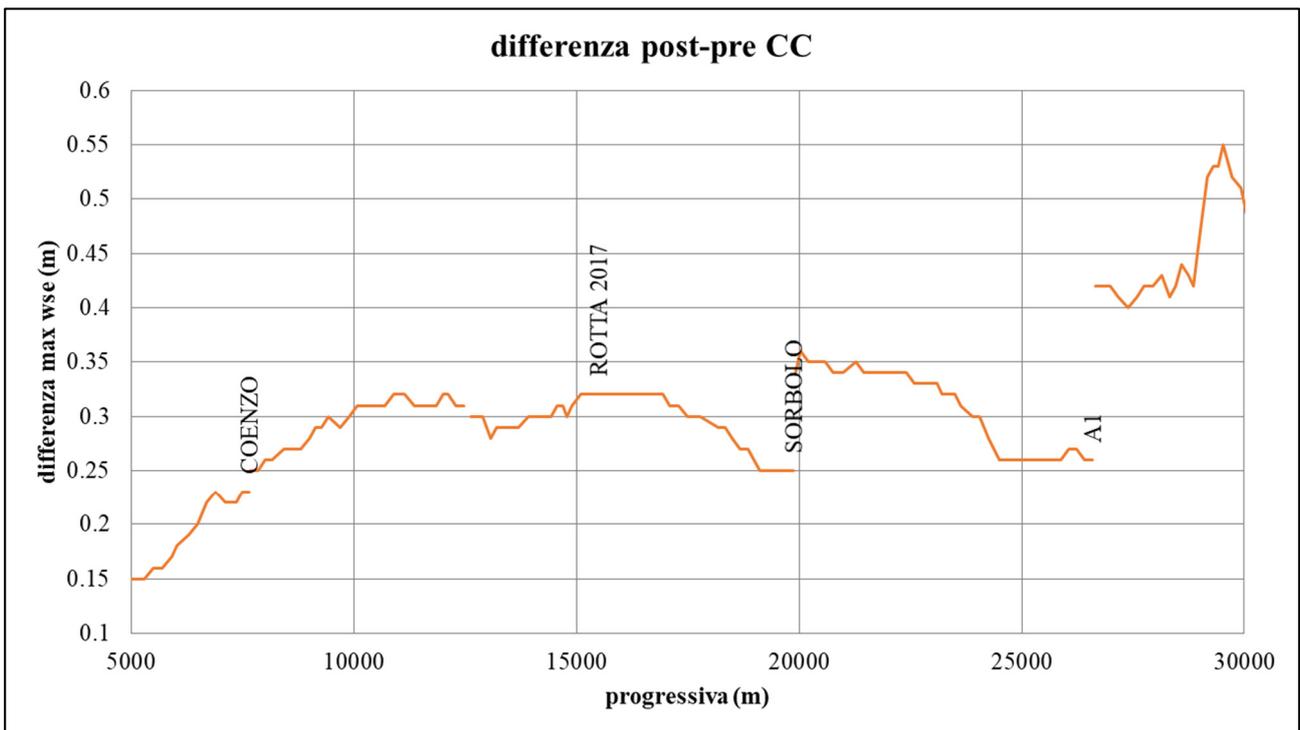


Figura 4-25. Incremento delle massime quote idriche ottenute mediante modellazione 1D lungo l'asta di valle (limitatamente al tratto a valle dell'A1, dove si erano individuate criticità) in presenza di cambiamento climatico per l'idrogramma sintetico con TR = 200 anni. La progressiva va da valle verso monte.

5 Idrogrammi derivati dalle copule

5.1 Scelta delle configurazioni da simulare

Sulla base delle analisi riportate al capitolo precedente e su indicazione di AdBPo, si è convenuto di limitare il confronto tra i risultati ottenuti utilizzando gli idrogrammi sintetici (SDH) e gli idrogrammi ricavati dalle copule ai soli tempi di ritorno di 50, 100 e 200 anni. L'evento ventennale non risulta infatti particolarmente critico per l'asta fluviale oggetto di studio, mentre la piena cinquecentennale rappresenta un evento talmente gravoso da non ritenere necessario un ulteriore approfondimento con diverse forme dell'idrogramma.

Sulla base delle indicazioni fornite da AdBPo, sono state selezionate le seguenti coppie volume-portata al colmo per i tre tempi di ritorno (la numerazione si riferisce alla consegna ARPAE [13]):

- TR = 50 anni: copula 5 ($Q_c = 702 \text{ m}^3/\text{s}$, Volume = $51.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) e copula 10 ($Q_c = 728 \text{ m}^3/\text{s}$, Volume = $47.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$);
- TR = 100 anni: copula 5 ($Q_c = 797 \text{ m}^3/\text{s}$, Volume = $66.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) e copula 10 ($Q_c = 828 \text{ m}^3/\text{s}$, Volume = $62 \cdot 10^6 \text{ m}^3$);
- TR = 200 anni: copula 5 ($Q_c = 912 \text{ m}^3/\text{s}$, Volume = $86.1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) e copula 10 ($Q_c = 951 \text{ m}^3/\text{s}$, Volume = $80.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$).

Le forme d'onda analizzate, su indicazione di AdBPo, sono quelle ottenute coi metodi del serbatoio lineare e di Nash (cfr. consegna ARPAE [13]).

Per ognuno dei tre tempi di ritorno, si confronteranno dunque i risultati di 5 simulazioni, effettuate con il modello 1D a partire dalla confluenza Termina-Masdone e imponendo come condizione al contorno di monte i diversi idrogrammi (SDH, copula 5 + serbatoio lineare, copula 5 + Nash, copula 10 + serbatoio lineare, copula 10 + Nash). Tali idrogrammi sono riportati nella Figura 5-1 per TR = 50 anni, nella Figura 5-2 per TR = 100 anni e nella Figura 5-3 per TR = 200 anni. Gli idrogrammi sono stati fatti in modo avere il colmo in ingresso allo stesso istante temporale. Si noti che la copula identificata col numero 10 ha una portata al colmo circa coincidente con il valore di Q_c dell'idrogramma

sintetico di pari tempo di ritorno, mentre la copula 5 ha una portata al colmo leggermente inferiore ma un volume di piena superiore.

Per gli idrogrammi selezionati sono stati calcolati i volumi di piena al di sopra di prefissate soglie di portata, che come visto in precedenza hanno una grande influenza sull'efficienza delle casse nella laminazione. La Figura 5-4 riporta la curva dei volumi sopra soglia per TR = 50 anni; si può già osservare come gli idrogrammi derivati dalle copule presentino valori del volume sopra soglia sempre superiori a quelli dell'idrogramma sintetico (anche di diversi milioni di m³). Lo stesso vale per gli idrogrammi con TR = 100 anni (Figura 5-5) e 200 anni (Figura 5-6). Con riferimento alla soglia di portata di 300 m³/s, ad esempio, il volume sopra soglia varia da 9.5 (SDH) a oltre 17·10⁶ m³ (copule con Nash) per TR = 50 anni, e analogamente da 13 a 25-26·10⁶ m³ per TR = 100 anni e da 18.5 a quasi 40·10⁶ m³ per TR = 200 anni (cioè circa il doppio).

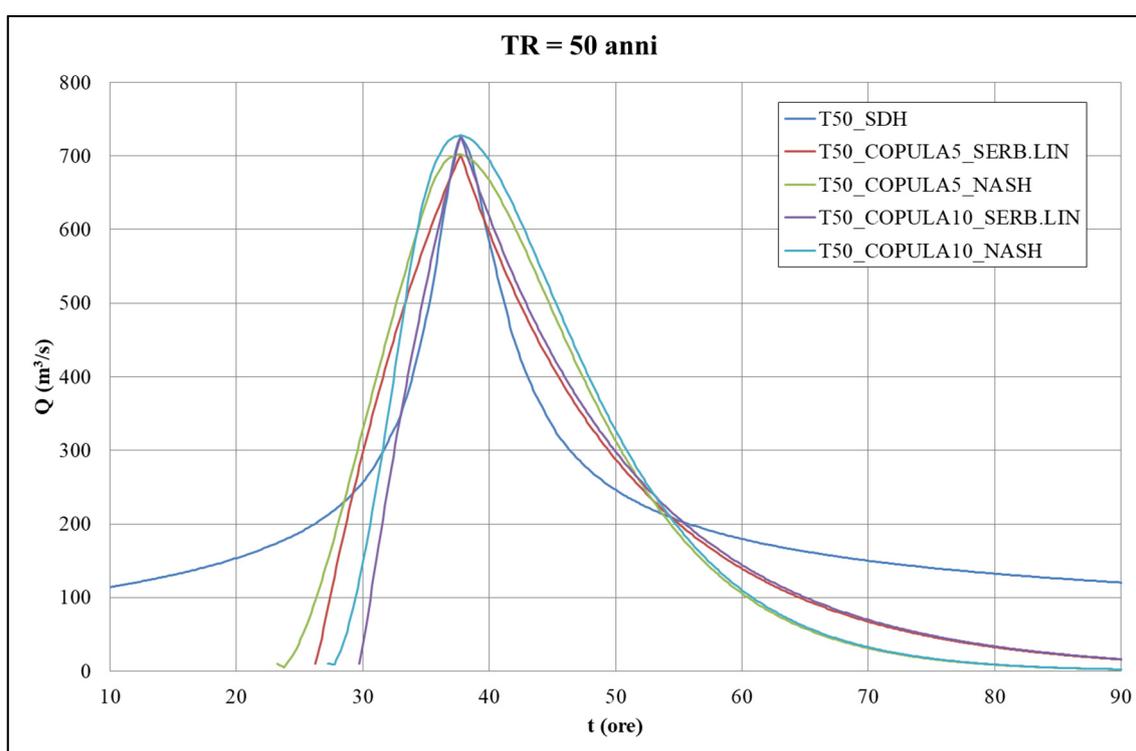


Figura 5-1. Idrogrammi simulati con TR = 50 anni (a valle della confluenza Termina-Masdone).

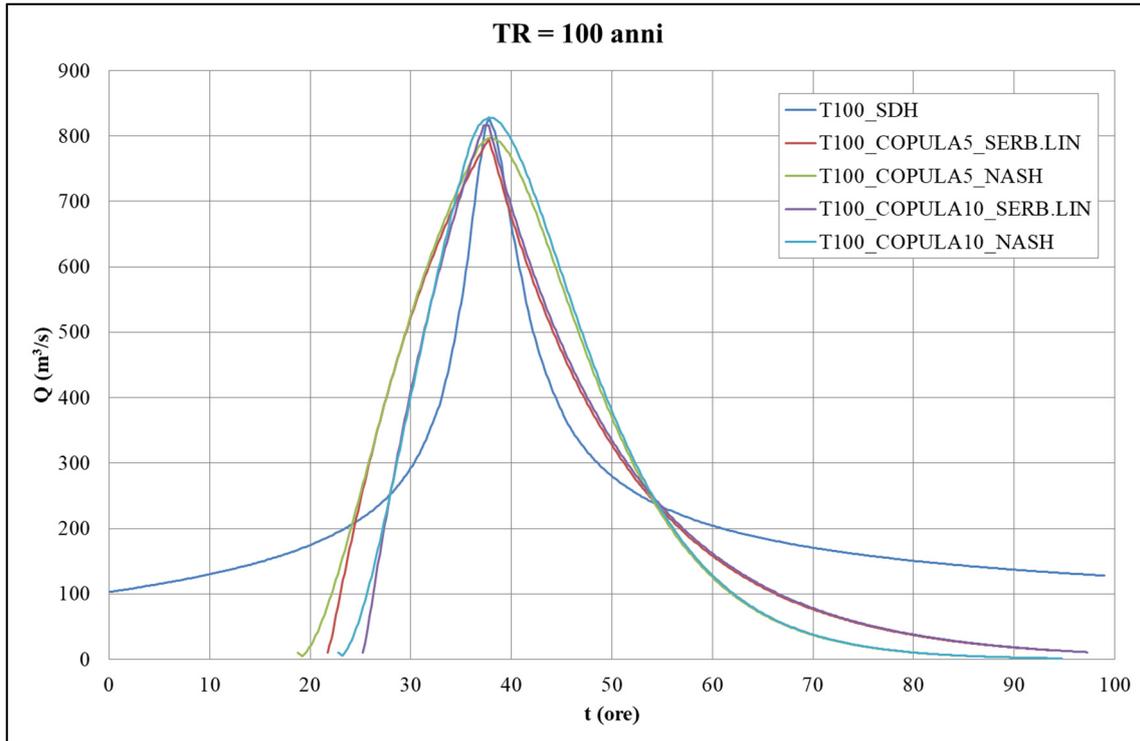


Figura 5-2. Idrogrammi simulati con TR = 100 anni (a valle della confluenza Termina-Masdone).

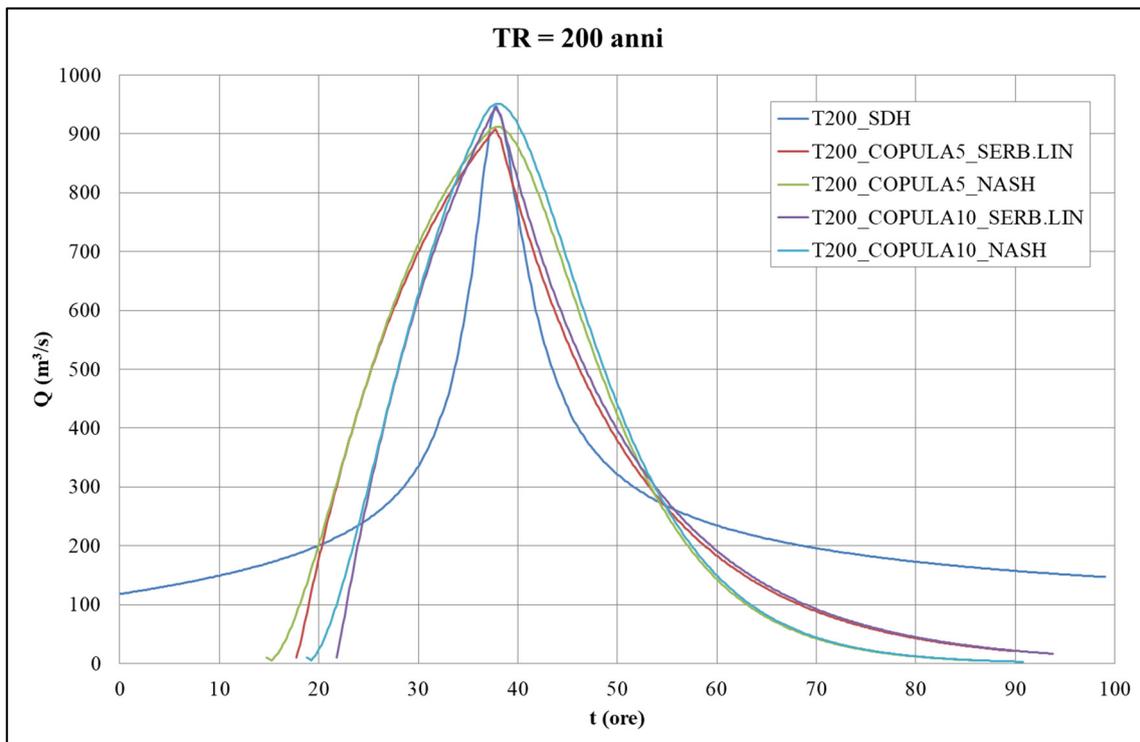


Figura 5-3. Idrogrammi simulati con TR = 200 anni (a valle della confluenza Termina-Masdone).

