

Contratto per il servizio di ingegneria per l'esecuzione di studi idraulici per l'aggiornamento delle aree a pericolosità da alluvione fluviale individuate nel piano di gestione del rischio alluvione (CUP G43E24000080002) CIG B35A8A68E9CIG B35A8A68E9

Relazione tecnica – torrente Varatella, torrente Barescione e rio Pattarello (SV)





This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)

ISO 9001  
Management System Certification

BUREAU VERITAS  
Certification Denmark A/S



Contratto per il servizio di ingegneria per l'esecuzione di studi idraulici per l'aggiornamento delle aree a pericolosità da alluvione fluviale individuate nel piano di gestione del rischio alluvione (CUP G43E24000080002) CIG B35A8A68E9CIG B35A8A68E9

Relazione tecnica

Committente Regione Liguria - Settore Assetto del Territorio

Referente del Committente Ing. Roberto Boni



Vista da valle verso monte del tratto terminale del torrente Varatella



Autorizzato	Matteo Simbola (Hydrodata S.p.a.)
Verificato	Luca Dutto (Hydrodata S.p.a.)
Redatto	Matteo Simbola (Hydrodata S.p.a.)

Codice progetto - elaborato	3916-01-00100
Data di approvazione	04/06/2025
Revisione	1.0
Classificazione	Open







# INDICE

<b>1</b>	<b>Premessa .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Analisi critica dello stato attuale dei luoghi .....</b>	<b>2</b>
2.1	Assetto attuale del corso d'acqua .....	2
2.1.1	Torrente Varatella .....	2
2.1.2	Torrente Barescione .....	11
2.1.3	Rio Pattarello.....	14
2.2	Stato di rischio da pianificazione vigente .....	16
<b>3</b>	<b>Caratterizzazione del bacino e idrologia di piena .....</b>	<b>20</b>
3.1	Caratteristiche idrologiche del bacino .....	20
3.2	Portate di piena e analisi dell'evento idrologico critico .....	21
3.2.1	Dati di progetto da normativa vigente .....	21
3.2.2	Valutazione delle portate di piena da DGR n.357/2008 .....	22
3.2.3	Conclusioni e scelta della portata di riferimento .....	34
<b>4</b>	<b>Allestimento del modello numerico .....</b>	<b>37</b>
4.1	Modulo monodimensionale .....	37
4.2	Modulo bidimensionale .....	43
4.3	Parametri e condizioni al contorno del modello .....	44
<b>5</b>	<b>Risultati delle simulazioni.....</b>	<b>46</b>
5.1	Profili di corrente in alveo.....	46
5.1.1	Evento di piena cinquantennale (TR50) .....	46
5.1.2	Evento di piena duecentennale (TR200) .....	60
5.1.3	Evento di piena cinquecentennale (TR500).....	73
5.2	Analisi della propagazione delle esondazioni .....	86
5.2.1	Evento di piena cinquantennale (TR50) .....	86
5.2.2	Evento di piena duecentennale (TR200) .....	88
5.2.3	Evento di piena cinquecentennale (TR500).....	90
5.3	Confronto con le fasce di pericolosità vigenti .....	92
<b>6</b>	<b>Analisi di sensitività dei risultati .....</b>	<b>95</b>
6.1	Scenario con carenza di franco e ridotta capacità di deflusso .....	95
6.1.1	Evento di piena cinquantennale (TR50) .....	95
6.1.2	Evento di piena duecentennale (TR200) .....	101
6.1.3	Evento di piena cinquecentennale (TR500).....	107
6.2	Analisi di sensitività rispetto alla scabrezza areale .....	113
6.3	Conclusioni sull'analisi di sensitività .....	116

7	Proposta di perimetrazione delle aree di pericolosità.....	117
8	Proposta di aggiornamento Misure di Gestione del Rischio Alluvioni .....	119
	<b>ALLEGATI .....</b>	<b>127</b>
	<b>ALLEGATO A .....</b>	<b>129</b>
A.1	PREMESSA .....	131
A.2	MODULO IDRODINAMICO (HD) .....	132
A.3	DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE .....	132
A.4	EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT .....	133
A.5	SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA .....	133
A.6	APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA .....	134
A.7	DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE .....	134
A.8	RESISTENZA D'ATTRITO.....	135
A.9	CONDIZIONI INIZIALI .....	135
A.10	METODO DI SOLUZIONE.....	135
A.11	CONDIZIONI AL CONTORNO .....	136
A.12	DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO .....	136
	<b>ALLEGATO B .....</b>	<b>1</b>
B.1	PREMESSA .....	1
B.2	MODULO IDRODINAMICO (HD) .....	3

## 1 Premessa

La presente relazione tecnica è stata redatta nell'ambito del contratto stipulato in data 18/10/2024 tra Regione Liguria e il Raggruppamento Temporaneo di Imprese DHI s.r.l. (mandataria) / HYDRODATA S.p.A. (mandante), relativo all'esecuzione di studi idraulici finalizzati all'aggiornamento delle aree a pericolosità da alluvione fluviale individuate nel Piano di Gestione del Rischio Alluvione (PGRA 2021–2027), con riferimento specifico al torrente Varatella e ai suoi affluenti Barescione e Pattarello, nei comuni di Borghetto Santo Spirito e Toirano (SV). Tali corsi d'acqua, appartenenti al reticolo idrografico secondario come definito dalla disciplina di piano, risultano già oggetto di analisi nel precedente ciclo di pianificazione e sono stati inseriti tra i tratti per cui si rende necessario un aggiornamento idraulico e cartografico.

Le attività sono state condotte secondo quanto previsto nel Disciplinare Tecnico allegato al contratto e hanno preso avvio con l'elaborazione di un piano di indagini, finalizzato all'acquisizione di un rilievo topografico di dettaglio aggiornato per l'intero tratto del Varatella e per i tratti degli affluenti minori Barescione e Pattarello. Il rilievo ha permesso di verificare la congruità delle sezioni idrauliche precedentemente utilizzate e di acquisire nuove informazioni plano-altimetriche con sufficiente dettaglio per la successiva fase di modellazione.

Sulla base dei dati aggiornati, è stata eseguita una nuova analisi idrologica per la definizione degli idrogrammi di piena, in conformità con i criteri tecnici indicati dalla DGR Liguria 357/2008. I valori di portata al colmo e i relativi idrogrammi sono stati stimati ex novo per ciascun bacino affluente, adottando metodologie aggiornate e coerenti con le prescrizioni regionali. I risultati ottenuti sono stati confrontati con i valori riportati nel vigente Piano di Bacino.

La modellazione idraulica è stata sviluppata mediante il software MIKE+ (DHI), predisponendo un modello numerico accoppiato 1D–2D in moto vario, in grado di simulare il deflusso lungo il reticolo principale e le eventuali esondazioni nelle aree perifluviali. La componente 1D è stata utilizzata per rappresentare il deflusso in alveo, mentre la componente 2D ha permesso di caratterizzare la propagazione dell'onda di piena nelle aree adiacenti, valutando i tiranti idrici e le velocità di flusso potenzialmente associati a eventi estremi.

Sono stati simulati eventi di piena con tempi di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni (TR50, TR200, TR500), e successivamente sono stati analizzati scenari di sensibilità idraulica per valutare l'effetto di condizioni di criticità ulteriori (es. scarsa disponibilità di franco idraulico, occlusioni parziali, variazioni di scabrezza). Tali simulazioni hanno consentito di definire un involucro delle condizioni critiche, rappresentativo del massimo rischio idraulico potenzialmente atteso in condizioni attuali.

A valle dell'analisi modellistica, sono state delineate le nuove aree potenzialmente inondabili per ciascun tempo di ritorno, corrispondenti alle classi di pericolosità P1, P2 e P3 previste dal PGRA. Le perimetrazioni ottenute sono state restituite in formato cartografico e vettoriale (SHP), corredate dalle mappe dei tiranti e delle velocità massime di flusso, sia in valore assoluto che relativo.

Contestualmente, è stata predisposta una proposta di aggiornamento delle misure di gestione del rischio idraulico in coerenza con quanto previsto dalla disciplina di Piano del PGRA.

La presente relazione fornisce un inquadramento completo e aggiornato delle condizioni idrauliche del bacino del Varatella e dei suoi affluenti, costituendo un contributo tecnico essenziale per la revisione delle mappe di pericolosità da alluvione fluviale e per il miglioramento della pianificazione territoriale e della gestione del rischio.

## 2 Analisi critica dello stato attuale dei luoghi

### 2.1 Assetto attuale del corso d'acqua

Il **Torrente Varatella** è un corso d'acqua a regime torrentizio situato nella Liguria di Ponente, in provincia di Savona. Nasce nell'entroterra del comune di Toirano, dove ha origine dalla confluenza di due affluenti principali: il Rio della Valle e il Rio di Carpe.

A valle del punto di origine, il Varatella attraversa il centro di Toirano, ricevendo l'apporto di alcuni affluenti secondari ma idrologicamente rilevanti.

Tra questi, il **Torrente Barescione** rappresenta il tributario di maggior portata: esso drena un ampio settore del versante orientale della valle e confluisce nel Varatella nel tratto urbano, contribuendo in maniera significativa alla sua portata complessiva. Il **Rio Pattarello**, anch'esso affluente destro, presenta invece un bacino di dimensioni più contenute e un regime idrico più intermittente, ma può comunque incrementare sensibilmente la portata del fiume in occasione di eventi meteorici intensi.

Nel suo tratto terminale, il Varatella si apre verso la piana costiera e sfocia nel Mar Ligure all'altezza di Borghetto Santo Spirito. In questa zona, fortemente antropizzata, il fiume è stato oggetto di canalizzazioni e interventi di messa in sicurezza idraulica, soprattutto per mitigare il rischio di esondazione in caso di piogge intense.

Di seguito vengono descritti in dettaglio gli assetti attuali dei tre corsi d'acqua oggetto di studio.

#### 2.1.1 Torrente Varatella

Il tratto di torrente Varatella oggetto del presente studio inizia a circa 1,5 km di distanza dal punto di origine in località Salto del Lupo e va fino alla foce in mare. La lunghezza è di circa 5,5 km.