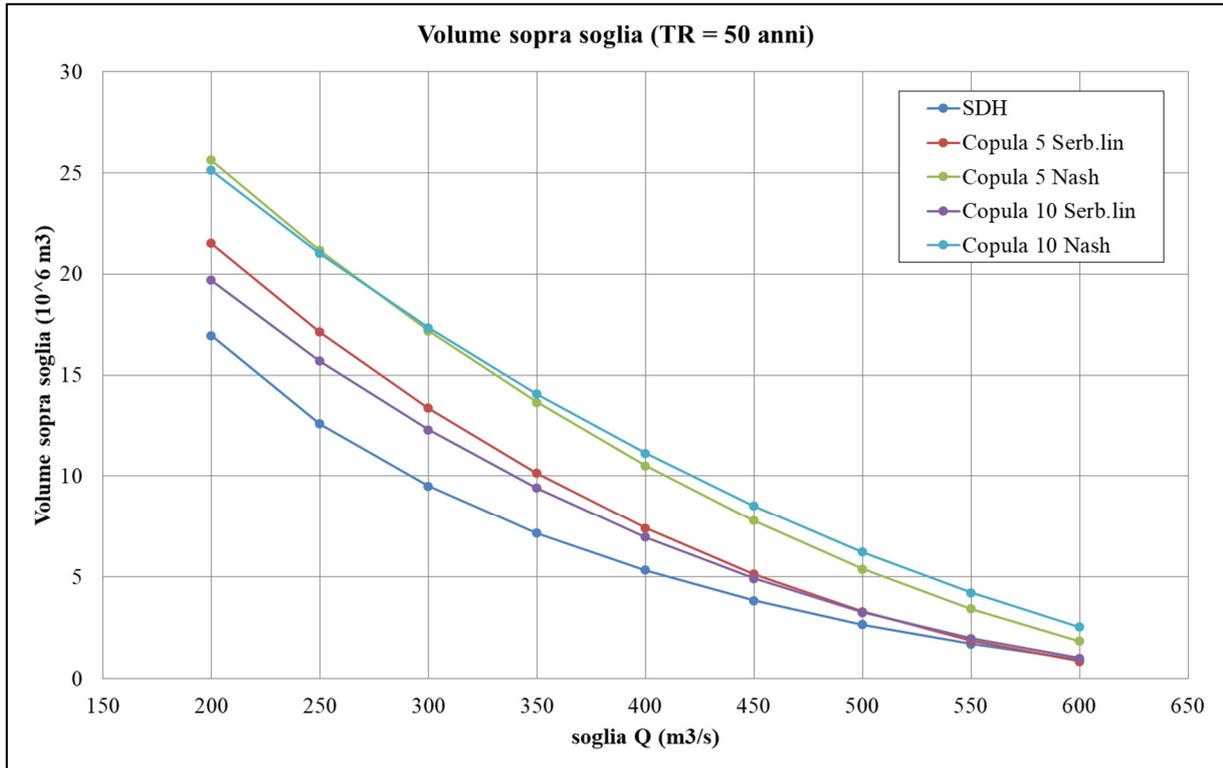


Figura 5-4. Volumi di piena al di sopra di prefissate soglie di portata per gli idrogrammi considerati con tempo di ritorno pari a 50 anni.

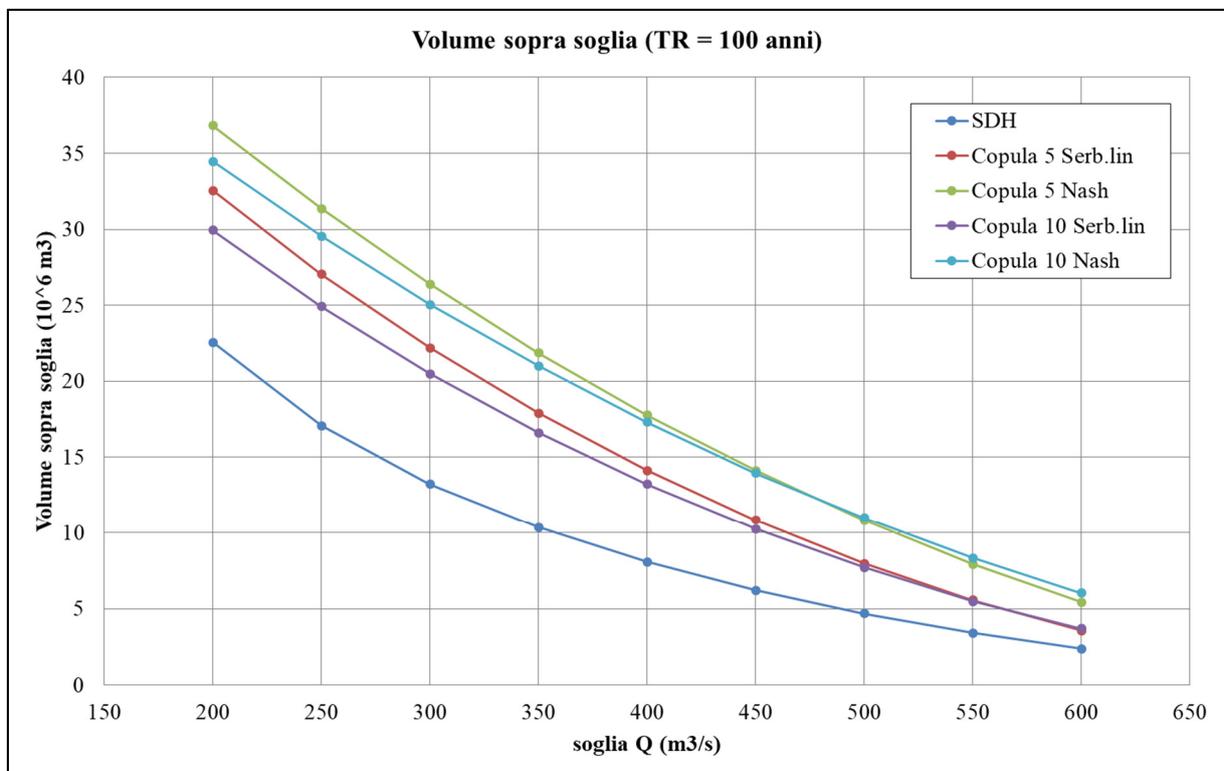


Figura 5-5. Volumi di piena al di sopra di prefissate soglie di portata per gli idrogrammi considerati con tempo di ritorno pari a 100 anni.

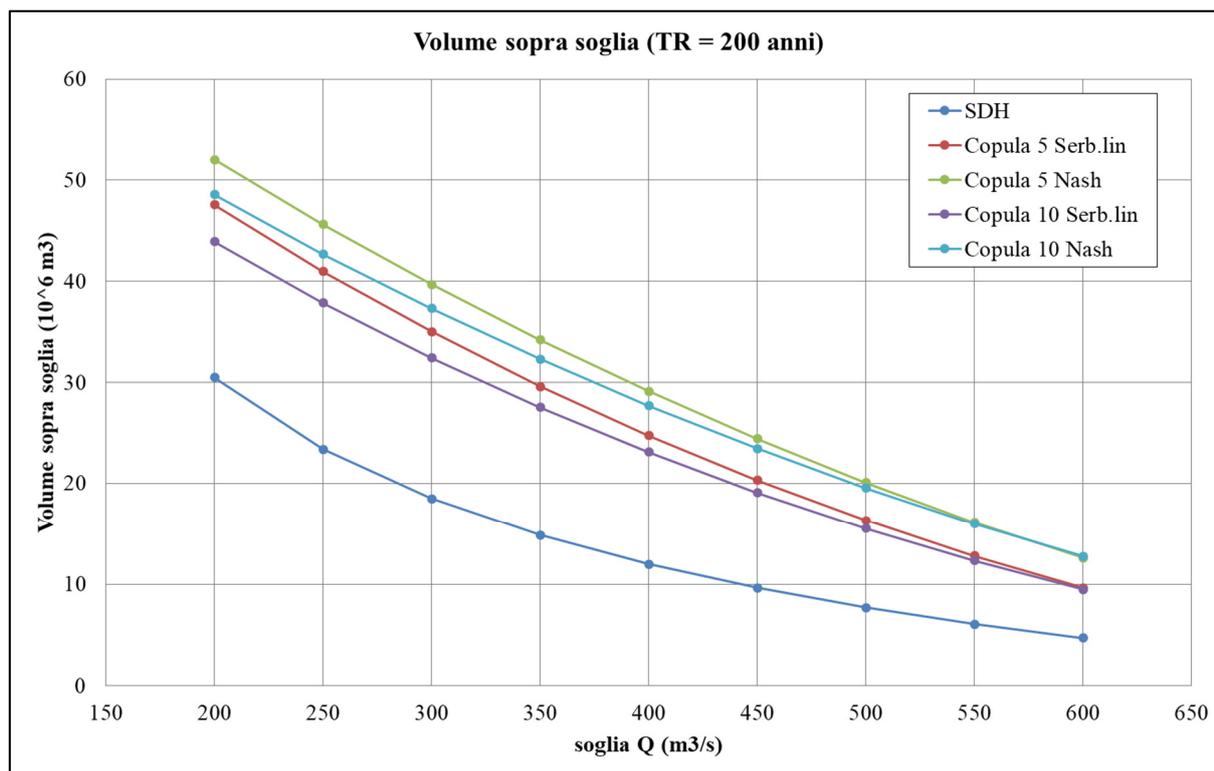


Figura 5-6. Volumi di piena al di sopra di prefissate soglie di portata per gli idrogrammi considerati con tempo di ritorno pari a 200 anni.

5.2 Idrogrammi con tempo di ritorno pari a 50 anni

La Figura 5-7 sintetizza il funzionamento delle casse d'espansione (monte e valle) per i diversi idrogrammi derivati dalle copule per TR = 50 anni. Tali grafici sono da confrontare con quelli relativi alla simulazione dell'idrogramma sintetico (Figura 4-5). Utilizzando i due idrogrammi con forma derivata dal metodo del serbatoio lineare si ha un funzionamento simile a quello relativo all'idrogramma sintetico, anche se in alcuni casi entra in funzione per un breve periodo lo sfioratore di troppo pieno. I due idrogrammi alla Nash danno origine ad un contributo molto più evidente dello sfioratore di sicurezza, che determina la formazione di un secondo picco di portata in uscita a valle delle casse, con un valore comunque inferiore al picco principale. Al di là della diversità della forma d'onda, si osserva che le casse sono in grado di garantire una riduzione del colmo di portata circa del 34% circa per tutti i casi considerati.

La Tabella 5.1 riporta i valori dei volumi immagazzinati nelle due casse. Rispetto all'idrogramma sintetico, i diversi idrogrammi ottenuti dalle copule danno origine

ad un maggiore riempimento delle casse (invasate quasi completamente). L'idrogramma in uscita a valle delle casse raggiunge valori al colmo attorno a 460-480 m³/s (Figura 5-8). A Sorbolo (Figura 5-9), la portata al colmo si riduce a circa 415 m³/s per gli idrogrammi ottenuti dal metodo del serbatoio lineare (analogamente all'idrogramma sintetico) in virtù della laminazione naturale lungo l'asta, mentre le simulazioni che sfruttano la forma d'onda alla Nash restituiscono valori di colmo pari a 440-450 m³/s, di poco superiori alla portata compatibile a franco zero per l'asta. La riduzione dell'effetto di laminazione è causato tra l'altro dal maggior volume di piena di questi idrogrammi. È evidente dunque che la forma d'onda riveste una certa importanza non solo per il funzionamento delle casse, ma anche per la successiva propagazione delle onde lungo l'asta di valle.

Tabella 5.1. Confronto tra i volumi immagazzinati nelle casse per i diversi idrogrammi considerati.

Idrogramma		Volume immagazzinato nelle casse ($\cdot 10^6$ m ³)		
		Monte	Valle	Totale
TR = 50 anni	SDH	4.83	2.36	7.19
	Copula 5 Serb.Lin.	6.01	3.54	9.55
	Copula 5 Nash	6.21	3.82	10.03
	Copula 10 Serb.Lin.	5.80	3.22	9.02
	Copula 10 Nash	6.39	3.99	10.38
TR = 100 anni	SDH	5.89	3.35	9.24
	Copula 5 Serb.Lin.	6.34	3.94	10.28
	Copula 5 Nash	6.43	4.03	10.46
	Copula 10 Serb.Lin.	6.27	3.89	10.16
	Copula 10 Nash	6.39	3.99	10.38
TR = 200 anni	SDH	6.22	3.82	10.04
	Copula 5 Serb.Lin.	6.55	4.24	10.79
	Copula 5 Nash	6.57	4.30	10.87
	Copula 10 Serb.Lin.	6.56	4.30	10.86
	Copula 10 Nash	6.56	4.30	10.86

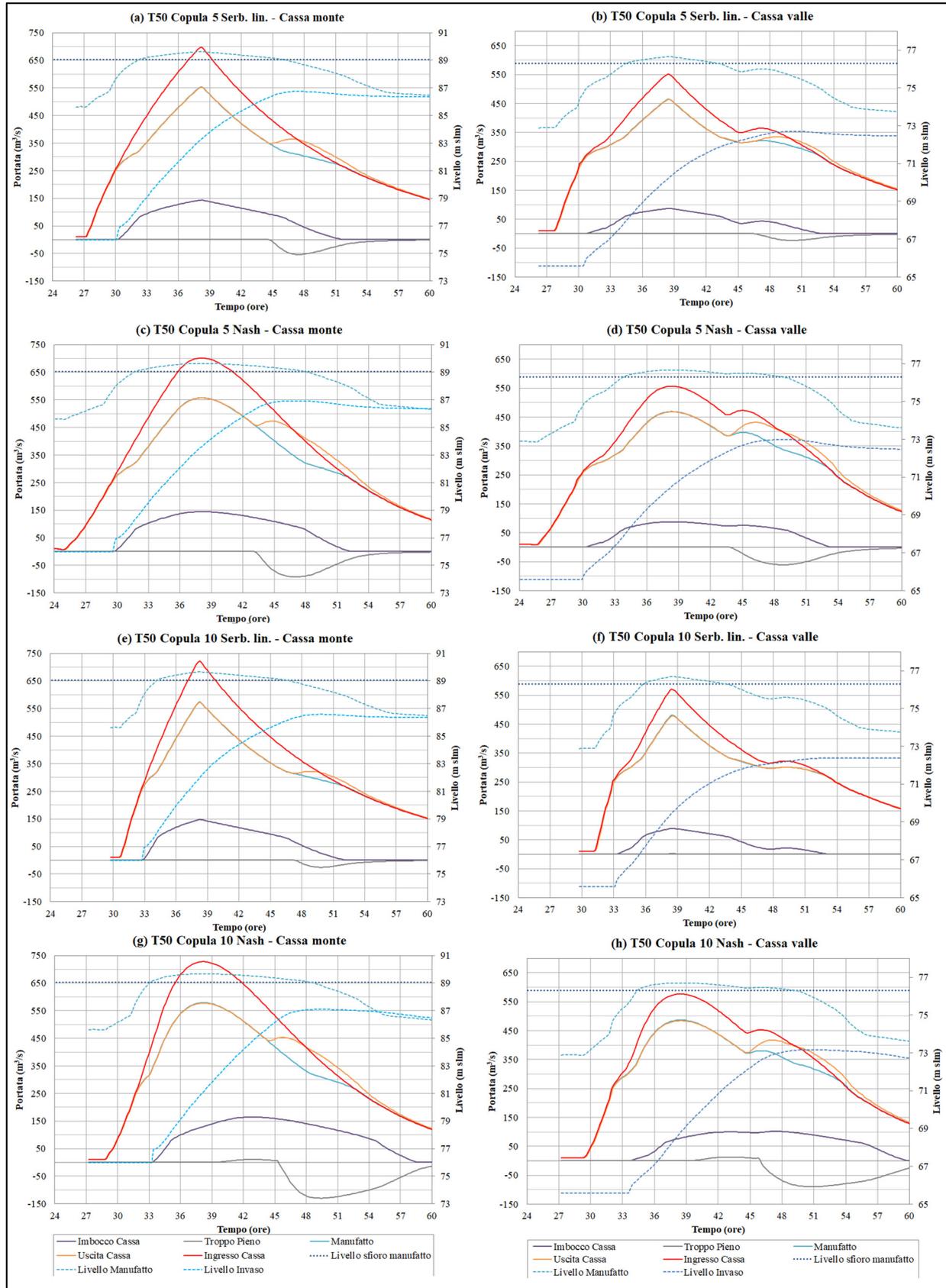


Figura 5-7. Funzionamento delle casse per gli idrogrammi con TR = 50 anni. Sono indicati contestualmente gli andamenti delle portate (linee continue, asse a sinistra) e dei livelli (linee tratteggiate, asse a destra).