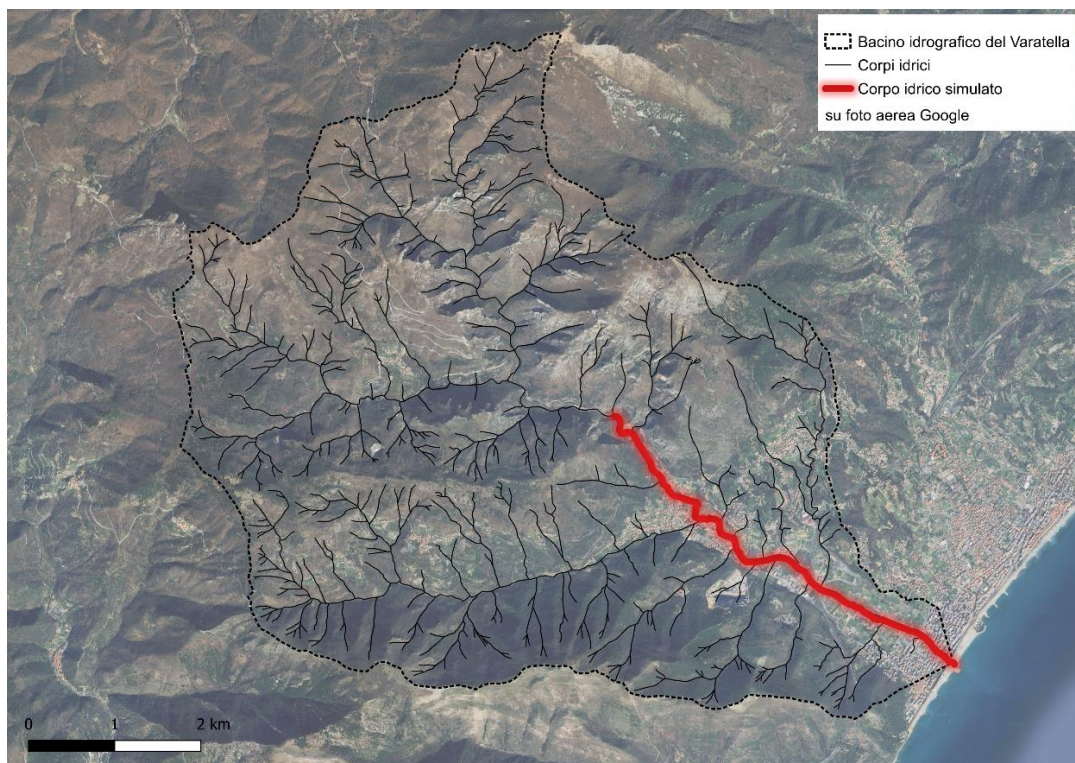


Figura 1 - Torrente Varatella, tratto oggetto di simulazione idraulica.

Il tratto iniziale del corso d'acqua, fino all'abitato di Toirano, mantiene una configurazione morfologica sostanzialmente naturale, grazie all'assenza di interventi urbanistici rilevanti. L'alveo si presenta profondamente inciso e si sviluppa prevalentemente su litologia rocciosa, condizione che ne influenza sia la geometria che la dinamica fluviale. Le sponde risultano occupate da una vegetazione arbustiva densa e continua, mentre lungo la sponda destra idrografica si sviluppa, per quasi l'intera estensione del tratto considerato, la Strada Provinciale SP60, che corre parallelamente al corso d'acqua.

In questo tratto si individuano due attraversamenti a campata singola. Il primo, identificato come CLV\_3, interessa la Strada Provinciale SP60 ed è situato a circa 0,3 km a valle dell'inizio del tratto; presenta una luce netta alla base dell'arcata pari a circa 7,6 m (Figura 1). Il secondo, denominato CLV\_6, corrisponde all'attraversamento della SP25 e si colloca a circa 1,0 km a valle del medesimo riferimento iniziale, con una luce alla base dell'arcata di circa 5,0 m (Figura 2).



Figura 2 – Vista da monte del ponte SP1 (CLV\_3).

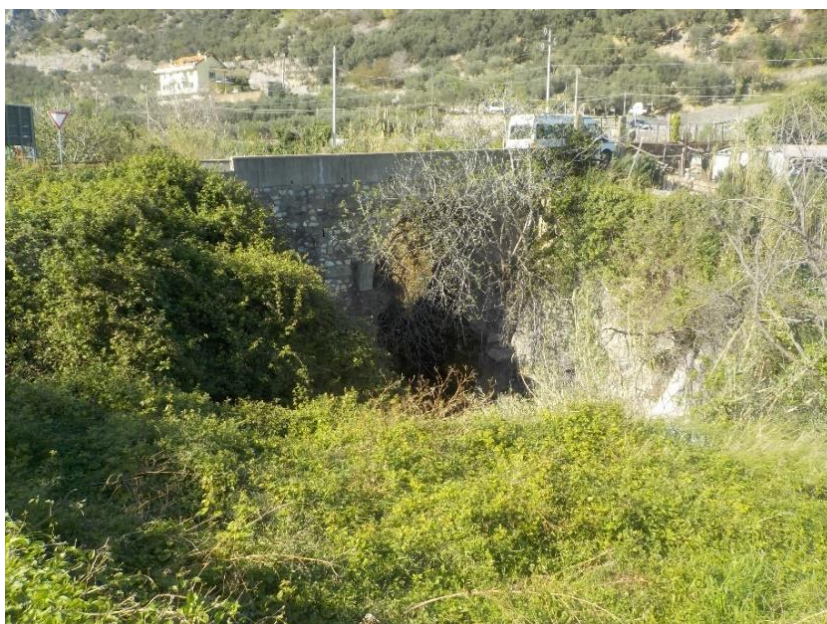


Figura 3 – Vista da valle del ponte SP25 (CLV\_6).

Il tratto tra l'abitato di Toirano e il ponte autostradale è caratterizzato dalla presenza fitta di canneti, assetto mutabile sotto la spinta della corrente in caso di piena. La geometria delle sezioni segue la morfologia del terreno con forme tra loro differenti e con andamento piuttosto irregolare. Su entrambe le sponde sono presenti alcuni muri d'argine in pietra a protezione di piccoli fondi coltivati. Nei pressi di Toirano ci sono diverse briglie / salti di fondo.

In Figura 4 sono rappresentati i ponti e i salti di fondo che si trovano nel tratto del torrente Varatella (linea blu) nei pressi di Toirano e la confluenza del torrente Barescione (linea verde).

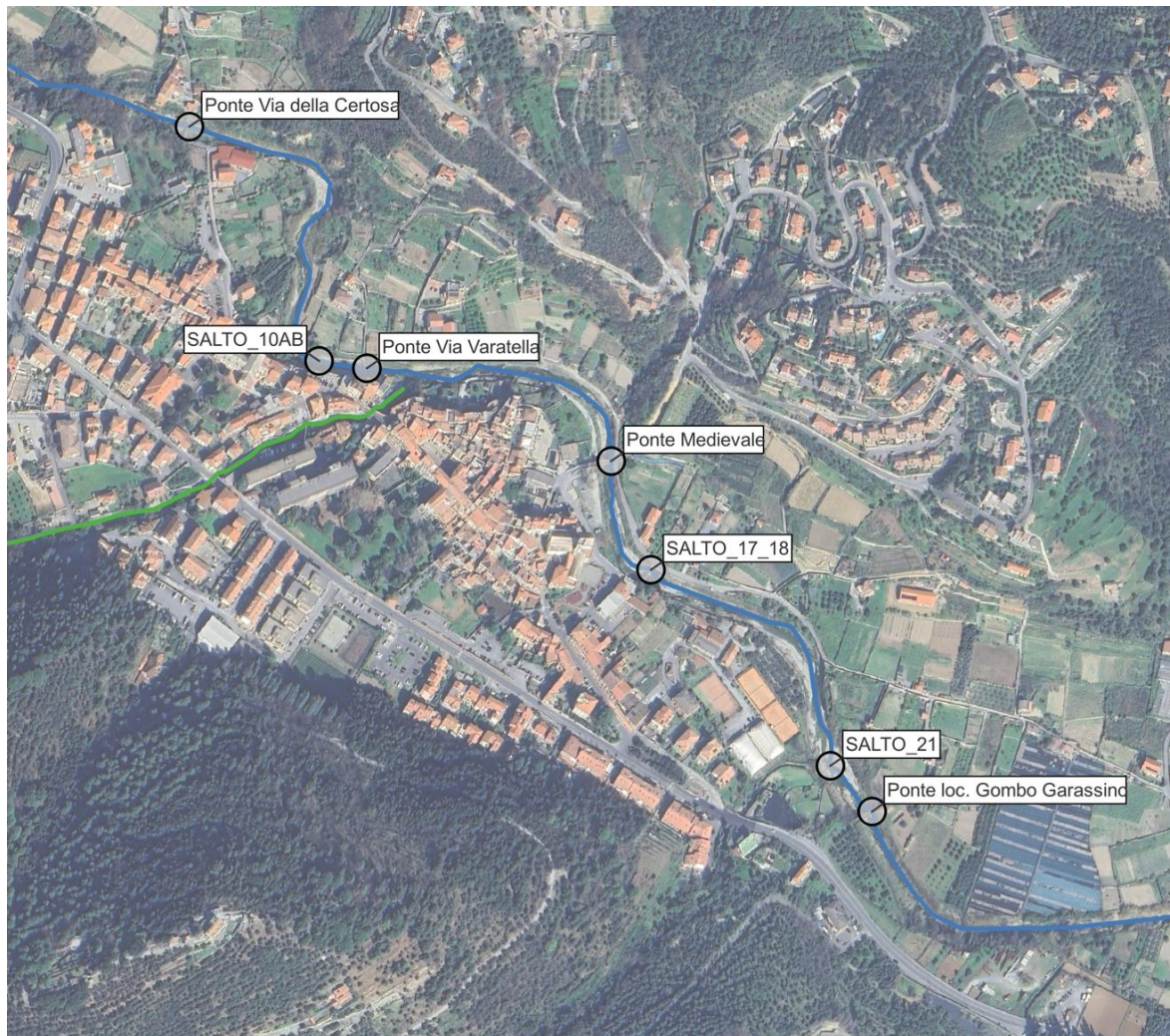


Figura 4 – Planimetria nel tratto nei pressi di Toirano con indicata l'ubicazione dei ponti e dei salti di fondo.

In questo tratto si riscontrano quattro attraversamenti principali, ciascuno con caratteristiche strutturali distinte:

- Ponte di Via della Certosa (CLV\_8): struttura a due arcate con una larghezza media al piede di circa 8,0 m; è presente una pila intermedia posizionata in alveo, con larghezza approssimativa pari a 3,3 m (Figura 5).
- Ponte di Via Varatella (CLV\_11): ubicato immediatamente a monte della confluenza con il Torrente Barescione, è costituito da un impalcato orizzontale a soletta piena in calcestruzzo armato, con larghezza di circa 9,5 m (Figura 6).
- Ponte Medievale (CLV\_16): collega Via Costa con Via Ponte Medievale ed è composto da tre arcate con pile di larghezza media pari a circa 3,5 m. Il deflusso si concentra

esclusivamente in una delle arcate, caratterizzata da una luce al piede di circa 13,0 m (Figura 7).

- Ponte in località Gombo Garassino (CLV\_23): realizzato con una singola arcata avente larghezza al piede di circa 18,0 m (Figura 8).



Figura 5 – Vista da monte del ponte Via della Certosa (CLV\_8).



Figura 6 – Vista da valle del ponte Via Varatella (CLV\_11).



Figura 7 – Vista da valle del ponte medievale (CLV\_16).



Figura 8 – Vista da valle del ponte in località Gombo Garassino (CLV\_23).

La Figura 9 illustra il ponte dell'Autostrada dei Fiori (CLV\_31), comprendente l'ubicazione planimetrica, una fotografia scattata dal lato di Via Canepari, in sinistra idrografica, e lo schema della sezione rilevata in campo.

L'opera si colloca a valle della confluenza con il rio Pattarello (evidenziata in figura con una linea arancione) ed è costituita da un impalcato a travate in calcestruzzo armato, sostenuto da cinque pile cilindriche del diametro di 3,0 metri, di cui quattro posizionate direttamente in alveo.

Immediatamente a monte del viadotto, nell'autunno del 2004 sono stati eseguiti interventi di manutenzione idraulica che hanno previsto la pulizia della sponda sinistra e dell'alveo, seguiti da operazioni di riprofilatura e risagomatura locale. In tale ambito è stata inoltre realizzata una scogliera in massi lungo la sponda sinistra, per una lunghezza complessiva di circa 380 m.

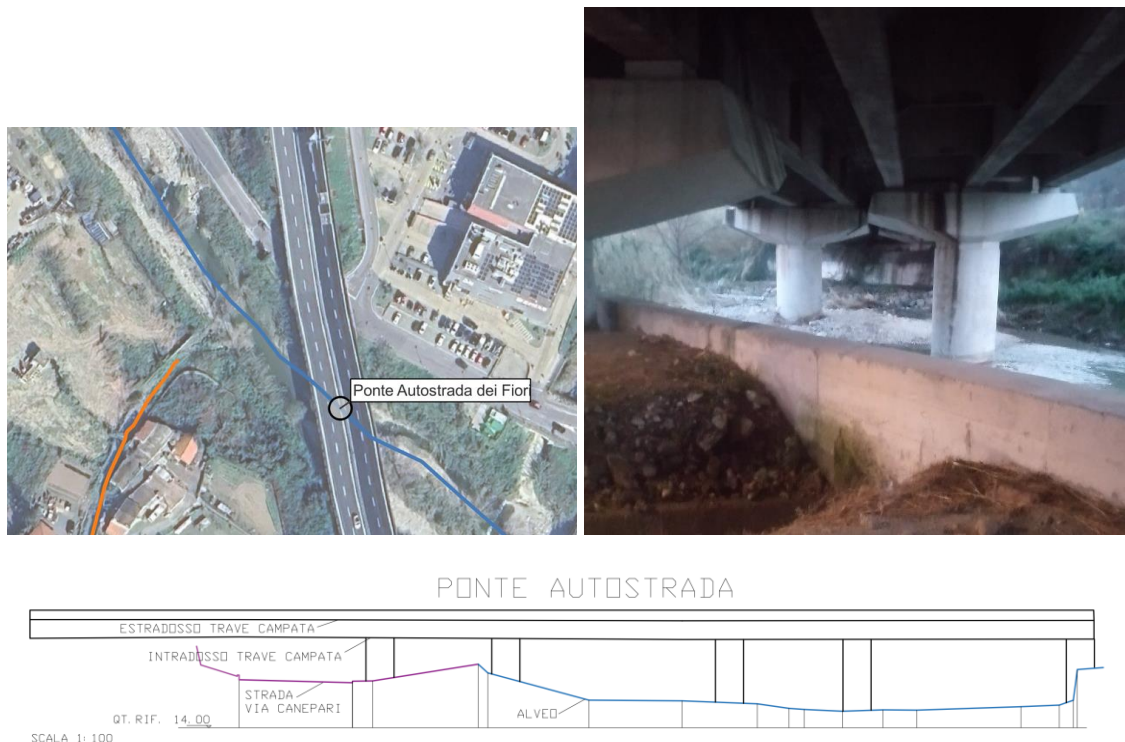


Figura 9 – Ponte dell'autostrada dei Fiori (CLV\_31): ubicazione planimetrica, foto di dettaglio vista dalla strada Via Canepari e schema della sezione rilevata per il modello.

Più a valle, a meno di 80,0 m dal ponte autostradale, è presente l'attraversamento di corso Giotto (CLV\_32) costituito da un impalcato orizzontale a soletta piana in c.a. e sostenuto da una struttura in acciaio. La larghezza del ponte è di circa 34,6 m.



Figura 10 – Vista da valle del ponte Corso Giotto (CLV\_32).

L'ultimo tratto che va dal ponte autostradale alla foce è stato parzialmente sistemato ed arginato in modo non continuo e con tecniche realizzative differenti.

A monte del centro abitato di Borghetto Santo Spirito, in seguito ai fenomeni di inondazione del novembre 2000, sono state realizzate opere di sistemazione degli argini mediante sterri e riporti, nonché opere di sistemazione inerenti alla realizzazione dell'impianto di depurazione.

Il tratto in corrispondenza di Borghetto Santo Spirito presenta un elevato grado di antropizzazione con presenza di viabilità a raso su entrambe le sponde. Al fine di mitigare il rischio idraulico è stata svolta una prima parte degli interventi per regolarizzare e allargare le sezioni dell'alveo su di una larghezza di 33,0 m sia rifacendo nuovi argini in c.a. che innalzando quelli esistenti. Ad oggi i lavori sono in corso d'opera e la porzione di alveo regolarizzata e arginata va dalla foce al tratto tra le due passerelle pedonali (tra la passerella nei pressi di Piazza Italia e quella vicino a Via Ponti).

In Figura 11 è rappresentato l'ultimo tratto del torrente Varatella e gli attraversamenti esistenti.



Figura 11 – Planimetria del tratto in corrispondenza di Borghetto Santo Spirito con indicata l'ubicazione dei ponti.

Gli attraversamenti che si incontrano in questo ultimo tratto sono:

- Ponte di Via Leonardo da Vinci (CLV\_41): attraversamento a campata unica in calcestruzzo armato, con larghezza complessiva pari a 34,3 m e luce libera di deflusso di 5,0 m. Su entrambi i lati dell'impalcato sono presenti due luci laterali, ciascuna della larghezza di 10,0 m, destinate alla viabilità locale di sponda (Figura 12);
- Passerella pedonale nei pressi di Piazza Italia (CLV\_42): struttura in calcestruzzo armato a due campate, con larghezza media di circa 17,0 m e una pila centrale di sezione pari a 0,4 m (Figura 13);
- Passerella pedonale in prossimità di Via Ponti (CLV\_43): realizzata con un'unica arcata avente larghezza complessiva di 33,5 m (Figura 14);
- Attraversamento della Strada Statale Aurelia (SS1) – CLV\_45: impalcato a soletta piana in calcestruzzo armato, con larghezza complessiva pari a circa 27,0 m (Figura 15);
- Viadotto ferroviario della linea Genova–Ventimiglia (CLV\_46): costituito da tre arcate con larghezza media al piede di circa 7,7 m, sostenute da due pile centrali con larghezza media di 1,5 m (Figura 16);
- Ponte di Via Lungomare Matteotti (CLV\_47): attraversamento con impalcato orizzontale a soletta piana in calcestruzzo armato, di larghezza pari a circa 26,8 m (Figura 17).



Figura 12 – Vista da monte del ponte Leonardo da Vinci (CLV\_41).

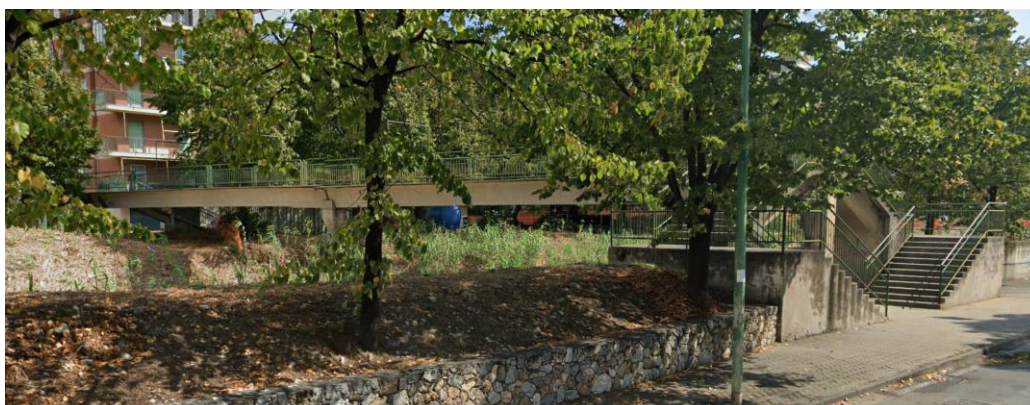


Figura 13 – Vista da monte della passerella nei pressi di Piazza Italia (CLV\_42).



Figura 14 – Vista da valle della passerella vicino a Via Ponti (CLV\_43).



Figura 15 – Vista da monte dell'attraversamento dell'Aurelia SS1 (CLV\_45).

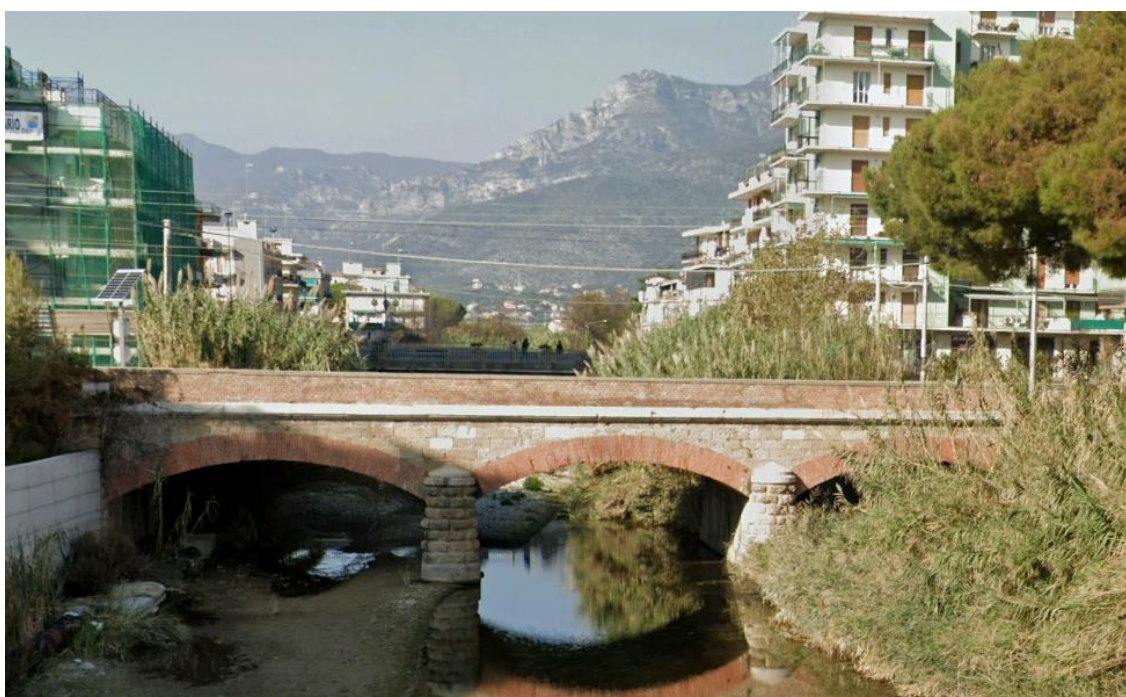


Figura 16 – Vista da valle dell'attraversamento della linea ferroviaria Genova-Ventimiglia (CLV\_46).



Figura 17 – Vista da monte del ponte via lungomare Matteotti (CLV\_47).

## 2.1.2 Torrente Barescione

Il tratto di torrente Barescione di interesse per il presente studio inizia in località Barescione fino alla confluenza con il torrente Varatella. La lunghezza è di circa 0,7 km.

In generale, l'alveo è fortemente inciso e scorre prevalentemente in roccia; sulle sponde è presente una fitta vegetazione sia erbacea che arbustiva. Nel tratto in corrispondenza dell'abitato di Toirano le sponde dell'alveo sono direttamente le perimetrazioni delle abitazioni o i muretti d'argine in pietra a protezione di piccoli fondi coltivati.

In Figura 18 è rappresentato il tratto di studio del torrente Barescione (linea verde) fino alla confluenza nel torrente Varatella (linea blu) con l'ubicazione degli attraversamenti e dei salti di fondo.