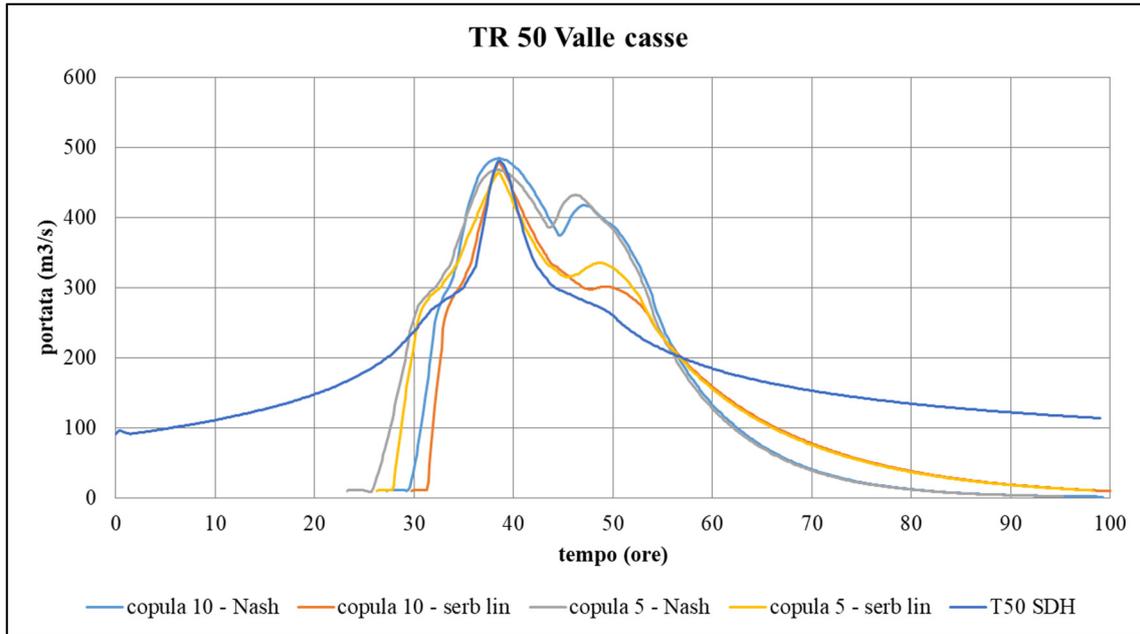


Figura 5-8. Idrogrammi di portata ottenuti dal modello 1D a valle delle casse per diversi idrogrammi con tempo di ritorno pari a 50 anni.

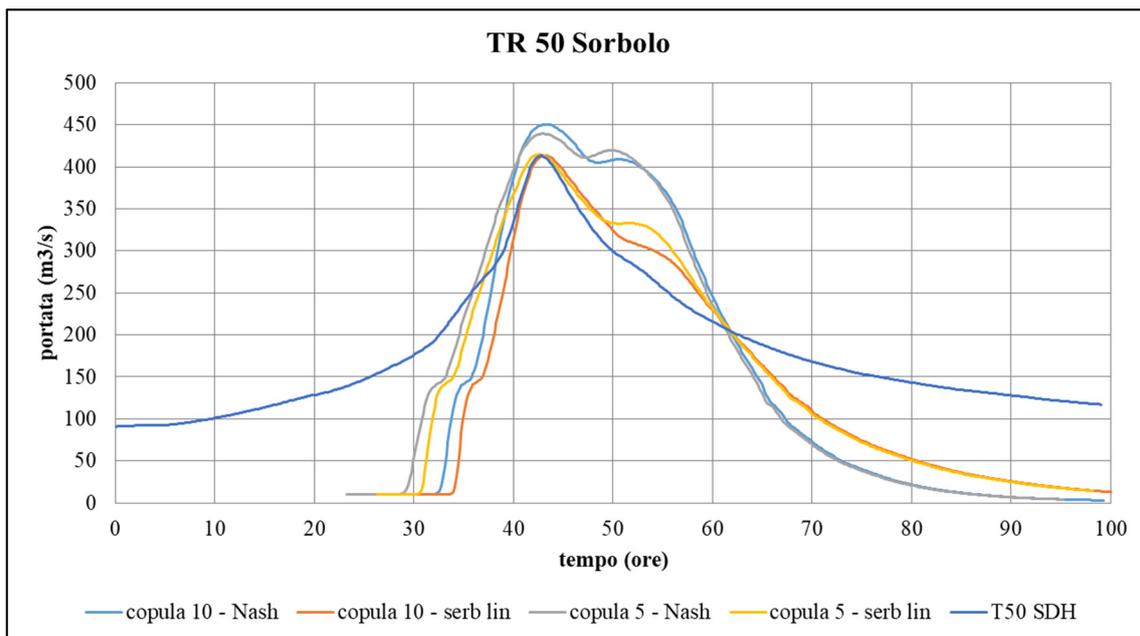


Figura 5-9. Idrogrammi di portata ottenuti dal modello 1D a Sorbolo per diversi idrogrammi con tempo di ritorno pari a 50 anni.

5.3 Idrogrammi con tempo di ritorno pari a 100 anni

La Figura 5-10 sintetizza il funzionamento delle casse d'espansione (monte e valle) per i diversi idrogrammi derivati dalle copule per TR = 100 anni. Tali grafici sono da confrontare con quelli relativi all'idrogramma sintetico (Figura 4-6).

In tutte le simulazioni si assiste al riempimento completo di entrambe le casse, con conseguente entrata in funzione degli sfioratori di troppo pieno. I volumi immagazzinati nelle casse sono riportati nella Tabella 5.1. La formazione del secondo picco, dovuto proprio allo scarico in alveo dal troppo pieno, risulta particolarmente accentuata per le simulazioni relative agli idrogrammi ottenuti col metodo di Nash, per le quali tale picco ha un valore superiore al primo. L'efficienza del sistema di casse, che negli altri casi (SDH e serbatoio lineare) si assesta tra il 30 e il 35%, si riduce a 15% (copula 5) e 24% (copula 10) per gli idrogrammi alla Nash.

A differenza del caso con tempo di ritorno pari a 50 anni, la portata al colmo in uscita dalle casse (Figura 5-11) ha un range di valori molto più ampio: il colmo è tra 530 e 560 m³/s per SDH e serbatoio lineare, mentre per gli idrogrammi alla Nash raggiunge 633 m³/s (copula 10) e 674 m³/s (copula 5). Questi ultimi valori superano addirittura il colmo in uscita di circa 600 m³/s che si ottiene per l'idrogramma sintetico con tempo di ritorno superiore (200 anni).

Anche a Sorbolo (Figura 5-12) le differenze tra gli andamenti delle portate ottenuti per le diverse simulazioni sono molto accentuate. Rispetto al caso dell'idrogramma sintetico, che presenta un colmo di circa 460 m³/s, tutti gli idrogrammi derivati dalle copule hanno valori superiori: addirittura per le forme alla Nash si arriva a un picco di 580-615 m³/s, assolutamente non compatibile con l'asta fluviale e superiore al colmo che si ottiene dalla simulazione dell'idrogramma sintetico duecentennale. L'idrogramma derivante dalla copula 5 con la forma del serbatoio lineare, invece, dà origine a un colmo a Sorbolo di circa 530 m³/s, proprio paragonabile al caso dell'idrogramma sintetico con TR = 200 anni. Trascurando le eventuali tracimazioni (si ricorda che il modello 1D è a esondazioni impedito), l'effetto di laminazione naturale tra l'uscita delle casse e Sorbolo risulta meno accentuato per gli idrogrammi derivanti dalle copule rispetto all'idrogramma sintetico, a causa del maggior volume dell'onda di piena. Si può dunque ribadire l'estrema influenza della forma d'onda prescelta su tutti i risultati.

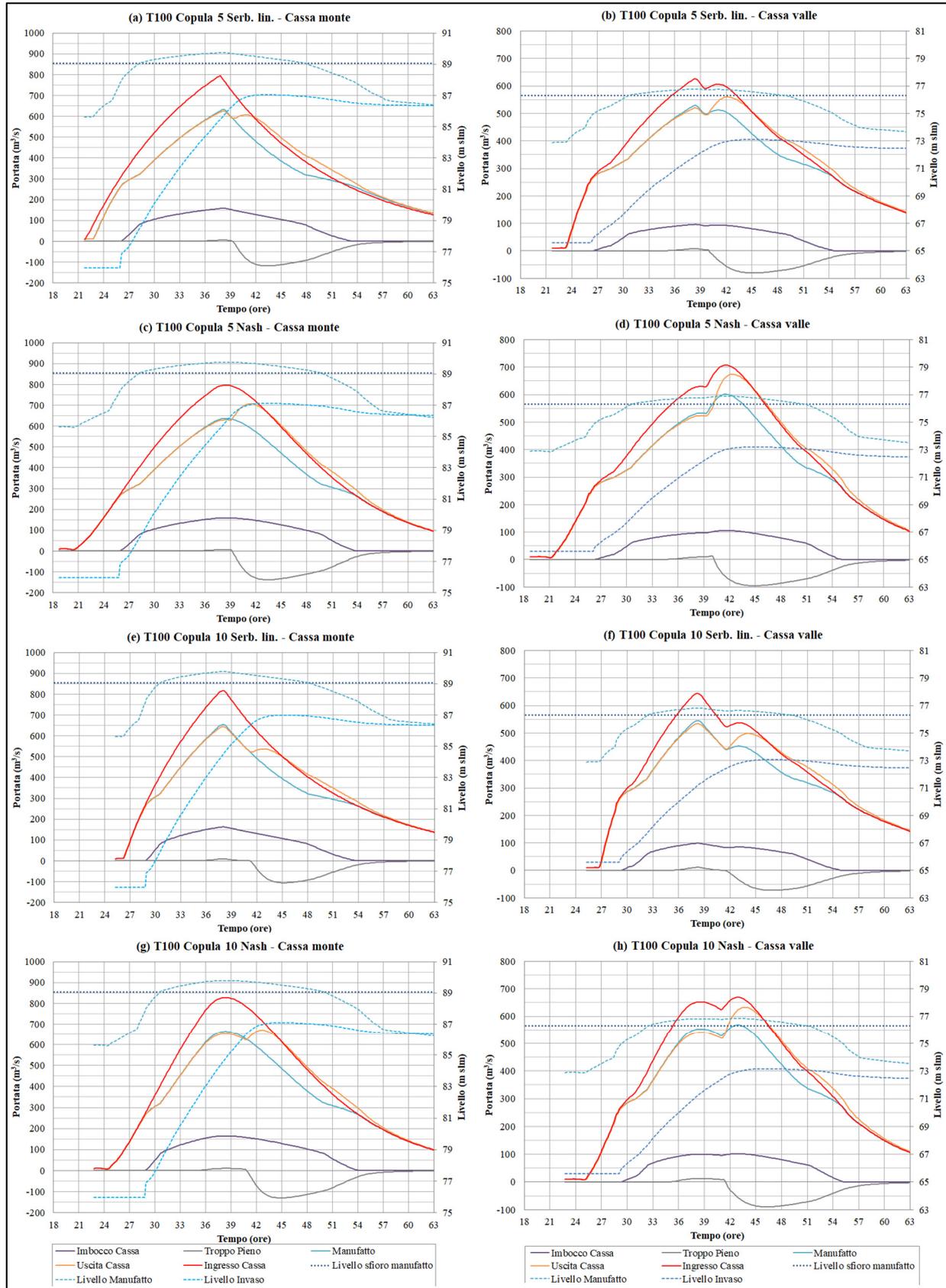


Figura 5-10. Funzionamento delle casse per gli idrogrammi con TR = 100 anni. Sono indicati contestualmente gli andamenti delle portate (linee continue, asse a sinistra) e dei livelli (linee tratteggiate, asse a destra).

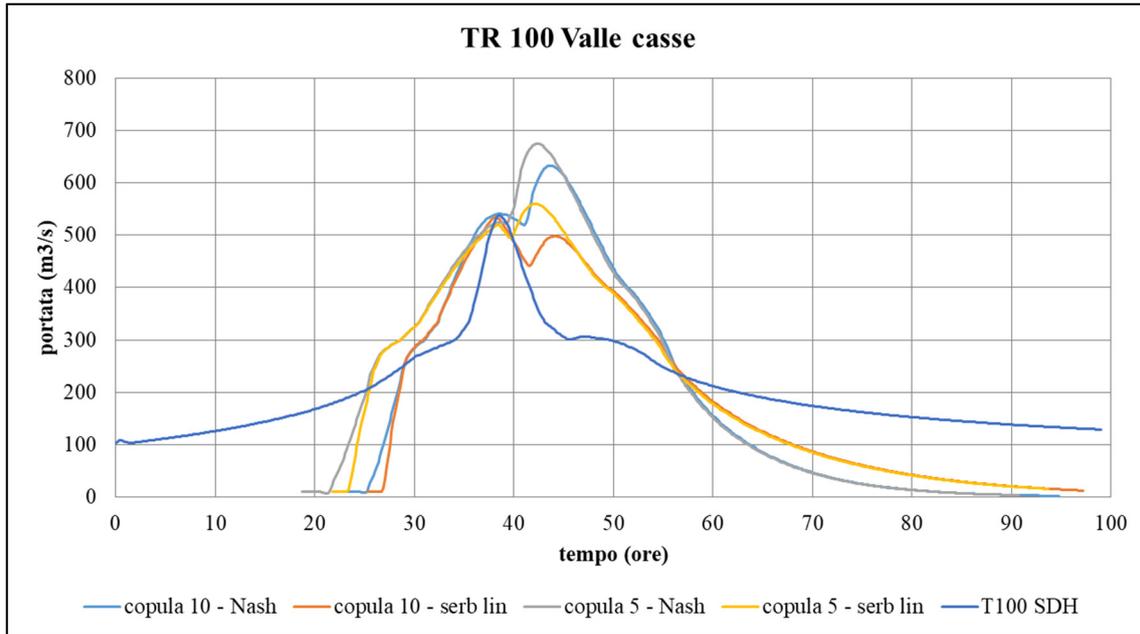


Figura 5-11. Idrogrammi di portata ottenuti dal modello 1D a valle delle casse per diversi idrogrammi con tempo di ritorno pari a 100 anni.

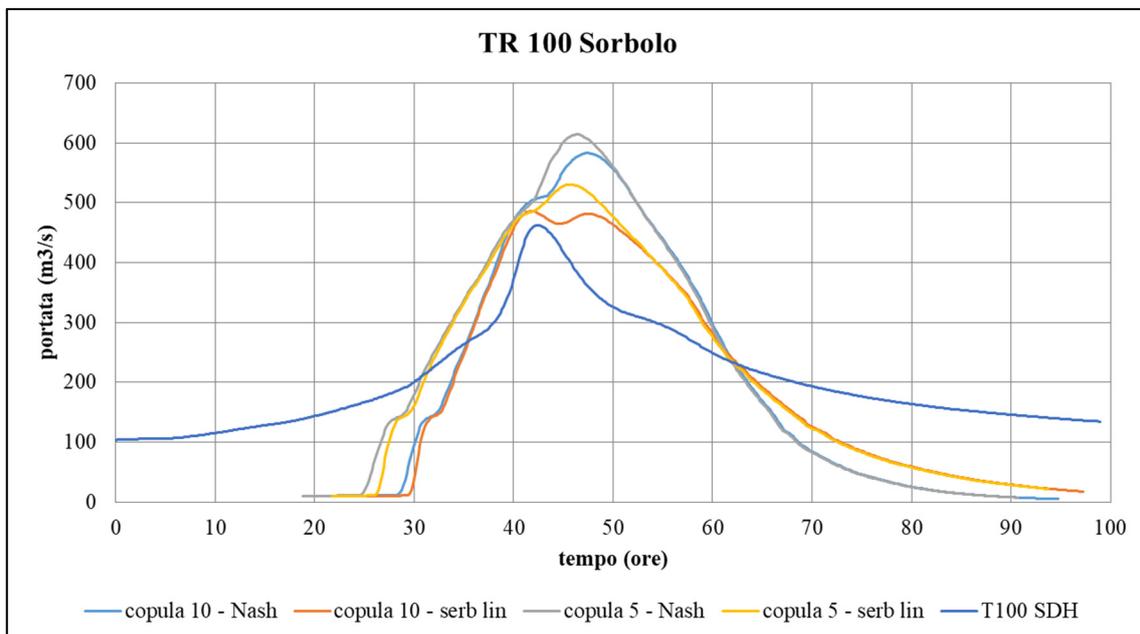


Figura 5-12. Idrogrammi di portata ottenuti dal modello 1D a Sorbolo per diversi idrogrammi con tempo di ritorno pari a 100 anni.

5.4 Idrogrammi con tempo di ritorno pari a 200 anni

La Figura 5-13 sintetizza il funzionamento delle casse d'espansione (monte e valle) per i diversi idrogrammi derivati dalle copule per TR = 200 anni. Tali grafici sono da confrontare con quelli relativi all'idrogramma sintetico (Figura 4-7).