Figura 18 – Planimetria del tratto di studio del torrente Barescione con indicata l'ubicazione dei ponti e dei salti di fondo.

Nel tratto oggetto di studio sono presenti due salti di fondo di altezze totali di circa 3,0÷3,5 m (Figura 19) e cinque attraversamenti così costituiti:

- Ponte di Via Bandiasso (CLV\_A2) costituito da un'unica arcata di larghezza al piede di circa 5,2 m (Figura 20);
- Attraversamento SP60 (CLV\_A5) composto un'arcata di larghezza di 9,2 m (Figura 21);
- Passerella pedonale (CLV\_A8) costituita da un'arcata di larghezza di circa 14,8 m e una luce libera di deflusso di circa 8,5 m (Figura 22);
- Ponte Via Braida (CLV\_A11) composto da un impalcato orizzontale a soletta piana in c.a. largo circa 6,2 m (Figura 23);
- Attraversamento canaletta (CLV\_A12.1) composto da un'unica arcata di larghezza massima di circa 10,0 m e una luce libera di deflusso di circa 3,8 m (Figura 24).

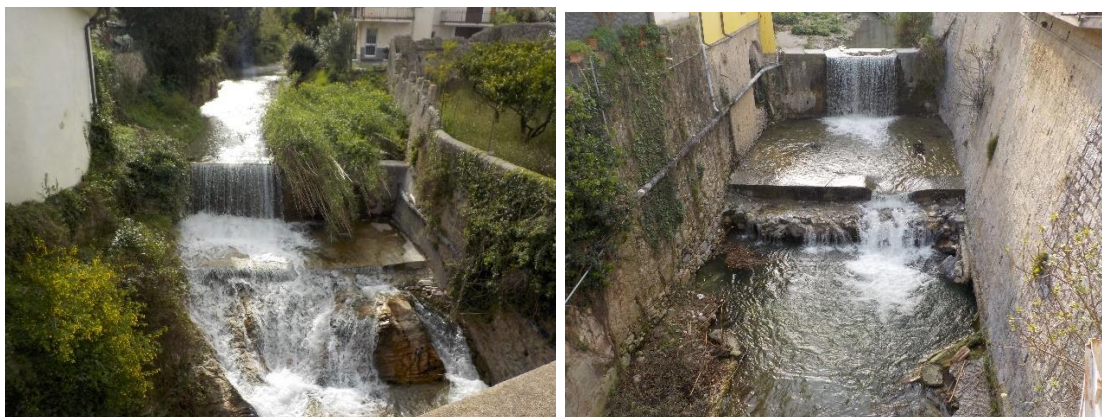


Figura 19 – Vista da valle dei salti di fondo: SALTO\_A4 a sinistra e SALTO\_A9 a destra.



Figura 20 – Vista da monte del ponte di Via Bandiasse (CLV\_A2).



Figura 21 – Vista da valle dell'attraversamento SP60 (CLV\_A5).



Figura 22 – Vista da monte della passerella pedonale (CLV\_A8).



Figura 23 – Vista da valle del ponte di Via Braida (CLV\_A11).



Figura 24 – Vista da monte dell'attraversamento della canaletta dell'acqua (CLV\_A12.1).

### 2.1.3 Rio Pattarello

Il tratto del rio Pattarello di interesse per il presente studio scorre in località Cappellotti fino alla confluenza nel torrente Varatella. La lunghezza è di circa 0,3 km.

In generale, in alveo e sulle sponde è presente una fitta vegetazione sia erbacea che arbustiva. In Figura 25 è rappresentato il tratto di studio del rio Pattarello (linea arancione) fino alla confluenza nel torrente Varatella (linea blu) con l'ubicazione dei due attraversamenti.

L'attraversamento della SP60 (CLV\_B2\_B3) è costituito da un impalcato orizzontale a soletta piana in c.a. di larghezza 3,9 m e una luce libera di deflusso di circa 1,2 m (Figura 26); il ponte di Via Enzo Ferrari (CLV\_B4\_B5) è costituito da un impalcato orizzontale a soletta piana in c.a. di larghezza 7,5 m e una luce libera media di deflusso di circa 1,0 m (Figura 27).

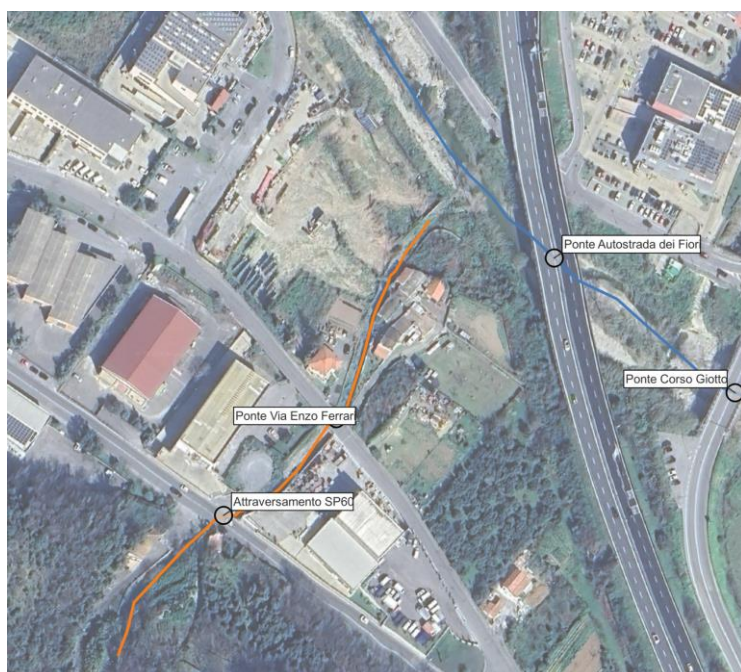


Figura 25 – Planimetria del tratto di studio del rio Pattarello con indicata l'ubicazione dei ponti.

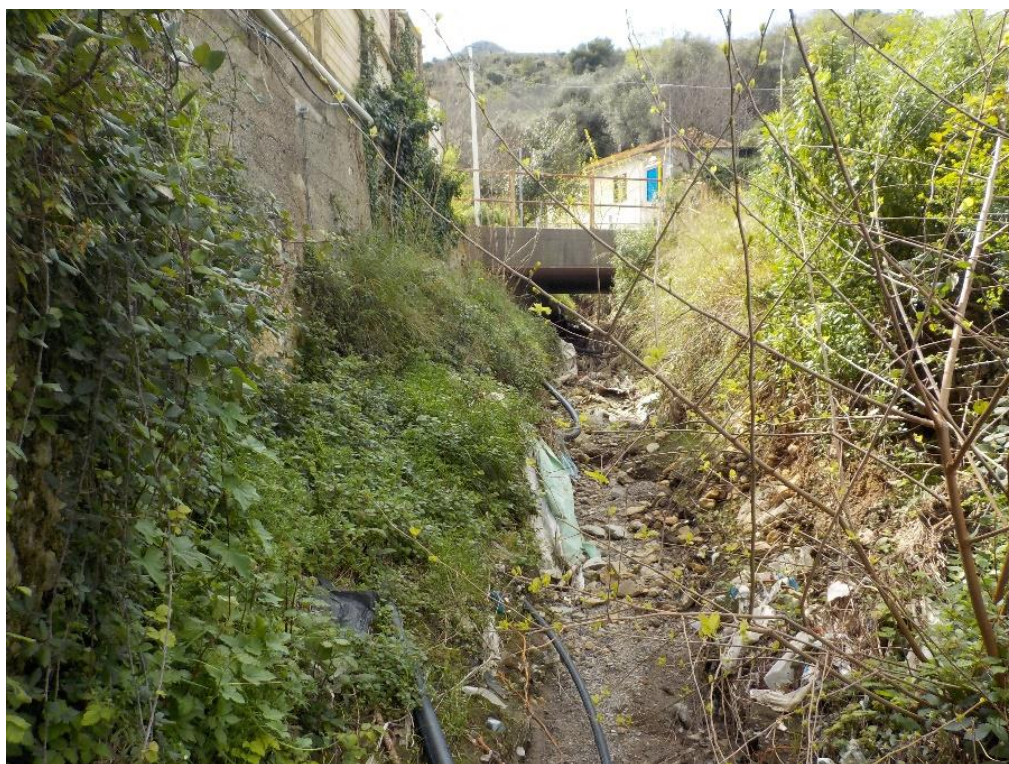


Figura 26 – Vista da valle dell'attraversamento SP60 (CLV\_B2\_B3).



Figura 27 – Vista da monte dell'attraversamento SP60 (CLV\_B4\_B5).

## 2.2 Stato di rischio da pianificazione vigente

In questo capitolo si presentano le fasce di pericolosità idraulica individuate nel vigente Piano di Bacino, il cui recepimento è avvenuto con la pubblicazione sul BURL in data 20 dicembre 2017, a seguito dell'approvazione formale avvenuta con Delibera del Consiglio Provinciale di Savona n. 47 del 25 novembre 2003.

A supporto della trattazione, si riportano delle immagini esplicative in cui sono rappresentate le tre fasce di allagamento associate agli eventi di piena con tempi di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni (TR50, TR200, TR500).

Dall'analisi delle immagini emerge chiaramente come le fasce di pericolosità idraulica avvolgano, nel complesso, l'intero tratto del torrente esaminato, dalla porzione montana fino alla foce.

Il centro abitato di Borghetto Santo Spirito risulta particolarmente esposto al rischio di esondazione e, di conseguenza, è quasi interamente ricompreso all'interno delle fasce di allagamento individuate nel vigente Piano di Bacino. Le fasce di pericolosità, a partire dalla fascia A, si sviluppano in modo pressoché simmetrico rispetto all'asse del corso d'acqua, interessando sia la sponda sinistra che quella destra. Le fasce B e C, che rappresentano scenari di maggiore estensione rispetto alla fascia A, mantengono anch'esse un andamento tendenzialmente regolare e simmetrico rispetto all'alveo.

In merito agli affluenti, si osserva che il torrente Barescione presenta aree di esondazione piuttosto contenute, con limitate superfici allagate. Al contrario, il rio Pattarello risulta ampiamente incluso all'interno delle fasce di pericolosità, evidenziando una maggiore vulnerabilità, probabilmente riconducibile a fenomeni di rigurgito idraulico generati dalle condizioni di deflusso nel torrente Varatella.