Anche in questo caso, in tutte le simulazioni si assiste al riempimento completo di entrambe le casse, con conseguente entrata in funzione degli sfioratori di troppo pieno. I volumi immagazzinati nelle casse sono riportati nella Tabella 5.1. Si osserva una sovrapposizione tra il picco di portata in uscita dal manufatto principale e quello in arrivo dallo scarico di troppo pieno. L'efficienza del sistema di casse, che nel caso dell'idrogramma sintetico era del 37%, è molto bassa, inferiore al 6% (ad eccezione del 13% per il caso della copula 10 con la forma d'onda del serbatoio lineare).

La portata in uscita dalle casse (Figura 5-14) ha un colmo tra 800 e 900 m³/s, mentre per l'idrogramma sintetico era di circa 730 m³/s. Di fatto, gli idrogrammi derivanti dalle copule possono essere paragonabili, in termini di colmo, all'idrogramma sintetico con tempo di ritorno superiore (500 anni), che arrivava a 810 m³/s.

Anche a Sorbolo (Figura 5-15) l'andamento delle portate è simile all'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 500 anni, con colmi tra 700 e 800 m³/s (contro i 520 m³/s dell'idrogramma sintetico con TR = 200 anni). Tali valori non sono assolutamente compatibili con l'asta fluviale e genererebbero sicuramente delle tracimazioni diffuse nel tratto di valle. Si ricorda infatti che con il modello 1D le esondazioni sono impedito.

È dunque necessario porre particolare attenzione nella scelta di eventuali idrogrammi di progetto con assegnato tempo di ritorno, perché, al di là del valore del colmo, è soprattutto la forma (e il volume sopra soglia) a determinare l'efficacia o meno della laminazione nel sistema di casse e anche della laminazione naturale lungo l'asta di valle.

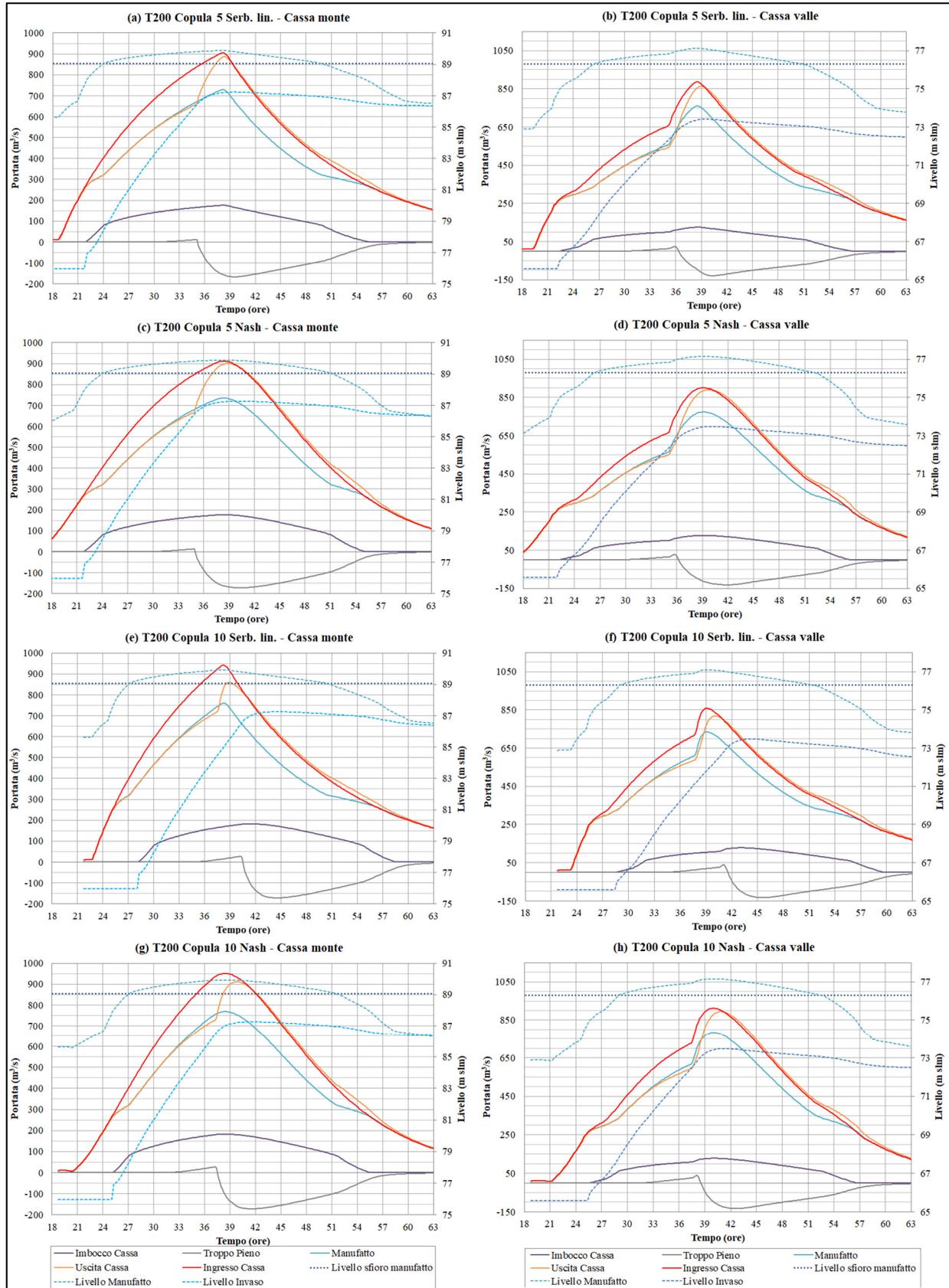


Figura 5-13. Funzionamento delle casse per gli idrogrammi con TR = 200 anni. Sono indicati contestualmente gli andamenti delle portate (linee continue, asse a sinistra) e dei livelli (linee tratteggiate, asse a destra).

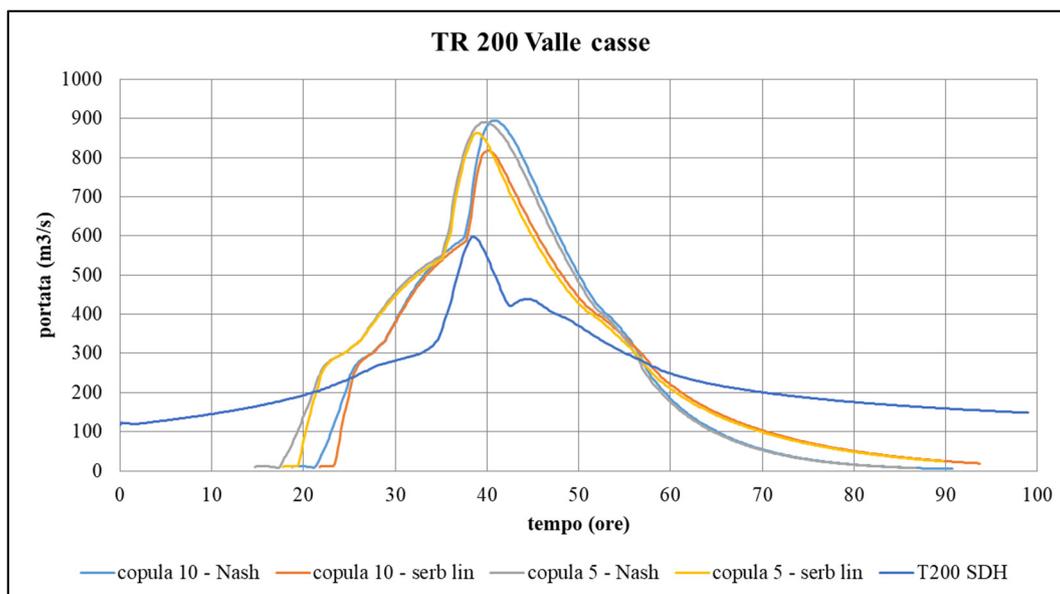


Figura 5-14. Idrogrammi di portata ottenuti dal modello 1D a valle delle casse per diversi idrogrammi con tempo di ritorno pari a 200 anni.

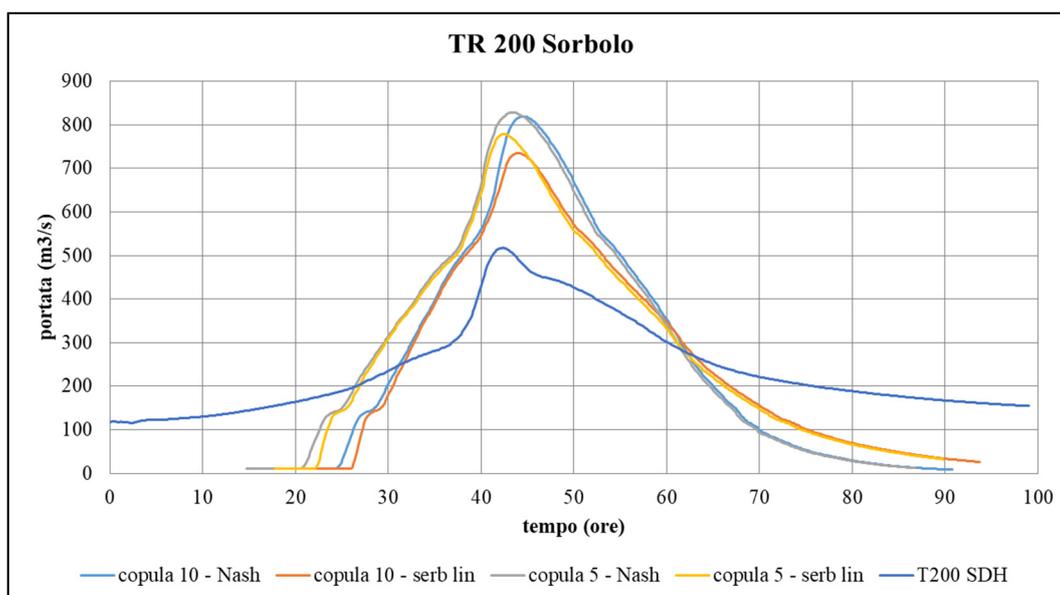


Figura 5-15. Idrogrammi di portata ottenuti dal modello 1D a valle delle casse per diversi idrogrammi con tempo di ritorno pari a 200 anni.

5.5 Massime quote idriche lungo l'asta

Sono infine stati confrontati, per i diversi idrogrammi considerati, gli involuipi delle massime quote idriche ottenute dalla modellazione 1D lungo l'asta di valle, con particolare attenzione al tratto tra l'A1 e Coenzo, che presenta diverse

criticità emerse dalle simulazioni bidimensionali (si veda il paragrafo 4.3). Si ricorda che i risultati sono relativi ad una modellazione ad esondazioni impedito. Sono qui riportati i grafici che mostrano le differenze tra le massime quote idriche ottenute per ciascuno degli idrogrammi derivanti dalle copule e quelle ottenute per l'idrogramma sintetico con lo stesso tempo di ritorno.

La Figura 5-16 è relativa a TR = 50 anni: mentre la propagazione dei due idrogrammi con la forma d'onda del serbatoio lineare dà origine a profili molto simili a quello ottenuto per l'idrogramma sintetico (differenze di ± 10 cm), quella degli idrogrammi alla Nash determina differenze maggiori (con incrementi anche superiori a 30 cm a valle di Sorbolo).

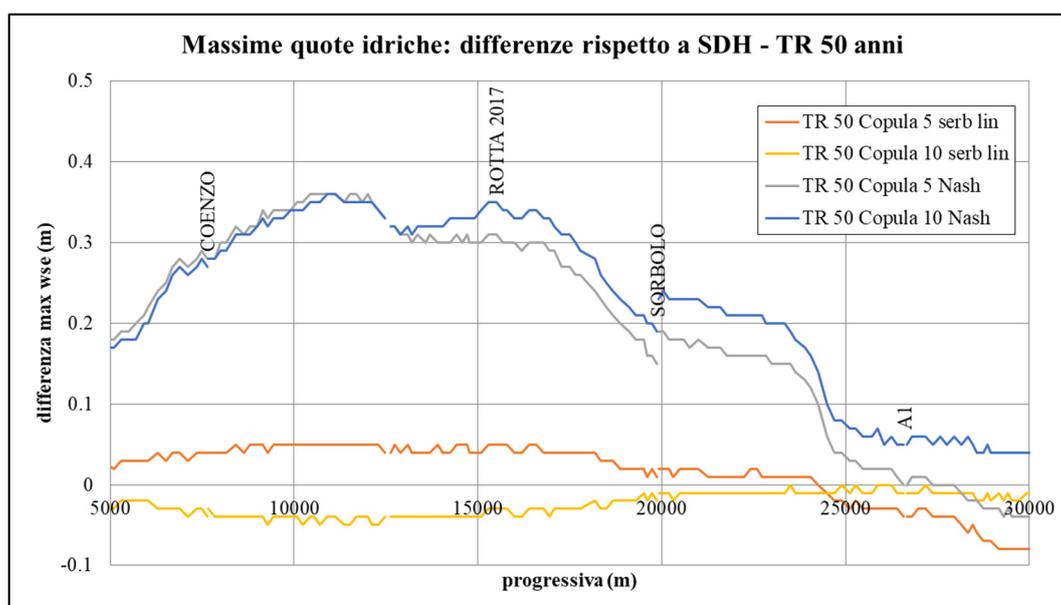


Figura 5-16. Differenza tra i profili di piena in termini di massime quote idriche ottenute dalla modellazione 1D lungo l'asta di valle (limitatamente al tratto a valle dell'A1, dove si erano individuate criticità) per i diversi idrogrammi ottenuti dalle copule rispetto all'idrogramma sintetico con TR = 50 anni. La progressiva va da valle verso monte.

La Figura 5-17 riguarda invece il tempo di ritorno di 100 anni: qui gli incrementi di livello superano 1 m per gli idrogrammi alla Nash, ma sono comunque piuttosto elevati anche per gli idrogrammi relativi al metodo del serbatoio lineare (fino a 40-60 cm).

Infine, nella Figura 5-18 viene considerato il caso della piena duecentennale: le differenze raggiungono addirittura i 2 m nel peggiore dei casi. Chiaramente, tali

incrementi sono puramente fittizi, in quanto i livelli ottenuti darebbero luogo a tracimazioni lungo buona parte dell'asta fluviale.

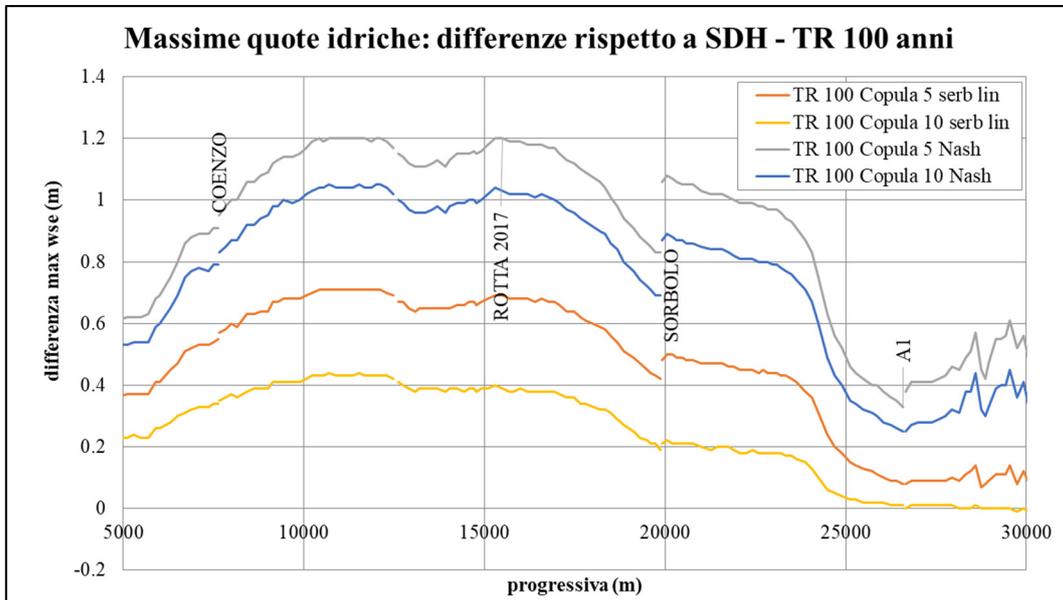


Figura 5-17. Differenza tra i profili di piena in termini di massime quote idriche ottenute dalla modellazione 1D lungo l'asta di valle (limitatamente al tratto a valle dell'A1, dove si erano individuate criticità) per i diversi idrogrammi ottenuti dalle copule rispetto all'idrogramma sintetico con TR = 100 anni. La progressiva va da valle verso monte.