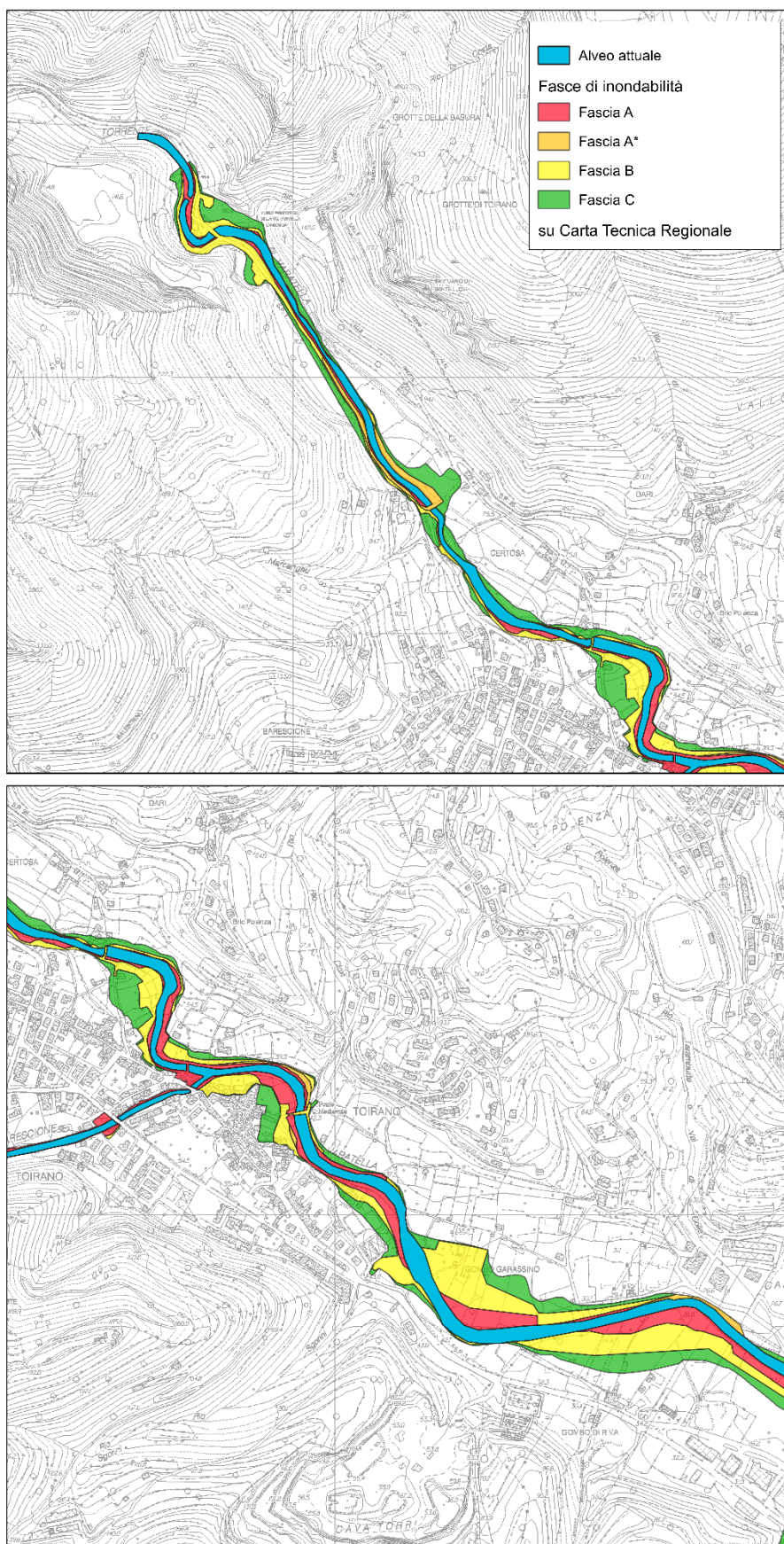


Figura 28 - Fasce fluviali di pericolosità per il torrente Varatella, porzione di monte.

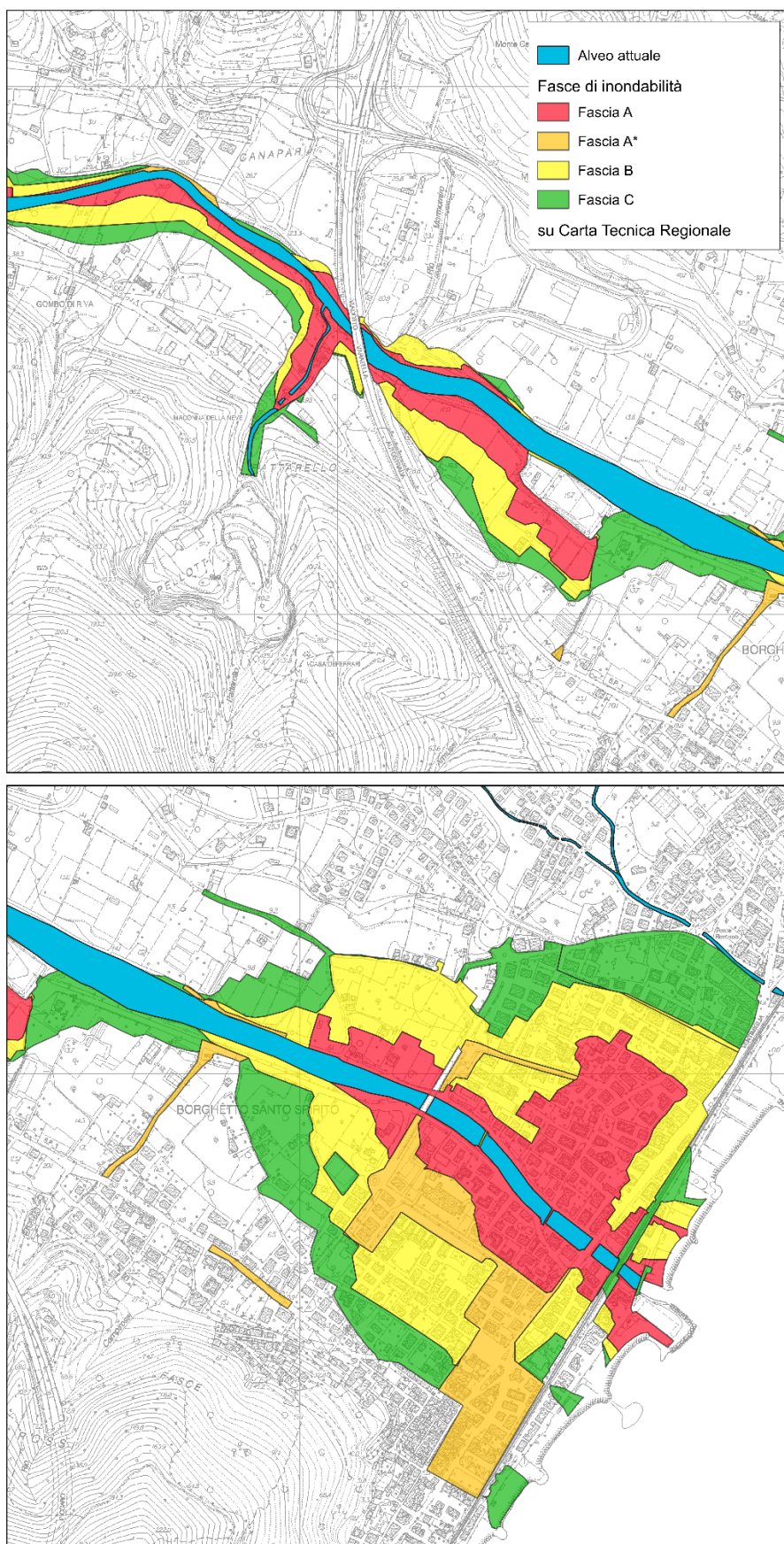


Figura 29 - Fasce fluviali di pericolosità per il torrente Varatella, porzione di valle.

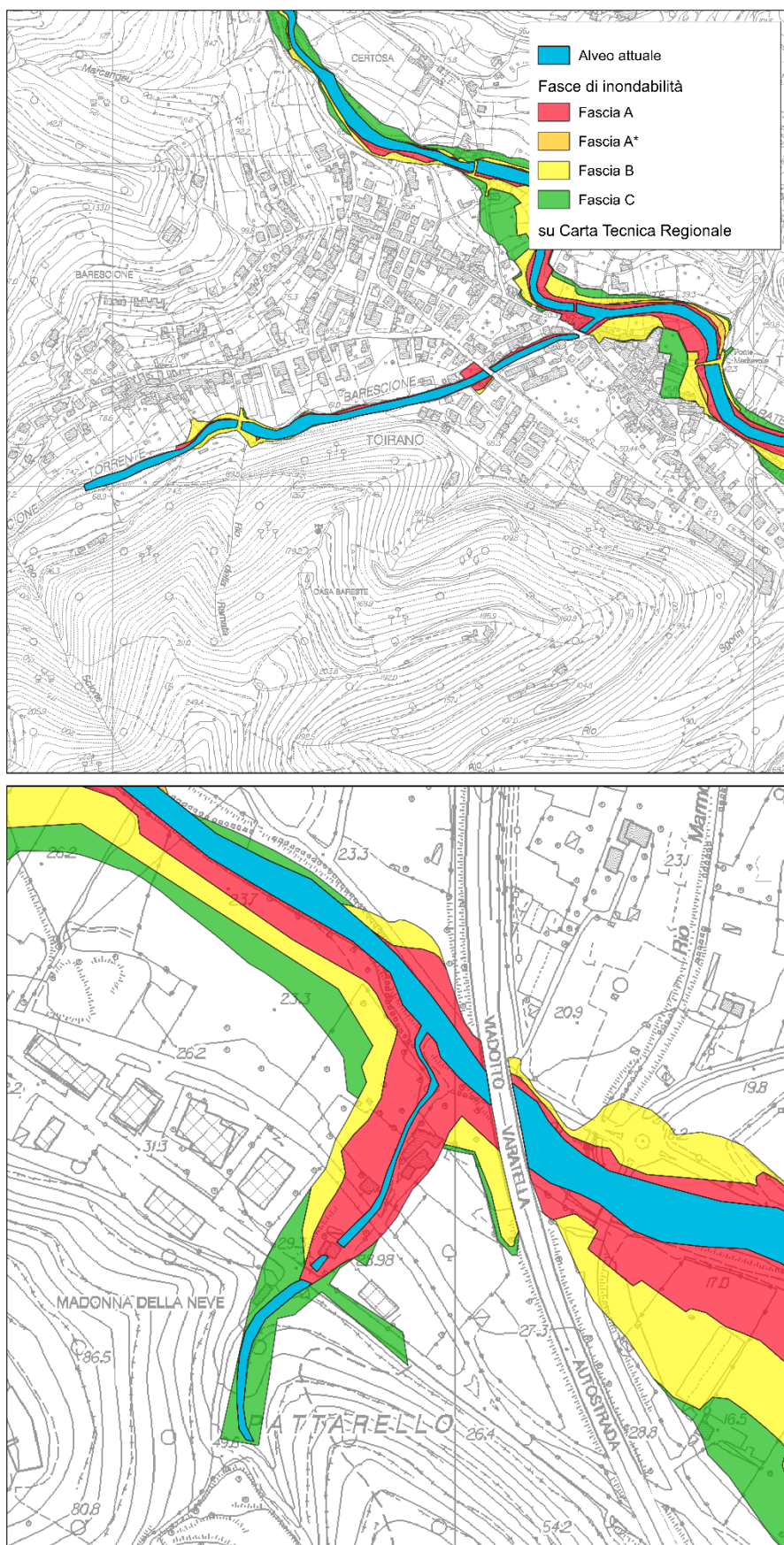


Figura 30 - Fasce fluviali di pericolosità per il torrente Barescione e del rio Pattarello.

## 3 Caratterizzazione del bacino e idrologia di piena

### 3.1 Caratteristiche idrologiche del bacino

Il bacino idrografico del torrente Varatella si sviluppa interamente nella Liguria di Ponente, in provincia di Savona, e presenta le caratteristiche morfologiche tipiche dei bacini montani dell'Appennino ligure: estensione limitata, elevata acclività dei versanti e una risposta idrologica estremamente rapida agli eventi meteorici, in particolare alle precipitazioni intense e concentrate.