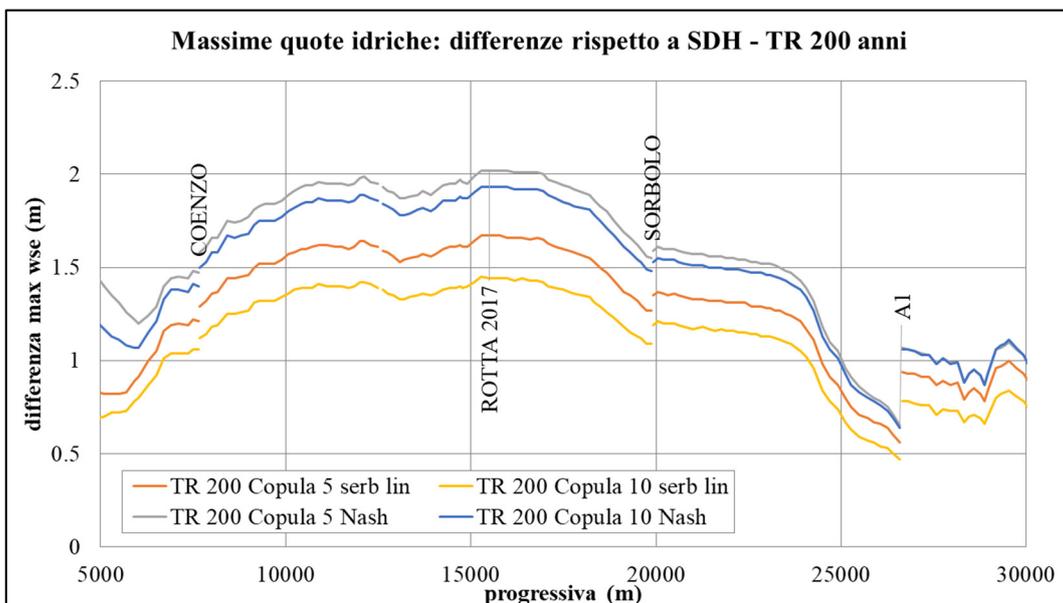


Figura 5-18. Differenza tra i profili di piena in termini di massime quote idriche ottenute dalla modellazione 1D lungo l'asta di valle (limitatamente al tratto a valle dell'A1, dove si erano individuate criticità) per i diversi idrogrammi ottenuti dalle copule rispetto all'idrogramma sintetico con TR = 200 anni. La progressiva va da valle verso monte.

5.6 Considerazioni conclusive e stima del tempo di ritorno dell'evento del dicembre 2017

In conclusione, si sottolinea che la scelta della forma dell'idrogramma con assegnato tempo di ritorno ha una grande influenza sui risultati dell'analisi del funzionamento delle casse e della propagazione dell'onda nell'alveo di valle. Le differenze risultano particolarmente accentuate per tempi di ritorno elevati (100 e 200 anni).

Sulla base dei valori della portata al colmo in sezioni significative (uscita casse e Sorbolo) per ciascun tempo di ritorno e della ricostruzione dell'evento del dicembre 2017, è possibile effettuare una stima di massima del tempo di ritorno di tale evento. Si ricorda che l'idrogramma stimato a valle del sistema di casse per l'evento del 2017 aveva un picco di portata di circa $635 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre a Sorbolo il colmo raggiungeva circa $430 \text{ m}^3/\text{s}$ (paragrafo 1.6).

La Figura 5-19 mostra l'intervallo di tempi di ritorno in cui si colloca la portata al colmo stimata in uscita dalle casse per l'evento del dicembre 2017, rispetto ai valori ottenuti dalle simulazioni dei diversi idrogrammi di portata con prefissato tempo di ritorno. Se si assumesse l'idrogramma sintetico, il tempo di ritorno sarebbe superiore a 200 anni, mentre utilizzando i diversi idrogrammi derivanti dalle copule (con forme tipo invaso o Nash) si stima un tempo di ritorno compreso tra 88 e 128 anni. A Sorbolo, invece, il colmo di portata stimato risulta compreso tra i 38 e i 59 anni di tempo di ritorno utilizzando le copule e 63 anni utilizzando l'idrogramma sintetico (Figura 5-20).

L'ampiezza del range, specialmente a valle delle casse, è dovuto alla grande diversità tra i risultati che si ottengono utilizzando idrogrammi caratterizzati da diversa forma d'onda (e diverso volume sopra soglia), a parità di tempo di ritorno. Si è infatti osservato come in alcuni casi gli idrogrammi derivati dalle copule diano risultati paragonabili all'idrogramma sintetico di tempo di ritorno superiore.

La minor escursione di tempi di ritorno a Sorbolo è invece dovuta alla laminazione naturale dell'onda di piena tra l'uscita dalle casse e Sorbolo (Figura 1-37): l'onda ricostruita a valle delle casse per l'evento del dicembre 2017

presentava infatti un picco elevato, dovuto all'entrata in funzione dello sfioratore di superficie del manufatto, ma caratterizzato da una breve durata e da un volume modesto, in grado di laminarsi significativamente lungo l'asta di valle. La scelta della forma dell'idrogramma con tempo di ritorno assegnato ha dunque un'influenza significativa non solo sulle valutazioni relative all'efficienza delle casse e alla sicurezza idraulica dell'asta fluviale, ma anche sulla stima del tempo di ritorno di eventi reali.

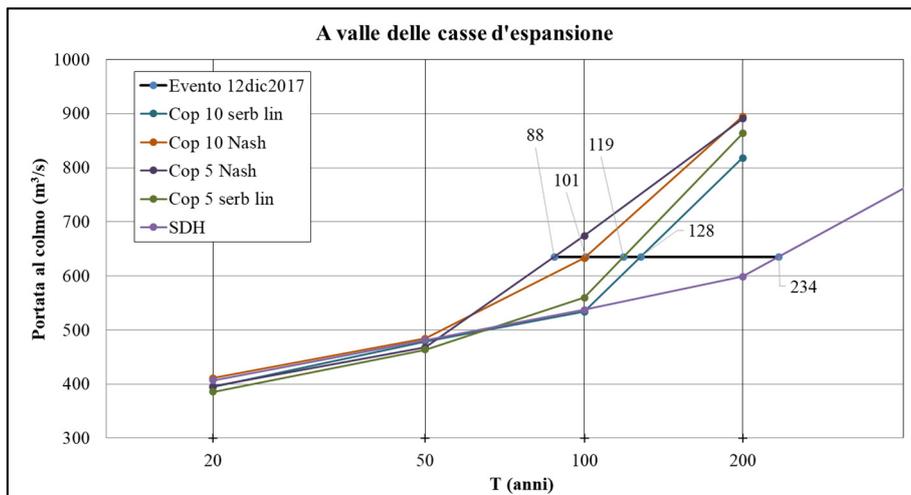


Figura 5-19. Andamento delle portate al colmo in uscita dalle casse in funzione del tempo di ritorno per i diversi idrogrammi simulati, e stima del tempo di ritorno dell'evento del dicembre 2017. L'asse orizzontale è riscalato secondo la variabile ridotta di Gumbel.

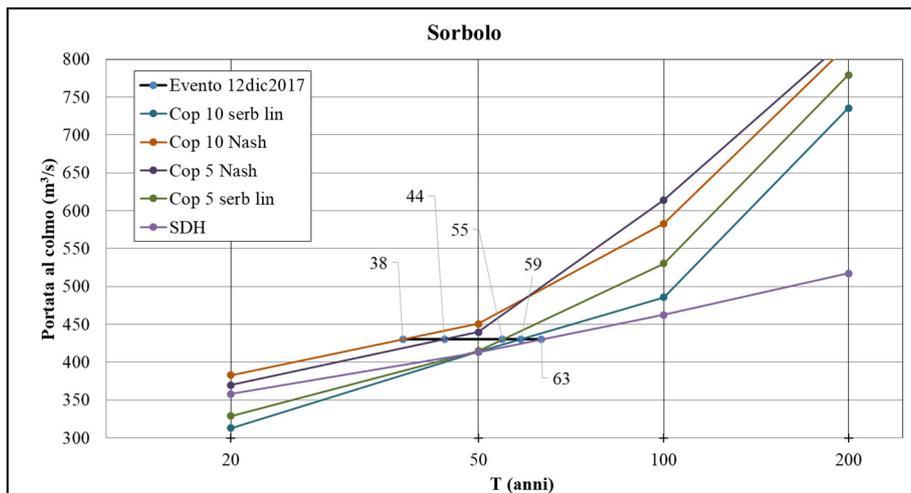


Figura 5-20. Andamento delle portate al colmo a Sorbolo in funzione del tempo di ritorno per i diversi idrogrammi simulati, e stima del tempo di ritorno dell'evento del dicembre 2017. L'asse orizzontale è riscalato secondo la variabile ridotta di Gumbel.

6 Scenari di progetto

6.1 Premessa

Nel presente capitolo viene analizzata in via preliminare l'efficacia di alcuni possibili interventi volti al miglioramento dell'efficienza idraulica dell'asta fluviale a valle delle casse d'espansione, con riferimento alla propagazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 200 anni. Tutte le simulazioni sono effettuate con il modello 1D con origine a valle della confluenza Termina-Masdone (esondazioni impedito).

Come concordato con AdBPo, gli scenari di progetto riguardano le seguenti configurazioni (da confrontare con l'assetto attuale):

- Riduzione delle scabrezze dell'alveo conseguenti ad interventi di gestione della vegetazione ottimali per massimizzare il deflusso delle piene nei tratti arginati;
- Abbassamento dei piani golenali a quote prossime a quelle dei piani campagna esterni alle arginature;
- Arretramento delle arginature in corrispondenza di alcuni meandri presenti a valle di Sorbolo, e contestuale abbassamento dei piani golenali (come per lo scenario precedente).

Si noti che le ipotesi non tengono conto dell'effettiva fattibilità tecnica ed economica degli interventi, ma sono solo finalizzate ad una valutazione di massima del possibile incremento della sicurezza idraulica che tali interventi possono determinare.

6.2 Riduzione della scabrezza

Le analisi sono limitate al tratto di asta fluviale a valle dell'attraversamento della ferrovia MI-BO, dal momento che a monte non sono state evidenziate particolari criticità. Allo stato attuale, nel tratto a valle del ponte ferroviario è stato tarato il valore di scabrezza secondo Strickler pari a $22.5 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ per il fondo alveo, mentre tale coefficiente è assunto pari a $9.5 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ per le sponde vegetate

dell'alveo stesso; sulle aree golenali la scabrezza è invece posta a $15 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ o $11.5 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, a seconda della presenza o meno di vegetazione.

Nell'ipotesi di intervento, si è scelto di modificare la scabrezza portando il coefficiente di Strickler del fondo dell'alveo a $25 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ e quello delle sponde vegetate e delle aree golenali a $15 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ (valore di letteratura ricadente nel range consigliato per terreni caratterizzati da cespugli o alberi radi).

La differenza tra le massime quote idriche lungo l'asta a seguito della riduzione di scabrezza rispetto allo stato attuale è mostrato nella Figura 6-1. L'ipotetico intervento garantirebbe un notevole abbassamento dei livelli in alveo, compreso tra 30 e 90 cm (mediamente attorno a 60 cm) lungo l'intero tratto a valle dell'autostrada A1.

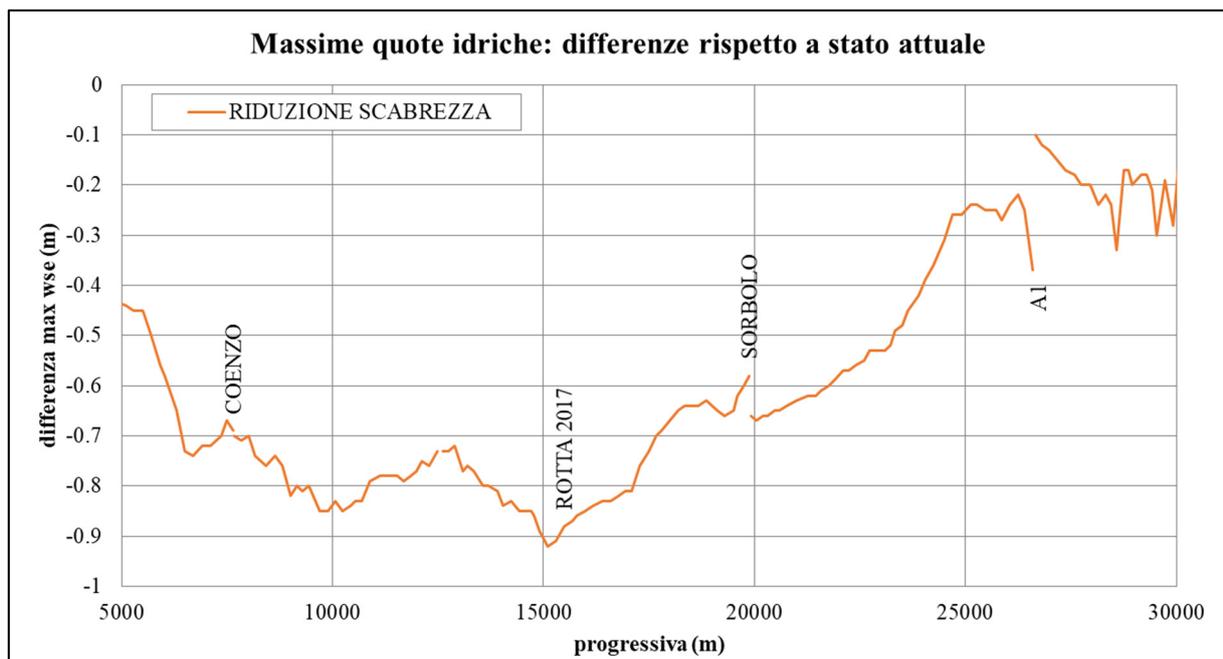


Figura 6-1. Differenza tra il profilo di piena in termini di massime quote idriche ottenute dalla modellazione 1D lungo l'asta di valle (limitatamente al tratto a valle dell'A1) per lo scenario con riduzione della scabrezza rispetto allo stato attuale (idrogramma sintetico con TR = 200 anni). La progressiva va da valle verso monte.

6.3 Abbassamento dei piani golenali

Il secondo intervento considerato riguarda invece una modifica topografica, ossia l'abbassamento della quota dei piani golenali a valori prossimi alla quota del piano campagna circostante. Infatti, l'asta dell'Enza (come quella di altri fiumi

nel territorio emiliano) è caratterizzata da elevata "pensilità", con dislivelli anche di 2 m tra il terreno sul lato fiume e sul lato campagna dell'argine.

Sempre limitatamente al tratto a valle dell'attraversamento dell'autostrada A1 (dove la pensilità è più marcata e le golene più ampie), si è dunque proceduto a modificare la quota delle golene per ciascuna sezione del modello 1D, portandola alla quota locale del piano campagna esterno all'argine. A titolo di esempio, nella Figura 6-2 si mostra il confronto tra pre- e post-intervento per alcune sezioni significative. È stata mantenuta la quota originale in una fascia di 10 m dal piede interno dell'argine. Il volume complessivo da asportare può essere stimato grossolanamente attorno a $1.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

La Figura 6-3 mostra la differenza tra le massime quote idriche lungo l'asta a seguito dell'abbassamento dei piani golenali, rispetto allo stato attuale. Con questo tipo di intervento, la riduzione dei massimi livelli raggiunti in alveo sarebbe limitata a 30 cm circa e riguarderebbe principalmente il tratto tra l'A1 e Lentigione, dove sono presenti le golene più ampie.

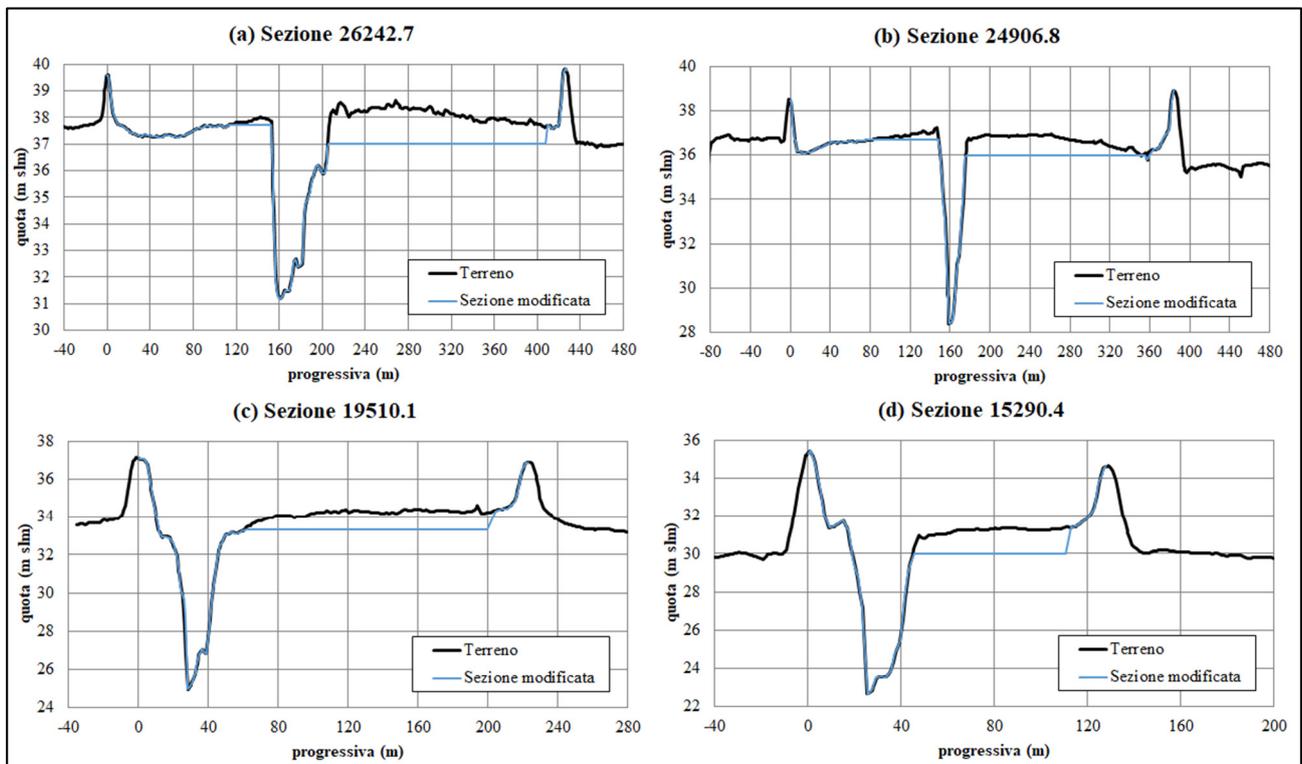


Figura 6-2. Esempi delle modifiche apportate alle quote dei piani golenali in alcune sezioni.

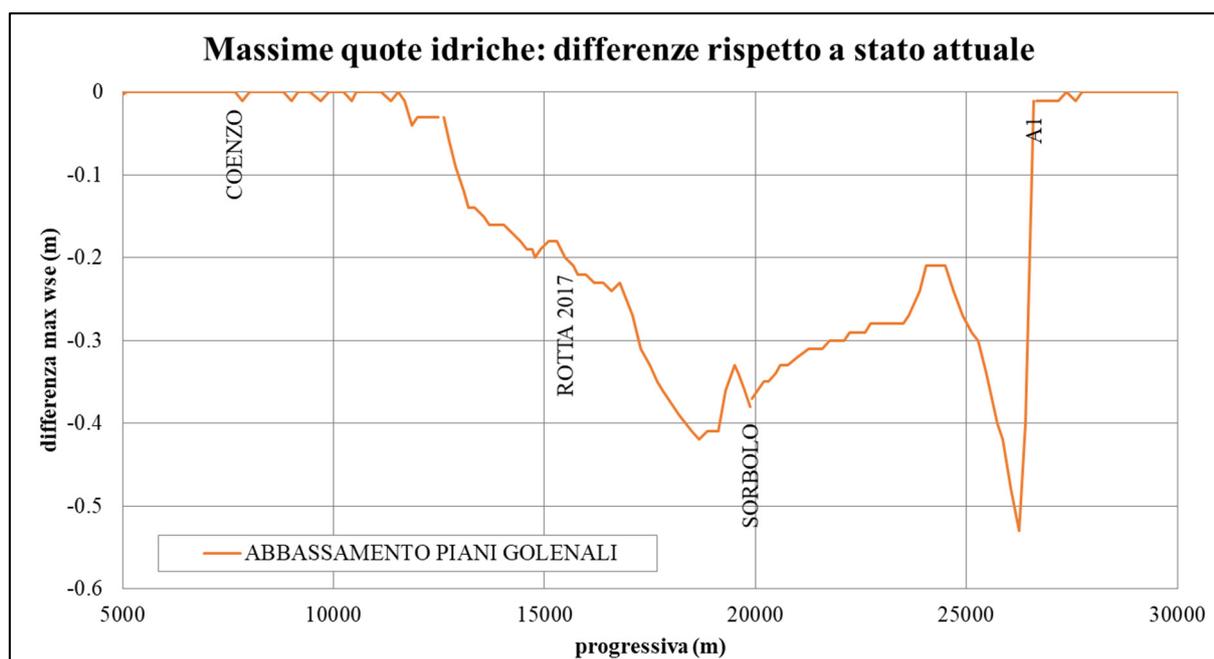


Figura 6-3. Differenza tra il profilo di piena in termini di massime quote idriche ottenute dalla modellazione 1D lungo l’asta di valle (limitatamente al tratto a valle dell’A1) per lo scenario con abbassamento dei piani golenali rispetto allo stato attuale (idrogramma sintetico con TR = 200 anni). La progressiva va da valle verso monte.

6.4 Arretramento delle arginature in corrispondenza di alcuni meandri

La terza ipotesi di intervento abbinata all’abbassamento dei piani golenali, appena analizzata, l’arretramento del tracciato delle arginature in corrispondenza di alcuni meandri a valle di Sorbolo, dove gli argini sono attualmente in frodo e all’esterno non sono presenti abitazioni. Il possibile nuovo tracciato delle arginature è mostrato nella Figura 6-4. Nella Figura 6-5 è invece riportato l’esempio di alcune sezioni in cui l’argine è stato “arretrato” determinando un’allargamento della sezione stessa. Non è stata modificata la quota di contenimento.

La Figura 6-6 mostra la differenza tra le massime quote idriche lungo l’asta a seguito dell’allargamento delle arginature in corrispondenza dei meandri (oltre che dell’abbassamento dei piani golenali) rispetto allo stato attuale. Si osserva una notevole riduzione dei livelli massimi, fino a 1 m, nella zona di Lentigione, grazie all’incremento dell’area disponibile per il deflusso.

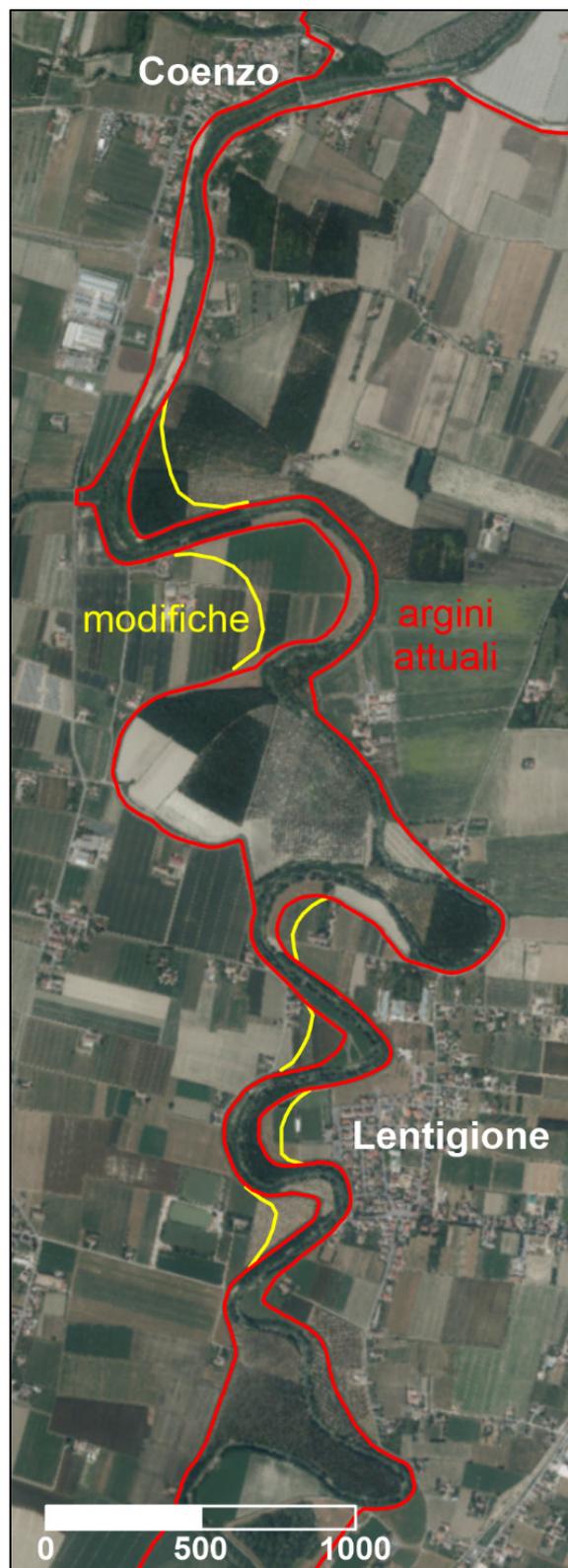


Figura 6-4. Posizione dei meandri oggetto dell'intervento ipotizzato.

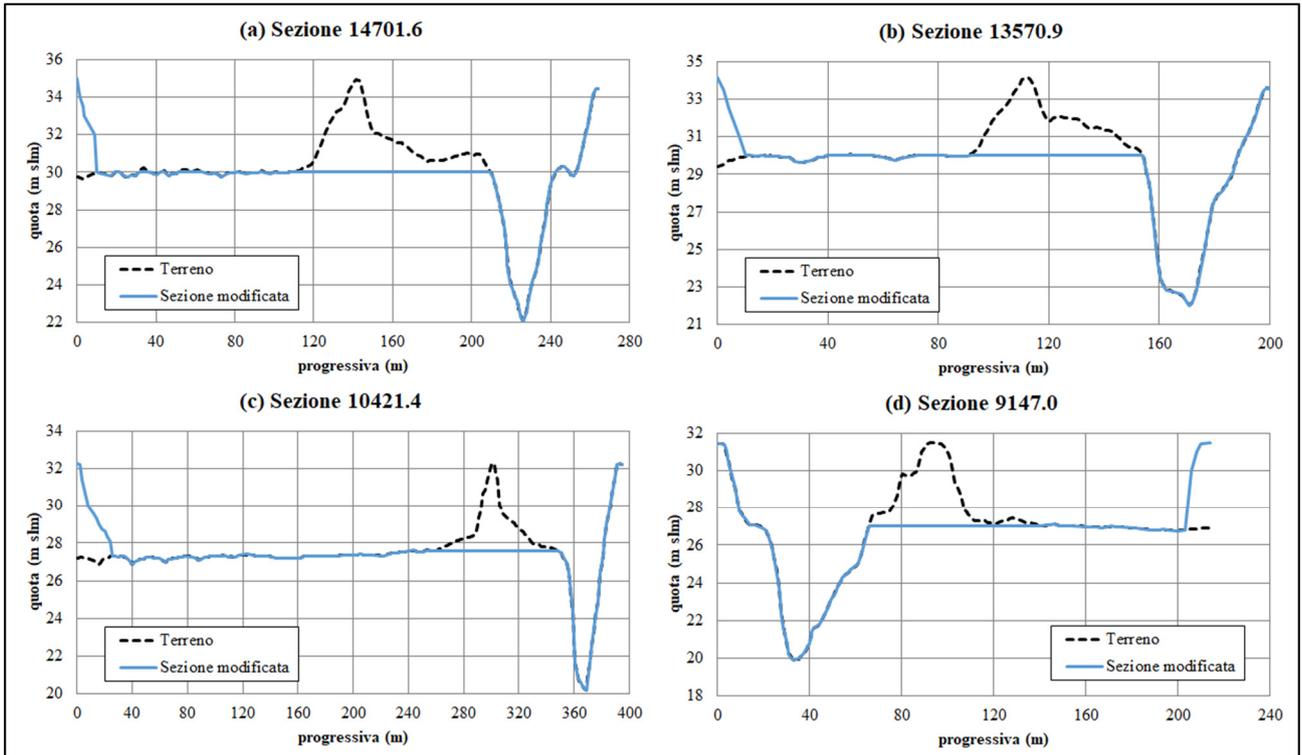


Figura 6-5. Esempi dell'allargamento di alcune sezioni in corrispondenza dei meandri.

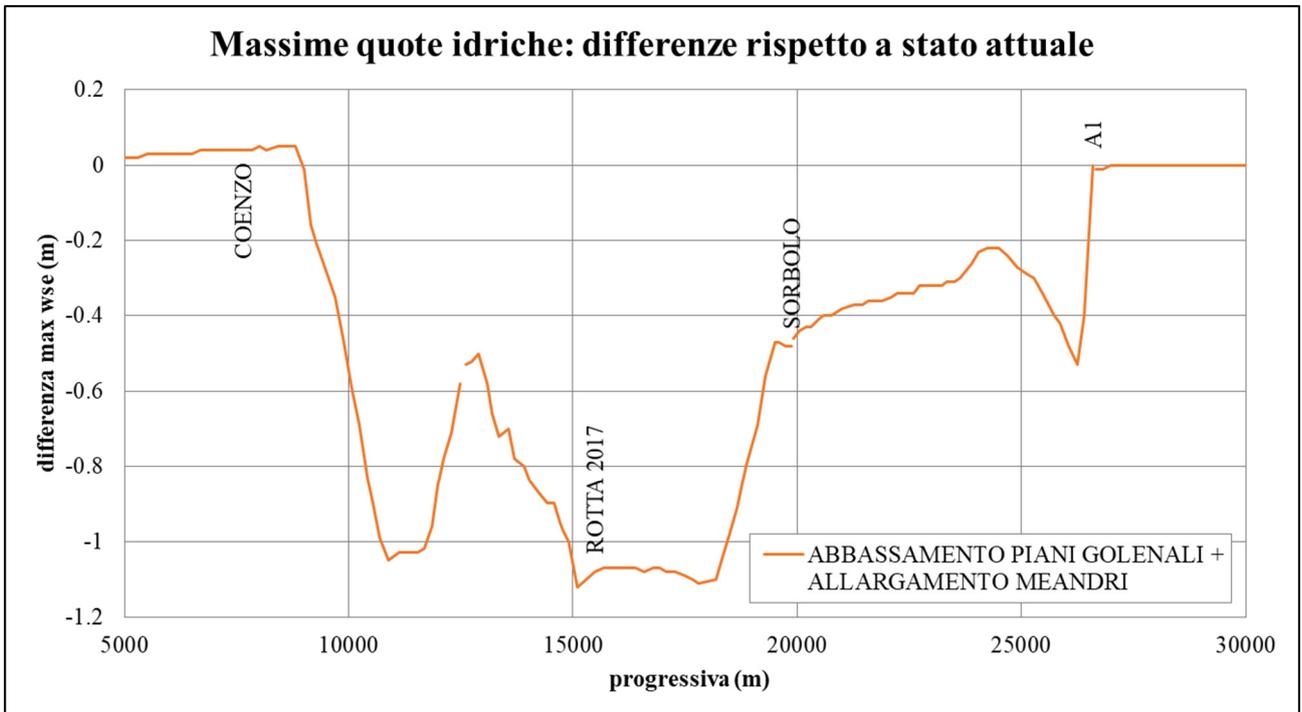


Figura 6-6. Differenza tra il profilo di piena in termini di massime quote idriche ottenute dalla modellazione 1D lungo l'asta di valle (limitatamente al tratto a valle dell'A1) per lo scenario con abbassamento dei piani golionali e allargamento delle arginature in corrispondenza dei meandri rispetto allo stato attuale (idrogramma sintetico con TR = 200 anni). La progressiva va da valle verso monte.

6.5 Commenti ai risultati e indicazioni su approfondimenti futuri

Sulla base dei risultati delle simulazioni della propagazione dell'idrogramma duecentennale lungo l'asta fluviale, è possibile trarre alcune indicazioni sull'efficacia degli interventi ipotizzati.