Nella Figura 31 è riportata la rappresentazione cartografica dei bacini del Varatella e dei suoi principali affluenti oggetto di studio, il torrente Barescione e il rio Pattarello. Per ciascuno di essi sono state calcolate le principali caratteristiche fisiografiche, sintetizzate in Tabella 1, attraverso l'elaborazione di dati territoriali in ambiente GIS, utilizzando un modello digitale del terreno (DTM) a risoluzione 1 m, derivato da rilievo LiDAR regionale.

La lunghezza del bacino è definita secondo criteri idrologici, come la massima distanza idraulica tra il punto più remoto del bacino imbrifero e la sezione di chiusura, cioè la distanza massima che una goccia di pioggia deve percorrere lungo il reticolo idrografico per raggiungere l'uscita del bacino.

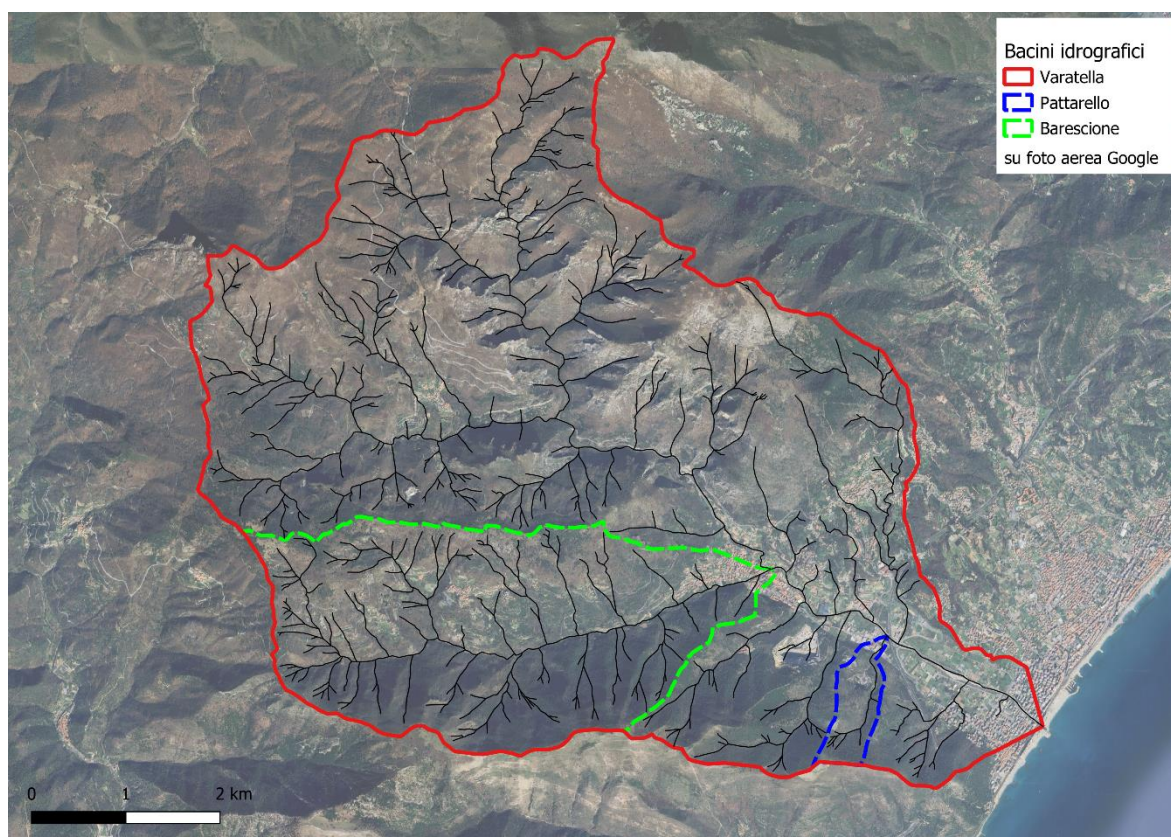


Figura 31 - Bacino del torrente Varatella, del torrente Barescione e del rio Pattarello con indicato il reticolo idrografico.

Descrizione	Parametro	Unità	Torrente Varatella	Torrente Barescione	Rio Pattarello
Superficie	S	km <sup>2</sup>	42,75	9,83	0,56
Altitudine massima	H <sub>MAX</sub>	m s.m.	1.385,00	825,00	532,00
Altitudine media	H <sub>MED</sub>	m s.m.	454,48	398,11	204,72
Quota della sezione di chiusura	H <sub>MIN</sub>	m s.m.	0,00	38,00	18,00
Lunghezza dell'asta principale	L	Km	12,07	6,44	1,54
Pendenza dell'asta principale	I	m/m	0,11	0,12	0,33
Pendenza dei versanti	$\theta$	m/m	51,90	53,40	51,20

Tabella 1 - Parametri morfologici caratterizzanti il bacino complessivo del torrente Varatella, del torrente Barescione e del rio Pattarello.

## 3.2 Portate di piena e analisi dell'evento idrologico critico

### 3.2.1 Dati di progetto da normativa vigente

Le portate di piena di progetto per il bacino in esame, associate ai diversi tempi di ritorno, sono attualmente quelle stabilite dal vigente Piano di Bacino, che rappresenta il riferimento normativo e pianificatorio per la gestione del rischio idraulico.

Nell'ambito della presente analisi, tuttavia, si procede con una valutazione idrologica indipendente, finalizzata a confrontare i risultati ottenuti con quelli previsti dalla pianificazione vigente, al fine di verificarne la coerenza e valutarne l'eventuale aggiornamento.

In particolare, le portate di piena del vigente PdB sono complessivamente riepilogate nella seguente Tabella 2.

Corso d'Acqua	Sezione di chiusura	Tempo di Ritorno 50 anni	Tempo di Ritorno 200 anni	Tempo di Ritorno 500 anni
Varatella	foce	380	550	670
Varatella	confluenza Barescione	220	310	380
Pattarello	confluenza Varatella	12	17	20
Barescione	confluenza Varatella	100	140	170

Tabella 2 - Portate di progetto da vigente Piano di Bacino.

### 3.2.2 Valutazione delle portate di piena da DGR n.357/2008

Come già anticipato, il riferimento normativo per la definizione delle portate al colmo di piena del bacino in esame è rappresentato dal Piano di Bacino vigente, che fornisce valori ufficiali per i principali tempi di ritorno e che, fino ad oggi, sono stati sistematicamente adottati per tutte le applicazioni idrauliche connesse alla pianificazione territoriale e alla gestione del rischio.

Tuttavia, in conformità a quanto stabilito dalla normativa vigente e, in particolare, dalla DGR n. 357/2008, una proposta di aggiornamento del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) richiede l'elaborazione di una nuova valutazione delle portate al colmo secondo la metodologia prescritta.

In questo contesto, l'analisi qui proposta ha l'obiettivo di soddisfare tale obbligo normativo, consentendo al contempo un confronto critico tra le portate storicamente utilizzate (da Piano di Bacino) e quelle aggiornate, al fine di individuare il riferimento idrologico più adeguato da adottare nelle successive fasi di pianificazione e progettazione.

#### 3.2.2.1 Sintesi delle linee guida

La procedura di adeguamento delle portate di piena dei piani di bacino liguri è stata definita nell'ambito dei *Criteria ed indirizzi tecnici per la verifica e valutazione delle portate e degli idrogrammi di piena attraverso studi idrologici di dettaglio nei bacini idrografici liguri* (DGR n.357/2008) e di seguito viene proposta una breve sintesi delle stesse, rimandando, per tutti gli approfondimenti, al documento originale pubblicato.

La portata al colmo di massima piena ( $q_T$ ) temibile in un generico sito fluviale è valutabile secondo la seguente relazione:

$$q_T = q_{indice} \cdot x_T$$

dove  $x_T$  indica un fattore di crescita la cui dipendenza dal tempo di ritorno  $T$  viene fissata da una legge valida a scala regionale. In estrema sintesi, tale fattore di crescita viene determinato in base alla posizione del bacino ed in funzione del tempo di ritorno da prefissati valori tabulati.

La portata indice ( $q_{indice}$ ) può essere stimata mediante diverse metodologie, riconducibili a due categorie principali: metodi diretti e metodi indiretti.

I metodi diretti si basano sull'elaborazione statistica di osservazioni idrometriche reali, e consentono di determinare la portata al colmo a partire da serie storiche di misure effettuate in situ. Tali approcci risultano applicabili esclusivamente nei casi in cui siano disponibili dati di portata al colmo affidabili e sufficientemente prolungati nel tempo.

Al contrario, i metodi indiretti permettono la stima della portata indice attraverso modelli di simulazione idrologica. Tra questi, uno dei più utilizzati è il metodo della simulazione dell'evento critico, che rappresenta un valido compromesso tra complessità computazionale, disponibilità e qualità dei dati pluviometrici necessari, e attendibilità delle stime ottenute. Per tali motivi, questo approccio è generalmente quello preferito nelle applicazioni operative e nella pianificazione, soprattutto in contesti caratterizzati da carenza di dati idrometrici diretti.

Nella presente relazione si farà ricorso al metodo dell'evento critico per la stima della portata indice; si procede pertanto a un suo approfondimento metodologico.

Il metodo dell'evento critico consente di stimare la portata indice alla sezione di chiusura del bacino mediante la simulazione di una precipitazione teorica, detta per analogia pioggia indice. Il processo di generazione del deflusso può essere rappresentato attraverso un modello idrologico globale a struttura semplificata, composto da due moduli principali disposti in serie.

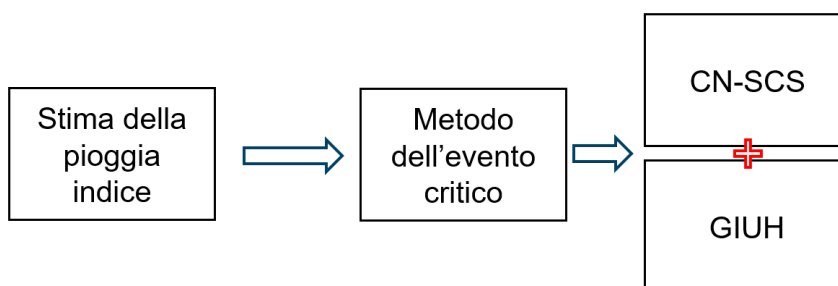


Figura 32 - Diagramma di flusso per la stima della pioggia indice secondo il Metodo dell'evento critico.

Il primo è un modello di perdita superficiale, che quantifica il volume di pioggia efficace tramite l'applicazione del metodo CN-SCS (Curve Number), basato sulle caratteristiche d'uso del suolo, della copertura vegetale e della condizione antecedente di umidità del terreno.

Il secondo modulo è un modello di trasformazione del deflusso, che simula la propagazione dell'acqua generata all'interno del reticolo idrografico. Quest'ultimo è implementato mediante un modello lineare che utilizza l'idrogramma unitario istantaneo (GIUH) di tipo gamma, comunemente noto come *Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph*.

Si procede dunque ad approfondire il metodo GIUH, che verrà adottato nelle analisi idrologiche successive. Questo approccio richiede come input una precipitazione teorica, derivata dalle Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP), opportunamente depurata dal parametro legato al tempo di ritorno. Questa caratteristica è essenziale, poiché consente di isolare la risposta idrologica del bacino dalle componenti probabilistiche legate alla frequenza degli eventi.