L'abbassamento dei piani golenali sembra portare ad un beneficio non particolarmente significativo, peraltro limitato al tratto a cavallo di Sorbolo. In particolare, all'idrometro di Sorbolo (Figura 6-7) si registrerebbe un livello al colmo di 12.44 m (contro i 12.82 m nell'assetto attuale). Nel tratto prospiciente l'abitato di Lentigione, uno dei punti più critici dell'asta fluviale, i livelli massimi calano invece meno di 20 cm, valore paragonabile alle incertezze del modello. Tra l'altro, se si considerano l'ampiezza dell'intervento e il volume di materiale da movimentare ($> 10^6 \text{ m}^3$) per l'eventuale realizzazione, una soluzione di questo tipo non sembra giustificata dallo scarso impatto sull'aumento dell'officiosità idraulica dell'asta.

Gli altri due interventi prospettati avrebbero invece un impatto maggiore sulla riduzione dei livelli, non soltanto a Sorbolo ma anche soprattutto nel tratto critico di Lentigione. A Sorbolo, infatti, il livello al colmo (Figura 6-7) risulterebbe pari a 12.24 m nell'ipotesi di riduzione della scabrezza, e a 12.34 m nell'ipotesi di allargamento delle arginature in corrispondenza dei meandri (con un calo comunque attorno ai 50 cm rispetto allo stato attuale). A Lentigione gli abbassamenti del livello massimo raggiungono anche gli 80-100 cm.

Per quanto riguarda la riduzione della scabrezza, va notato che tale intervento prevede una pulizia costante dell'alveo (comunque auspicabile) ed una continua verifica, attraverso misure in condizioni di piena, dell'effettivo raggiungimento e mantenimento dei valori di scabrezza prefissati, difficili da controllare nella pratica.

L'ipotesi dell'arretramento delle arginature in corrispondenza dei meandri, anche non combinata con l'abbassamento dei piani golenali (che come visto non dà un contributo significativo), merita ulteriori approfondimenti. Sicuramente, una modellazione bidimensionale fornirebbe risultati più attendibili sull'efficacia dell'intervento, perché si potrebbe simulare nel dettaglio l'effettivo campo di

moto in condizioni di piena. Sarebbe inoltre da valutare con attenzione se mantenere o meno le vecchie arginature (ribassate) come argini golenali. Infine, è da notare che purtroppo nessuno degli interventi considerati garantisce un significativo abbassamento dei livelli massimi in corrispondenza del tratto di Casaltone, altro punto critico individuato nelle analisi precedenti. In questo caso, l'ipotesi progettuale più efficace sarebbe sicuramente l'individuazione, a monte, di nuovi volumi di invaso per la laminazione delle piene. Si ricorda infatti che l'analisi dei volumi sopra soglia per i diversi idrogrammi considerati ha comunque evidenziato l'insufficienza del volume di invaso delle casse esistenti per garantire una laminazione ottimale per i tempi di ritorno più elevati. La realizzazione di nuove casse porterebbe chiaramente benefici lungo l'intera asta di valle, anche in assenza di altri interventi sulla scabrezza o sulla geometria dell'alveo.

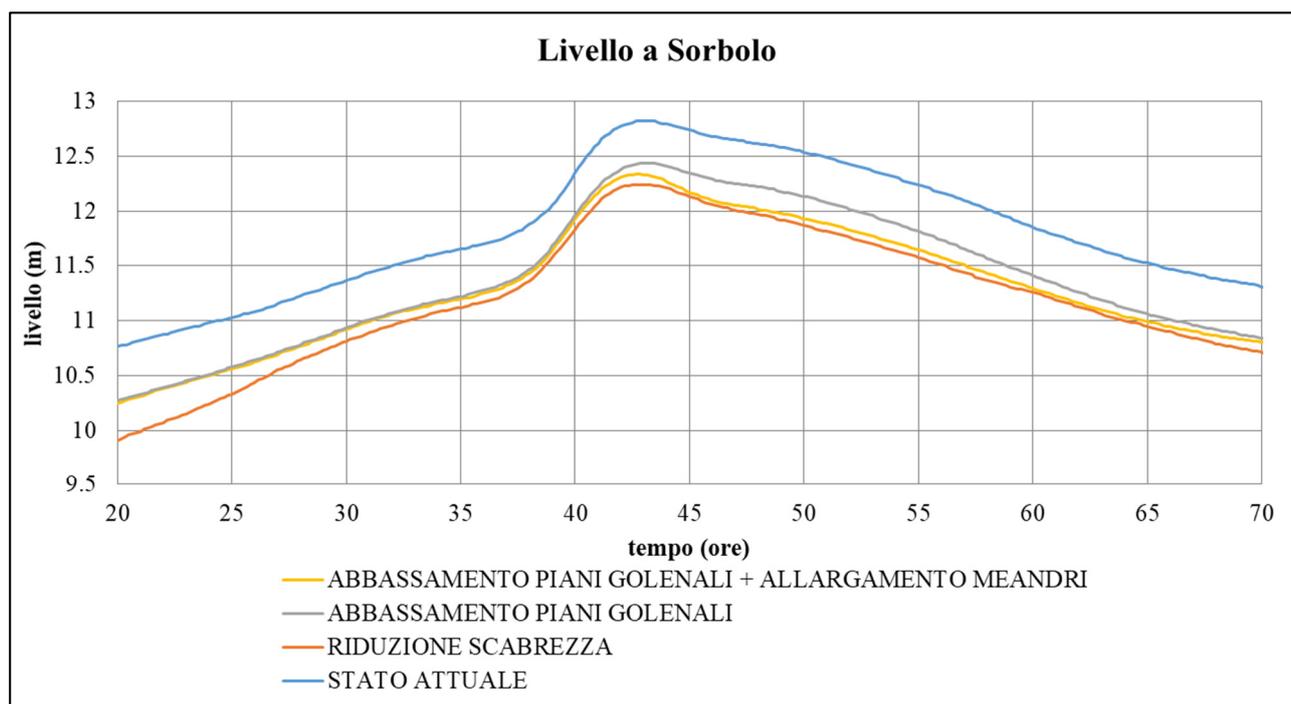


Figura 6-7. Andamento del livello a Sorbolo (idrogramma sintetico con TR = 200 anni) allo stato attuale e per i diversi scenari di progetto considerati.

7 Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati costruiti e tarati due modelli dell'asta del fiume Enza. Il primo, monodimensionale, si estende dalla traversa di Guardasone fino alla confluenza in Po e comprende anche il sistema delle casse d'espansione di Montecchio. Il secondo, bidimensionale, è limitato al tratto a valle delle casse d'espansione fino alla confluenza in Po. La validazione dei modelli ha preso in considerazione gli eventi di piena del dicembre 2017 e del marzo 2018.

In particolare, uno degli obiettivi della presente attività era la ricostruzione dell'evento di piena del 12 dicembre 2017. Sulla base delle simulazioni effettuate si ritiene di poter concludere quanto segue.

- Si stima che la portata al colmo transitante a valle del sistema di casse fosse prossima a $635 \text{ m}^3/\text{s}$, e che a Sorbolo si sia ridotta a circa $430 \text{ m}^3/\text{s}$ (si veda il paragrafo 1.6). Rimangono tuttavia alcune incertezze sul funzionamento delle casse, legate alle misure degli idrometri e agli effetti locali che possono determinare dislivelli tra manufatto principale e sfioratore di imbocco del manufatto fuori linea, che si ripercuotono sulla stima dei coefficienti dei manufatti e di conseguenza sulla ricostruzione dell'evento.
- A seguito delle analisi sulla propagazione di idrogrammi con assegnato tempo di ritorno, ai valori di portata al colmo stimati corrisponderebbe un tempo di ritorno compreso tra 88 e 234 anni per la sezione a valle delle casse, e tra 38 e 63 anni per la sezione di Sorbolo (paragrafo 5.6).
- La scala delle portate numerica ricostruita a Sorbolo con entrambi i modelli è in linea con quella pubblicata sull'Annale Idrologico 2017 (parte II).

Il modello 2D è stato utilizzato per la valutazione della portata compatibile lungo l'asta a valle del sistema di casse, attraverso numerose simulazioni in moto permanente ad esondazioni impedito. I risultati (capitolo 3) mostrano che:

- La portata compatibile con franco di 1 m è inferiore a 300 m³/s, mentre quella a franco zero è di poco superiore a 400 m³/s.
- La portata di 350 m³/s transita con un franco di circa 50 cm.
- I tratti più critici sono in corrispondenza di Casaltone (in sinistra idraulica) e di Lentigione (in destra).
- Ipotizzando un errore sulla scabrezza del 15%, il franco può ridursi di 20-30 cm a parità di portata, e la portata compatibile con prefissato franco può ridursi del 10%.

La simulazione relativa ad onde di piena con preassegnato tempo di ritorno (20, 50, 100, 200, 500 anni) ha permesso di analizzare il funzionamento delle casse e la successiva propagazione lungo l'asta di valle. Lo studio idrologico effettuato da ARPAE ha fornito diversi tipi di idrogrammi a parità di tempo di ritorno, in particolare: idrogrammi sintetici secondo il metodo proposto da Tomirotti e Mignosa [12] e idrogrammi derivati dalle copule (coppie volume-portata al colmo) caratterizzati da diverse forme d'onda.

Sono stati dapprima analizzati nel dettaglio i risultati della simulazione della propagazione degli idrogrammi sintetici con modello 1D (capitolo 4), di cui si sintetizzano le principali evidenze emerse.

Per prima cosa, non si sono riscontrate particolari criticità nel tratto compreso tra Guardasone e l'ingresso al sistema di casse.

Per quanto riguarda il funzionamento del sistema di casse, si può osservare che:

- Le casse risultano riempirsi completamente per eventi di piena con TR = 100 anni o superiore. In questi casi entra in funzione lo sfioratore di sicurezza, che contribuisce alla portata transitante in alveo a valle di ciascun manufatto, generando un secondo colmo.
- L'efficienza del sistema di casse risulta circa costante e superiore al 30% per eventi di tempo di ritorno compreso tra 20 e 200 anni, per poi calare per eventi più gravosi (500 anni).
- Se si assumono valori attorno a 300-350 m³/s per la portata compatibile lungo l'asta di valle, il volume delle casse risulta insufficiente ad immagazzinare il volume sopra tale soglia di portata e a garantire quindi

una laminazione ottimale per gli eventi con tempo di ritorno più elevato (>50 anni).

La successiva simulazione della propagazione dell'onda di piena a valle del sistema di casse con il modello 2D (a esondazioni consentite, ma senza apertura di brecce arginali) ha invece mostrato che:

- Non si evidenziano particolari criticità nel tratto che va dalle casse fino a monte dell'attraversamento dell'autostrada A1.
- Le prime tracimazioni si verificano per l'onda con TR = 100 anni, che transita circa a franco zero in molti tratti.
- Per TR = 200 anni, le principali criticità si osservano a cavallo dell'A1, a Casaltone (in sinistra), in alcuni punti tra Sorbolo e Lentigione, e a Lentigione (in destra).
- Per TR = 500 anni, i sormonti sono diffusi lungo tutta l'asta.

Sono poi stati simulati, con modello 1D, diversi scenari riguardanti gli idrogrammi derivati dalle copule (capitolo 5), utilizzando le forme d'onda ottenute coi metodi dell'invaso lineare e di Nash e per i tempi di ritorno di 50, 100 e 200 anni. Le principali considerazioni che sono emerse dall'analisi dei risultati di questo set di simulazioni sono sintetizzate come segue:

- I volumi sopra prefissate soglie di portata per questi idrogrammi sono più elevati rispetto a quelli corrispondenti per gli idrogrammi sintetici (anche il doppio), e a maggior ragione il volume delle casse esistenti risulta insufficiente per la loro laminazione.
- Per questo tipo di idrogrammi, le casse risultano completamente riempite già per l'evento con TR = 50 anni e nel tratto di valle transitano portate al colmo prossime a quella compatibile a franco zero.
- L'efficienza del sistema di casse cala drasticamente già per tempi di ritorno superiori a 50 anni.
- Specialmente per i tempi di ritorno più elevati (100 e 200 anni), si ha una grande variabilità dei risultati in base alla forma d'onda scelta. Il caso peggiore è sempre quello dell'idrogramma alla Nash.

- I valori dei colmi di portata ottenuti per questo tipo di idrogrammi corrispondono in alcuni casi a quelli che si ottengono per l'idrogramma sintetico con tempo di ritorno superiore.
- Anche lungo l'asta di valle si ottengono inviluppi dei massimi livelli particolarmente variabili, a parità di tempo di ritorno, in base alla forma d'onda scelta.

Si sottolinea quindi nuovamente che la scelta della forma dell'idrogramma "di progetto" con assegnato tempo di ritorno ha una grande influenza sui risultati dell'analisi del funzionamento delle casse (in particolare a causa della differenza nel volume sopra soglia) e della propagazione dell'onda nell'alveo di valle.

Con riferimento all'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 200 anni, è stato inoltre analizzato l'impatto del cambiamento climatico sulla sicurezza idraulica dell'asta fluviale dell'Enza (paragrafo 4.4). I risultati mostrano un incremento della portata al colmo in uscita dalle casse (da 600 a 750 m³/s) e a Sorbolo (da 520 a 580 m³/s), nonché dei livelli massimi lungo l'asta (circa +30 cm), rispetto allo scenario attuale.

Sempre con riferimento all'idrogramma sintetico duecentennale, sono stati analizzati in via preliminare, tramite modellazione 1D, tre scenari "di progetto" che prevedono interventi volti a incrementare la capacità di portata dell'asta di valle. In particolare, si tratta di interventi di riduzione della scabrezza, abbassamento dei piani golenali e arretramento delle arginature in froldo in corrispondenza di alcuni meandri a valle di Sorbolo. Sulla base dei risultati di queste simulazioni, si può osservare che:

- L'abbassamento dei piani golenali determina modesti miglioramenti alla sicurezza idraulica.
- La riduzione della scabrezza, attraverso pulizia periodica dell'alveo, provoca una diminuzione abbastanza significativa dei livelli lungo l'asta nel tratto di valle, ed è quindi un intervento auspicabile, anche se, come è noto, non è facile operativamente intervenire sulla vegetazione per garantire un prefissato coefficiente di scabrezza.

- Anche l'arretramento delle arginature in corrispondenza dei meandri a valle di Sorbolo sembra avere un effetto positivo sui massimi livelli a Lentigione, ed è un intervento che merita ulteriori approfondimenti tramite una modellazione 2D di maggior dettaglio.
- Nessuno degli interventi analizzati ha comunque un impatto significativo sul tratto a cavallo dell'A1 e di Casaltone, che rappresenta un'altra zona critica dell'asta fluviale. Si ritiene quindi necessaria l'individuazione di nuovi volumi di laminazione, realizzando nuove casse o semplicemente prevedendo aree allagabili non attrezzate e servitù di allagamento. I volumi dovrebbero essere reperiti a monte dell'attraversamento dell'autostrada A1 e, preferibilmente, a valle delle casse esistenti, per evitare una riduzione di efficienza delle stesse. Il volume necessario ad una laminazione efficace dipenderà necessariamente, come già sottolineato, dalla scelta dell'idrogramma "di progetto".

In conclusione, le indicazioni per ulteriori analisi volte al miglioramento della sicurezza idraulica del fiume Enza comprendono:

- Installazione di idrometri all'interno delle casse fuori linea, per la registrazione del riempimento degli invasi stessi durante gli eventi di piena.
- Analisi territoriale per individuare nuove aree da poter destinare alla laminazione.
- Ulteriori analisi sull'intervento di arretramento del tracciato arginale in corrispondenza dei meandri a valle di Sorbolo tramite modellazione 2D, con o senza il mantenimento degli argini esistenti (ribassati) come argini golenali.

8 Ringraziamenti

Si ringraziano l’Autorità di bacino distrettuale del fiume Po, L’Agenzia Interregionale del fiume Po, ARPAE, la Regione Emilia Romagna e tutti i componenti della cabina di regia Enza per la fornitura dei dati, le proficue discussioni ed i suggerimenti scaturiti in occasione delle varie riunioni svolte durante il periodo di sviluppo della presente attività.