L'applicazione del metodo GIUH prevede quindi di variare iterativamente la durata dell'evento pluviometrico (derivato dalle LSPP) fino all'individuazione di quella che genera il massimo valore di portata al colmo all'uscita del bacino. Il corrispondente valore viene definito portata indice ( $q_{\text{indice}}$ ), e rappresenta la risposta massima del sistema in condizioni idrologicamente critiche. Si sottolinea che tale portata non è associata ad alcun tempo di ritorno, trattandosi di un valore determinato unicamente in funzione delle caratteristiche geomorfologiche e idrologiche del bacino.

Una volta determinata la portata indice, è possibile riprendere la relazione matematica iniziale che consente di stimare la portata al colmo ( $q_T$ ) associata a un prefissato tempo di ritorno, tramite l'applicazione di un opportuno fattore di crescita.

Con questo passaggio si completa la stima del valore di colmo per ciascun tempo di ritorno richiesto.

Resta infine da definire la forma dell'idrogramma di piena corrispondente, da costruire sulla base della portata al colmo appena ottenuta. Per una maggiore comprensione analitica, si supponga che la formulazione della curva LSPP adottata abbia la seguente forma:

$$h = w_T(a_1 d^n)$$

in cui:

- $a_1$  [mm/h<sup>n</sup>], rappresenta il coefficiente di scala delle LSPP;
- $n$  [-], rappresenta l'esponente di scala adimensionale con cui la variabilità del fenomeno si trasmette dalla scala di riferimento alle altre scale temporali;
- $w_T$  [-], il fattore di crescita che dipende dal tempo di ritorno.

Per la ricostruzione dell'idrogramma di piena associato al tempo di ritorno considerato, si assume che l'evento pluviometrico responsabile sia generato da un assetto meteorologico coerente con

la struttura di invarianza di scala tipica del contesto climatico locale, rappresentata dall'esponente  $n$  della LSPP.

Avendo già fissato il valore della portata al colmo  $q_T$ , il problema si traduce nella ricerca della coppia di parametri  $\{a_T^*, d_{cr}\}$  tale da riprodurre esattamente la portata  $q_T$  precedentemente stimata.

### 3.2.2.2 Analisi delle precipitazioni

La fase iniziale dello studio ha riguardato la definizione del regime pluviometrico di riferimento per l'area oggetto di analisi, mediante l'identificazione delle Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP).

Tale passaggio costituisce un elemento fondante dell'impostazione idrologica, in quanto consente di caratterizzare gli eventi di pioggia teorici necessari per la generazione delle portate in alveo attraverso modelli di trasformazione afflussi-deflussi.

Al fine di garantire l'allineamento con gli indirizzi più aggiornati in ambito idrologico, si è scelto di adottare le Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP) elaborate dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università di Genova, in collaborazione con ARPAL, e approvate con Decreto del Direttore Generale di ARPAL n. 77 del 10/05/2019.

Le Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica per le durate orarie e superiori sono state determinate utilizzando la forma monomia già citata, nell'ipotesi di modello probabilistico scala invariante:

$$h = w_T (a_1 d^n)$$

Si precisa che il coefficiente di scala ( $a_1$ ) e l'esponente di scala ( $n$ ) sono stati forniti dallo studio sotto forma di mappatura a copertura dell'intero territorio regionale ligure; ciò ha reso possibile l'elaborazione di un valore medio rappresentativo per ciascuno dei bacini in esame, ottenuto mediante mediazione spaziale dei due parametri.

Nella relazione del DICCA, il fattore di crescita ( $w_T$ ) è modellato tramite una distribuzione di tipo GEV (*Generalized Extreme Value*). Tuttavia, tale parametro non sarà considerato nelle analisi successive, in quanto – come già evidenziato nel capitolo precedente – la precipitazione di progetto viene depurata dal contributo associato al tempo di ritorno, coerentemente con l'impostazione metodologica adottata.

Sulla base delle mappature precedentemente citate, sono stati estratti i valori del coefficiente di scala e dell'esponente di scala per i bacini oggetto di studio. I parametri ottenuti sono riportati nella Tabella 3.

Corso d'Acqua	Sezione di chiusura	Coeff. Di Scala $a_1$	Esp. Di Scala $n$
Varatella	foce	32,53	0,45
Varatella	confluenza Barescione	33,35	0,46
Pattarello	confluenza Varatella	31,43	0,41
Barescione	confluenza Varatella	31,11	0,45

Tabella 3 - Coefficiente di scala ed esponente di scala secondo le mappe dello studio del DICCA.

### 3.2.2.3 Modello di perdita superficiale – CN-SCS

La stima delle perdite idrologiche e, conseguentemente, la determinazione della precipitazione efficace sono state condotte applicando il metodo del Curve Number (CN), sviluppato dal Soil Conservation Service (SCS, 1985). Tale approccio si basa sulla definizione di un parametro adimensionale CN, rappresentativo delle caratteristiche idrologiche del suolo e dell'uso del territorio.

Il Curve Number varia tipicamente tra 30 e 100: valori elevati sono indicativi di superfici con bassa permeabilità (es. aree urbanizzate o suoli compatti), mentre valori più bassi corrispondono a suoli con elevata capacità di infiltrazione. Il parametro CN è funzione di tre elementi principali: la copertura del suolo, la tipologia pedologica e le condizioni iniziali di umidità del terreno al momento dell'evento (*AMC – Antecedent Moisture Condition*).

La procedura prevede il calcolo iniziale del CN in condizioni medie di umidità (CNII, corrispondente ad AMC II). Tale valore può essere successivamente modificato, attraverso apposite formule, per tener conto di condizioni particolarmente secche (AMC I) o umide (AMC III), in funzione della pioggia cumulata nei cinque giorni antecedenti l'evento.

Nel caso specifico del bacino del Varatella, non è disponibile una mappatura del Curve Number (CN) a scala regionale. Pertanto, la valutazione è stata condotta utilizzando le uniche due cartografie tematiche accessibili tramite il Geoportale della Regione Liguria, ovvero la mappa litologica e quella dell'uso del suolo. Come noto, la combinazione sistematica di tali due informazioni consente di derivare una stima spazialmente distribuita del parametro CN, coerente con le condizioni idrologiche e morfologiche del territorio.

Si procede innanzitutto con l'analisi dell'**uso del suolo**, classificato secondo la nomenclatura CORINE Land Cover, adottata a livello europeo per la categorizzazione standardizzata del territorio.

Di seguito (Figura 33) si riporta la mappa dell'uso del suolo relativa all'area oggetto di studio, utile per la successiva assegnazione dei parametri idrologici, in particolare ai fini della stima del Curve Number.

Le classi di uso del suolo disponibili, derivate dal progetto CORINE Land Cover e dettagliate fino al livello 4 della classificazione, sono state opportunamente ricondotte al livello 3 della legenda, al fine di ridurre la frammentazione delle categorie e favorire la coerenza con le classi di uso del suolo definite dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti (USDA), utilizzate come riferimento per la stima del parametro CN.

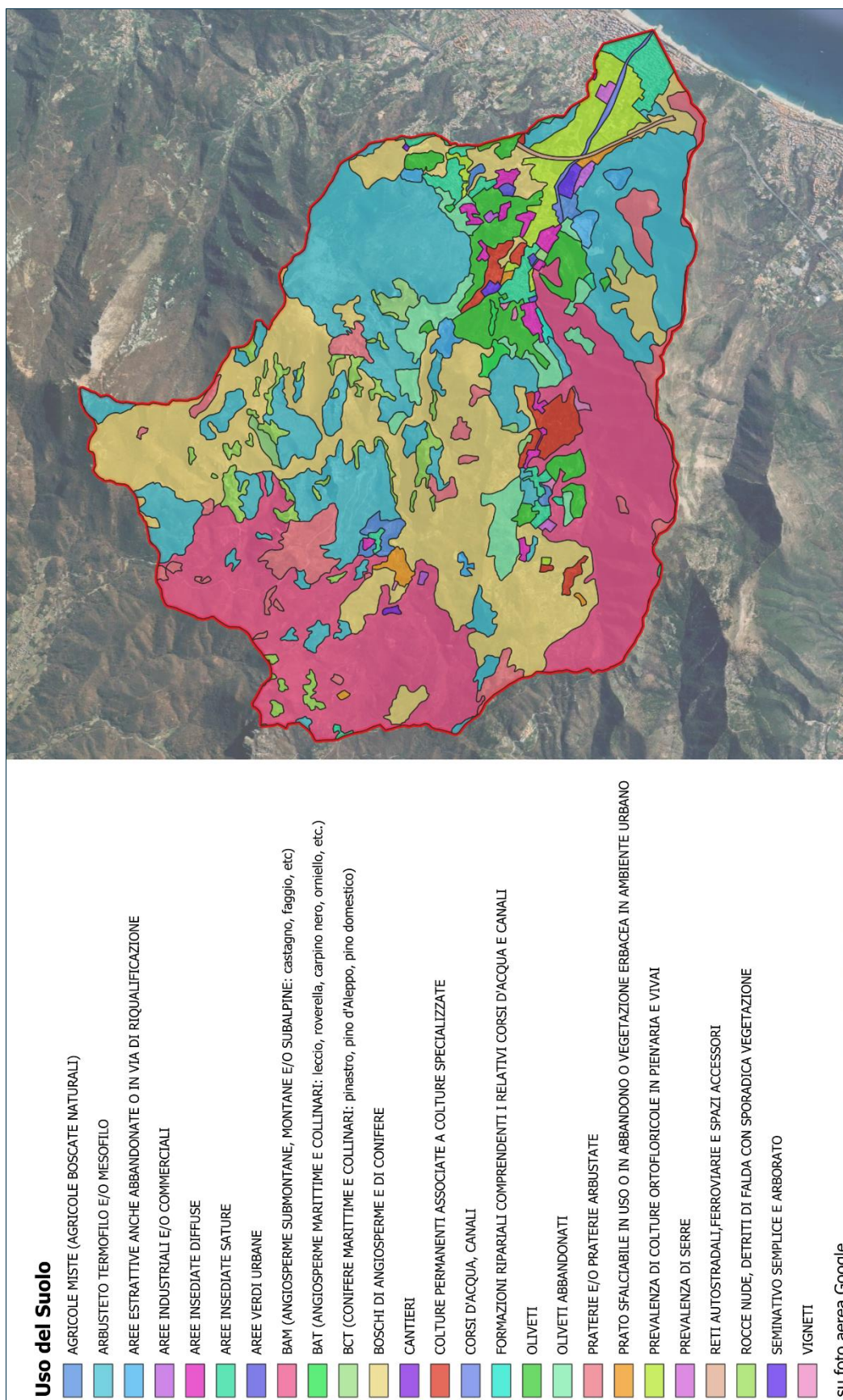


Figura 33 - Classificazione dell'uso del suolo, bacino complessivo del Varatella.

Particolare complessità ha riguardato la classificazione idrologica dei suoli, necessaria per l'attribuzione della tipologia di suolo secondo la classificazione USDA.

L'associazione tra le classi di uso del suolo individuate a partire dal progetto CORINE e le categorie di uso del suolo previste dal metodo SCS è stata effettuata mediante criteri di coerenza qualitativa, basati su associazione diretta e ragionata tra le caratteristiche d'uso e le corrispondenti condizioni di permeabilità.