9 Bibliografia

- [1] ARPAE [rapporto meteo 2017/12/08-12](#).
- [2] AIPo-HydroNova (Ing. Paolo Polo). Nota evento dicembre 2017 Enza, 11 giugno 2018.
- [3] HEC-RAS versione 5.0:
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf>
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%202D%20Modeling%20Users%20Manual.pdf>
- [4] D'Oria, M., Tanda, M.G., Reverse flow routing in open channels: A Bayesian Geostatistical Approach, *Journal of Hydrology*, Volume 460-461, 16 August 2012, Pages 130-135
- [5] D'Oria M., Mignosa P., Tanda M.G., Bayesian estimation of inflow hydrographs in ungauged sites of multiple reach systems using downstream level data, *Advances in Water Resources* 63 (2014) 143–151.
- [6] Susin G.M. - Magistrato per il Po, Modello fisico del Sistema limitatore-partitore della cassa di monte (IV e V) e verifica di speciali dispositivi di regolazione del tegolo limitatore del Sistema limitatore di valle, Allegati 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3, 1991.
- [7] *Annali Idrologici 2017 – Parte seconda*. ARPAE, Servizio Idro-Meteo-Clima, Area Idrografia e Idrologia.
- [8] Dazzi, S., Vacondio, R., and Mignosa, P. (2019). Integration of a Levee Breach Erosion Model in a GPU-accelerated 2D Shallow Water Equations Code. *Water Resources Research*, 55, 682–702.
- [9] Vacondio R., Dal Palù A., Mignosa P. (2014). GPU-enhanced Finite Volume Shallow Water solver for fast flood simulations, *Environmental Modelling & Software*, ENVSOFT-D-13-00494.
- [10] Vacondio, R., Aureli, F., Ferrari, A., Mignosa, P., Dal Palù, A. (2016). Simulation of the January 2014 flood on the Secchia River using a fast and high-resolution 2D parallel shallow-water numerical scheme. *Natural Hazards*, 80(1), 103-125.
- [11] Vacondio, R., Dal Palù, A., Ferrari, A., Mignosa, P., Aureli, F., Dazzi, S. (2017). A non-uniform efficient grid type for GPU-parallel Shallow Water Equations models. *Environmental Modelling & Software*, 88, 119-137.
- [12] Tomirotti, M., & Mignosa, P. (2017). A methodology to derive Synthetic Design Hydrographs for river flood management. *Journal of Hydrology*, 555, 736-743.
- [13] ARPAE. Attività di studio finalizzate all'analisi dell'evento di piena dell'11-12 dicembre 2017 ed all'aggiornamento del quadro conoscitivo relativo alle condizioni di pericolosità e di rischio idraulico lungo il torrente Enza.
- [14] Salvadori, G., De Michele, C., Kottegodu, N. T., & Rosso, R. (2007). *Extremes in nature: an approach using copulas* (Vol. 56). Springer Science & Business Media.

APPENDICE A. MODELLO NUMERICO

Il modello numerico realizzato presso il DICATeA dell'Università degli Studi di Parma (ora DIA) è basato su una discretizzazione ai volumi finiti delle equazioni bidimensionali complete del moto a superficie libera nell'approssimazione alle acque basse (SWE, forma bidimensionale delle equazioni di conservazione della massa e del flusso di quantità di moto). L'integrazione delle equazioni nel tempo mediante uno schema di tipo esplicito, unitamente all'utilizzo di un metodo ai volumi finiti, garantisce la conservazione della massa e dei flussi della quantità di moto, ed assicura una robusta descrizione dei fronti di bagnamento ed asciugamento, indispensabile per simulare correttamente fenomeni di moto rapidamente vario, quali quelli che si innescano a seguito di un cedimento arginale. Uno speciale trattamento numerico dei flussi nelle celle con altezze d'acqua molto ridotte garantisce altresì che il volume risulti conservato anche in presenza di fronti mobili molto ampi, come quelli che si possono presentare nei fenomeni di allagamento su batimetrie inizialmente asciutte. L'utilizzo di un elevato ordine di accuratezza (sia nel tempo che nello spazio) consente di ricostruire in maniera accurata onde di shock e di rarefazione senza dover introdurre termini di tipo diffusivo, privi di fondamento fisico. Un'opportuna descrizione del termine di pendenza consente nel contempo la conservazione della condizione statica di acqua in quiete su topografia accidentata (C-property). Una speciale metodologia di ricostruzione delle profondità idriche consente poi di evitare problemi numerici di stabilità del codice, anche in presenza di elevate pendenze della superficie libera.

Le prestazioni di schemi numerici di questo tipo, ed in particolare dello schema adottato nello studio, sono ben documentate nella letteratura tecnica sia per i casi teorici in cui sia disponibile una soluzione analitica o un'accurata soluzione numerica di riferimento, sia in applicazioni di ipotetici scenari di crolli arginali su batimetrie reali.

Per consentire la modellazione di molteplici scenari di allagamento, su territori di estensione pari a quelli oggetto del presente studio, l'algoritmo di risoluzione è implementato in un codice sviluppato in ambiente CUDA (Compute Unified Device Architecture) applicazione che consente di eseguire calcolo parallelo sulle GPUs (Graphics Processing Units) di NVIDIA. L'utilizzo di un codice di calcolo di tipo parallelo, in luogo di un tradizionale codice seriale, permette una drastica riduzione dei tempi di calcolo (di circa due ordini di grandezza) consentendo di effettuare agevolmente simulazioni su domini di diversi milioni di celle ([9]÷[11]), altrimenti impossibili.

APPENDICE B. DESCRIZIONE DELL'ALGORITMO DI SCAVO DELL'ALVEO INCISO SULLA BASE DI SEZIONI NOTE

Si supponga di disporre del DTM di un corso d'acqua ricavato a partire da un rilievo LiDAR effettuato in condizioni di alveo non completamente asciutto: l'alveo inciso apparirà fittiziamente "interrito" poiché i raggi laser emessi dallo strumento non sono in grado di penetrare al di sotto della superficie idrica. In maniera analoga, qualora siano stati erroneamente assegnati al layer "terreno" dei punti che in realtà appartengono alla vegetazione si avranno, a seguito dell'interpolazione, anomali innalzamenti del fondo alveo, del tutto fittizi. Al fine di poter utilizzare lo stesso DTM come base batimetrica per simulazioni idrauliche è necessario ripristinare la quota corretta del fondo dell'alveo. Qualora sia disponibile un rilievo per sezioni dello stesso corso d'acqua, o possano estrarsi delle sezioni ritenute attendibili dal DTM stesso, è possibile correggere il DTM limitatamente all'alveo inciso attraverso una procedura di interpolazione. Si è sviluppato un algoritmo apposito, in ambiente MATLAB, da applicare in questi casi.

Per prima cosa, è necessario delimitare planimetricamente l'area da correggere, tracciando manualmente le sponde sinistra e destra dell'alveo inciso con l'aiuto di foto aeree eventualmente disponibili e della rappresentazione a curve di livello del DTM (nell'alveo inciso si osserva in genere una batimetria "piatta").

L'algoritmo suddivide la correzione per "tronchi" delimitati lateralmente dalle suddette sponde e, a monte e a valle, da due sezioni successive rilevate a terra. Un esempio schematico è riportato nella Figura B-1. Noti i punti di intersezione tra le sezioni e le sponde, è possibile calcolare preliminarmente la larghezza dell'alveo inciso in corrispondenza delle sezioni di monte e di valle (B_M e B_V), nonché la lunghezza del tronco lungo le sponde destra e sinistra ($L_{sx,MV}$ e $L_{dx,MV}$). La distanza L_{MV} tra le due sezioni di monte e di valle è calcolata come media di queste ultime: $L_{MV} = (L_{sx,MV} + L_{dx,MV})/2$.

Solo i nodi della griglia che ricadono all'interno del tronco così delimitato sono soggetti a correzione (area tratteggiata in Figura B-1).

Per modificare la quota di un generico punto P , è necessario per prima cosa collocarlo approssimativamente su una sezione "intermedia" di cui siano calcolabili caratteristiche

come la larghezza e la posizione relativa rispetto alle sezioni di monte e di valle, necessarie per la successiva interpolazione (Figura B-1).

Per fare questa operazione, che nel caso di un alveo con andamento irregolare non è affatto immediata, l'algoritmo procede come segue.

1. Viene mandata la retta passante per P perpendicolare alla sponda sinistra, con punto di intersezione S_{P1} ; prolungando tale retta è possibile inoltre individuare il punto di intersezione con la sponda destra, D_{P1} ; si ricavano inoltre le distanze trasversali d_{P1} (segmento $S_{P1}P$) e B_{P1} (segmento $S_{P1}D_{P1}$), nonché la distanza longitudinale (curvilinea) $L_{sx,MP}$ rispetto alla sezione di monte lungo la sponda sinistra (schema in Figura B-2a).
2. Viene poi mandata la retta passante per P perpendicolare alla sponda destra, con punto di intersezione D_{P2} ; prolungando tale retta è possibile inoltre individuare il punto di intersezione con la sponda sinistra, S_{P2} ; si ricavano inoltre le distanze trasversali d_{P2} (segmento $S_{P2}P$) e B_{P2} (segmento $S_{P2}D_{P2}$), nonché la distanza longitudinale (curvilinea) $L_{dx,MP}$ rispetto alla sezione di monte lungo la sponda destra (schema Figura B-2b).

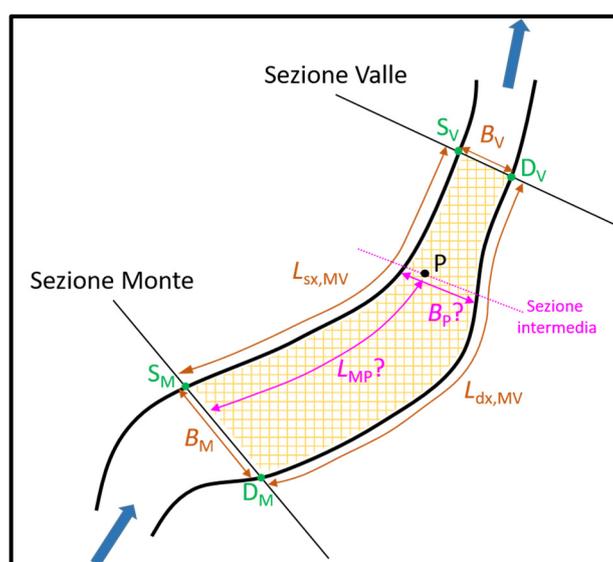


Figura B-1: Schema di un "tronco" di alveo inciso in cui correggere la batimetria

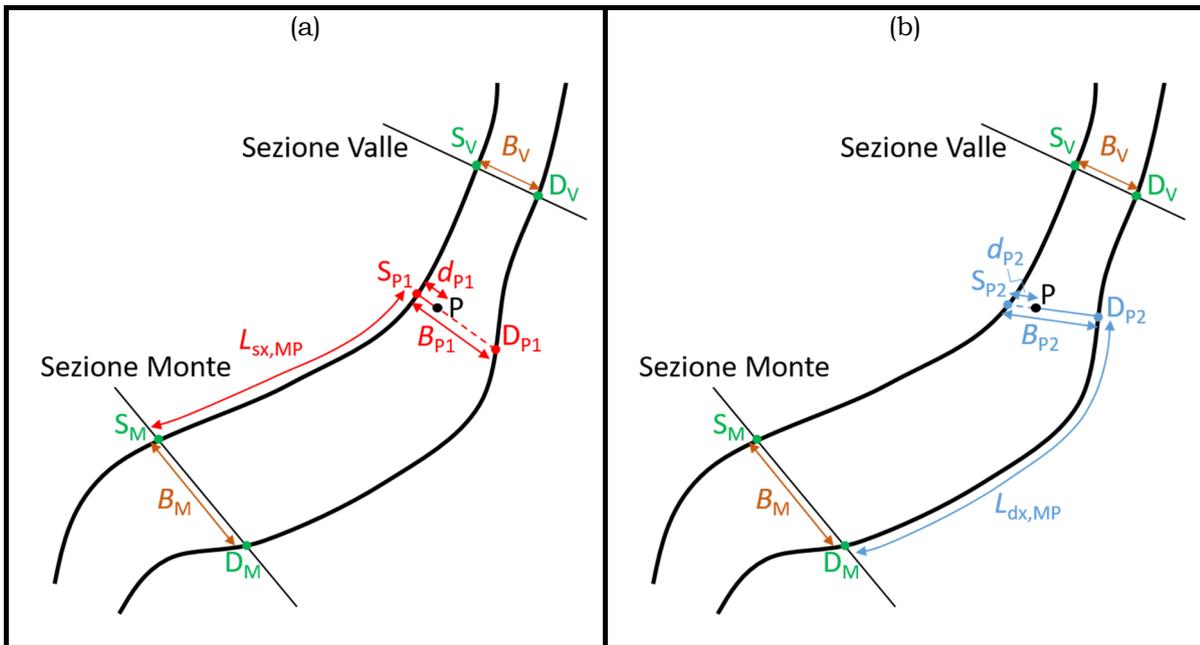


Figura B-2: Schema dei passaggi per la determinazione delle caratteristiche della sezione "intermedia" passante per il punto P.

3. Si ricavano i valori adimensionali della distanza trasversale del punto P dalla sponda sinistra nei due casi: $a_{p1} = d_{p1}/B_{p1}$, e $a_{p2} = d_{p2}/B_{p2}$. Per trovare un valore unico rappresentativo della sezione "intermedia", si fa una media aritmetica tra i due valori: $a_p = (a_{p1} + a_{p2})/2$.
4. Per calcolare la distanza longitudinale "media" del punto dalla sezione di monte si attribuiscono pesi diversi alle distanze longitudinali calcolate ai punti 1) e 2). In particolare, la media sarà pesata sulla base della distanza trasversale a_p del punto P dalla sponda sinistra, calcolata al punto 3): $L_{MP} = a_p \cdot L_{sx,MP} + (1 - a_p) \cdot L_{dx,MP}$.

A questo punto sono noti i valori delle grandezze necessarie per l'interpolazione della quota del punto P sulla base delle quote delle sezioni di monte e di valle.

Lungo la sezione di monte si individua il punto P_M , tale che la sua distanza dalla sponda sinistra (segmento $S_M P_M$) sia pari a $a_p \cdot B_M$ (Figura B-3), e se ne trova la quota z_M (interpolando linearmente tra i punti che descrivono la sezione stessa). Analogamente per la sezione di valle si calcola z_V .

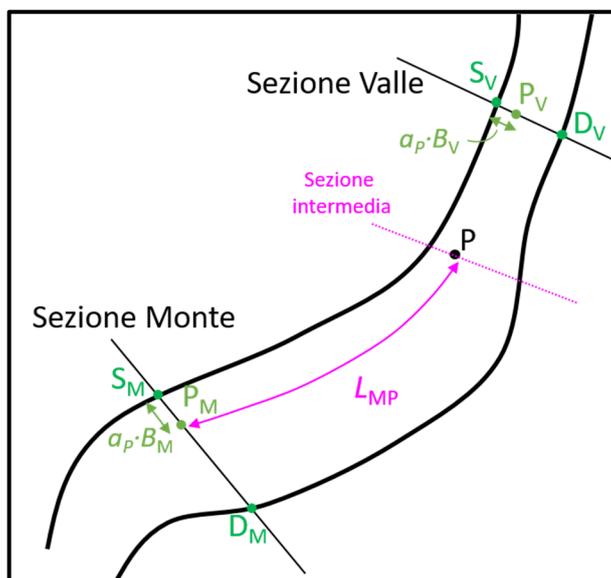


Figura B-3: Schema per l'Interpolazione della quota del punto P.

La nuova quota del punto P z_P sarà dunque interpolata tra le quote z_M e z_V sulla base della distanza longitudinale: $z_P = z_M + L_{MP} \cdot (z_V - z_M) / L_{MPV}$.

Grazie alla procedura descritta, per ciascun punto P vengono combinate informazioni relative sia alla sua distanza dalle sezioni a monte e a valle sia alla sua distanza dalle sponde destra e sinistra dell'alveo inciso, in modo da onorare il più possibile i dati disponibili.

L'algoritmo ripete l'operazione per tutti i punti interni ad ogni singolo tronco, e per tutti i tronchi delimitati da coppie di sezioni successive, in modo da correggere l'alveo inciso lungo tutto il corso d'acqua.

L'interpolazione sarà tanto migliore quanto più sono numerose e ravvicinate le sezioni rilevate a terra e quanto più accurata è la digitalizzazione manuale delle sponde destra e sinistra dell'alveo inciso.