Nel dettaglio, la classificazione USDA prevede la suddivisione dei suoli in quattro gruppi idrologici distinti, in funzione della loro capacità di infiltrazione, decrescente dal gruppo A al gruppo D. Tali gruppi rappresentano un riferimento standardizzato per la valutazione del deflusso superficiale e vengono comunemente impiegati nella determinazione del Curve Number.

Nel seguito si riportano le caratteristiche principali dei quattro gruppi idrologici definiti dal metodo USDA:

- A. suoli aventi scarsa potenzialità al deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla, ghiaie profonde molto permeabili. Capacità di infiltrazione molto elevata.
- B. suoli aventi moderata capacità di deflusso. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A e con maggior aliquota di argilla e limo. Elevate capacità di infiltrazione anche in condizione di saturazione.
- C. suoli aventi capacità di deflussi moderatamente alta. Suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e collodi. Scarsa capacità di infiltrazione.
- D. suoli con potenzialità di deflusso molto elevata. Argille con elevata capacità di rigonfiamento, suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie. Scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.

Il risultato finale dell'associazione tra le classi è riportato nella Tabella 4. Tale tabella sintetizza il processo di riclassificazione effettuato, fornendo un riferimento operativo per l'assegnazione del parametro Curve Number nelle analisi successive.

Codice CORINE	Classe uso del suolo CORINE	S.C.S Land Use Description	A	B	C	D
111	Tessuto urbano continuo	Urban districts (commercial and business)	89	92	94	95
112	Tessuto residenziale discontinuo	Residential districts by average lot size (1/8 acre or less)	77	85	90	92
121	Aree industriali o commerciali	Industrial districts	81	88	91	93
122	Reti stradali e ferroviarie	Paved streets and roads, curbs and storm drains	98	98	98	98
123	Porti	Paved, curbs and storm sewers	98	98	98	98
124	Aeroporti	Residential districts by average lot size (1/8 acre or less)	77	85	90	92
131	Aree estrattive	Herbaceous mixture of grass, weeds and low-growing brush (poor HC)	70	80	87	93
132	Discariche	Herbaceous mixture of grass, weeds and low-growing brush (poor HC)	70	80	87	93
133	Cantieri	Developing urban areas	77	86	91	94
134	Aree urbane abbandonate	Developing urban areas	77	86	91	94
141	Aree verdi urbane	Open space (poor HC)	68	79	86	89
142	Aree sportive, parchi	Open space (fair HC)	49	69	79	84
143	Cimiteri	Open space (poor HC)	68	79	86	89
211	Seminativi non irrigui	Small grain, Contoured & terraced (C & T) Poor	60	71	78	81

Codice CORINE	Classe uso del suolo CORINE	S.C.S Land Use Description	A	B	C	D
212	Seminativi irrigui	Close-seeded legumes or rotational meadows, Contoured & terraced (C & T) Poor	63	73	80	83
221	Vigneti	Row crops, Contoured & terraced (C & T) Poor	62	71	78	81
222	Frutteti	Woods-grass combination (fair HC)	43	65	76	82
223	Oliveti	Woods-grass combination (fair HC)	43	65	76	82
231	Prati stabili	Herbaceous mixture of grass, weeds and low-growing brush(good HC)	40	62	74	85
241	Colture annuali associate a colture permanenti	Woods-grass combination (poor HC)	57	73	82	86
242	Sistemi colturali complessi	Close-seeded legumes or rotational meadows (poor HC)	63	73	80	83
243	Colture agrarie prevalenti con spazi naturali	Woods-grass combination (fair HC)	43	65	76	82
244	Aree agroforestali	Woods-grass combination	43	65	76	82
311	Boschi caducifogli	Wood (good HC)	30	55	70	77
312	Boschi di conifere	Woods (poor HC)	45	66	77	83
313	Boschi misti	Brush-brush-weed-grass mixture (fair HC)	35	56	70	77
321	Pascoli e praterie	Open space (good HC)	39	61	74	80
322	Brughiere e cespuglieti	Pinyon, juniper or both with grass understory	35	58	73	80
323	Vegetazione a sclerofille	Sagebrush with grass understory	33	51	63	70
324	Vegetazione arbustiva e boschiva in evoluzione	Sagebrush with grass understory (fair HC)	33	51	63	70
331	Spiagge, sabbie, dune	Saltbush, greasewood, creosote-bush, black brush, bursage, paloverde, mesquite and cactus	49	68	79	84
332	Rocce nude	Artificial desert landscaping	96	96	96	96
333	Aree con vegetazione rada	Herbaceous mixture of grass, weeds and low-growing brush, with brush the minor element (Fair HC)	61	71	81	89
334	Aree percorse da incendi	Herbaceous mixture of grass, weeds and low-growing brush, with brush the minor element (Poor HC)	70	80	87	93
411	Paludi		98	98	98	98
412	Torbiere		98	98	98	98
511	Acqua		98	98	98	98
522	Estuari		98	98	98	98

Tabella 4 - Associazione delle classi determinate con il progetto CORINE e con il progetto S.C.S..

Si passa ora all'analisi della **litologia**, utilizzata come parametro sostitutivo delle informazioni pedologiche, in quanto non è attualmente disponibile, a livello regionale, una mappatura della permeabilità dei suoli. A tale scopo, è stata impiegata la carta litologica scaricata dal Geoportale della Regione Liguria, riportata di seguito come riferimento per la successiva classificazione idrologica dei suoli ai fini della stima del Curve Number.

Nel seguito è riportata la mappa litologica dell'area in esame, utilizzata come base per l'assegnazione.

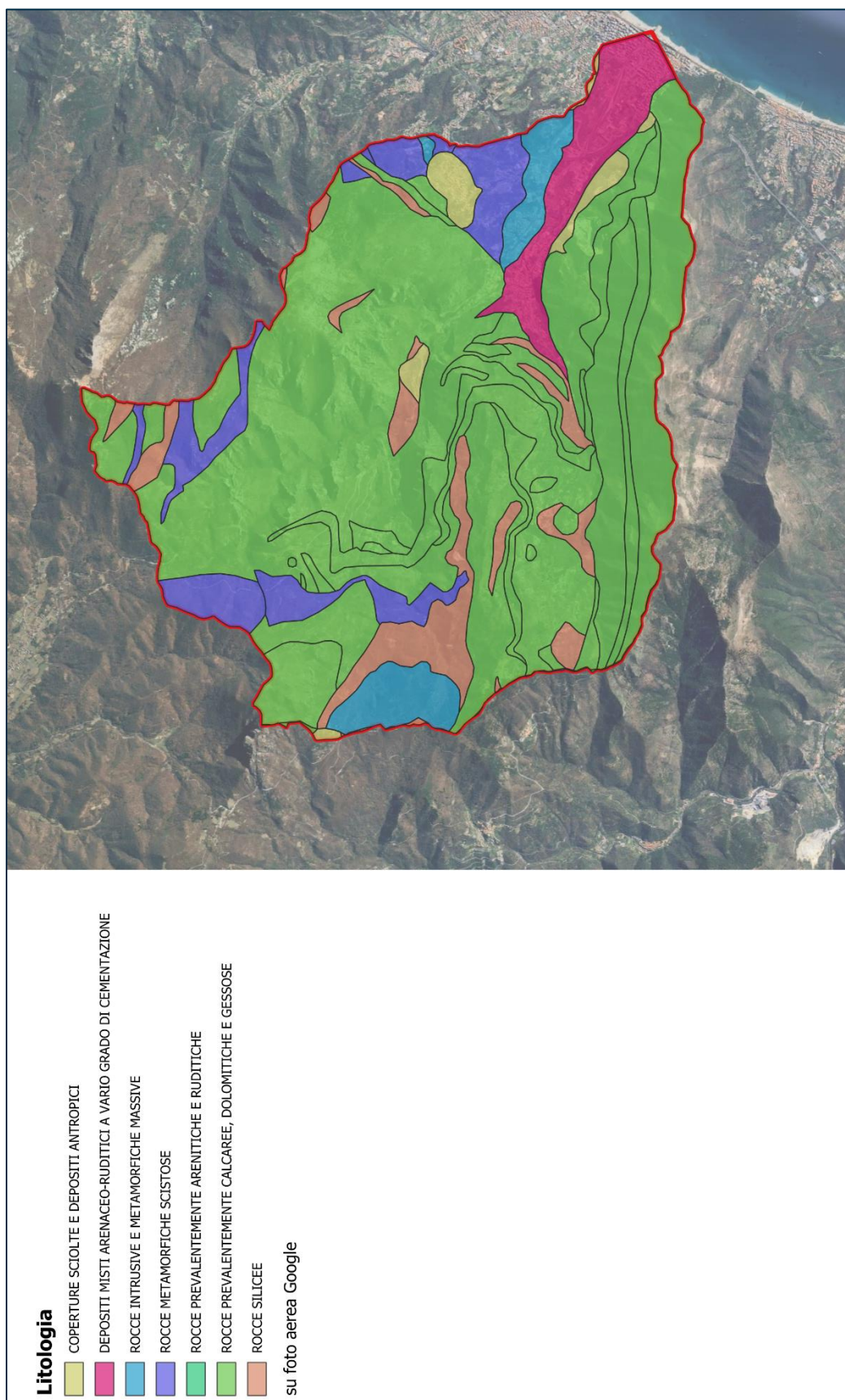


Figura 34 - Mappa della litologia, bacino complessivo del Varatella.

Infine, le diverse classi litologiche sono state associate a una specifica classe idrologica del suolo (A, B, C o D) secondo la classificazione SCS, al fine di consentire l'integrazione con le informazioni di uso del suolo.

Codice litologia	Descrizione litologia	Tipo idrologico di suolo
RA	ROCCE PREVALENTEMENTE ARENITICHE E RUDITICHE	B
dm	DEPOSITI MISTI ARENACEO-RUDITICI A VARIO GRADO DI CEMENTAZIONE	B
RC	ROCCE PREVALENTEMENTE CALCAREE DOLOMITICHE E GESSOSE	C
RI	ROCCE INTRUSIVE E METAMORFICHE MASSIVE	D
RMP	ROCCE MARNOSE MARNOSO-PELITICHE E PELITICHE	D
RCC	ROCCE COSTITUITE DA ALTERNANZE LITOLOGICHE O COMPLESSI CAOTICI	C
RMS	ROCCE METAMORFICHE SCISTOSE	C
cs	COPERTURE SCIOLTE E DEPOSITI ANTROPICI	A
RO	ROCCE OFIOLITICHE	D
L	LAGHI	D

Tabella 5 - Associazione delle classi litologiche con le classi idrologiche del progetto S.C.S..

A questo punto, la procedura può considerarsi sostanzialmente conclusa: l'integrazione tra le informazioni di uso del suolo e litologia consente infatti di attribuire, per ciascuna unità territoriale, il valore definitivo di Curve Number (CN). Tale valore rappresenta l'input idrologico necessario per l'applicazione del modello afflussi-deflussi, secondo la metodologia SCS-CN.

Si precisa che la procedura applicata consente di determinare il Curve Number (CN) in condizioni di umidità medie del suolo (AMC II). Tuttavia, ai fini dell'analisi idrologica di progetto, è necessario adattare il valore ottenuto alle condizioni di massima imbibizione del suolo (AMC III), in modo da considerare scenari più critici di saturazione e garantire una stima conservativa del deflusso generato. Per fare ciò è sufficiente applicare la seguente formula:

$$CN_{III} = \frac{23 \cdot CN_{II}}{10 + 0,13 \cdot CN_{II}}$$

La tabella che segue riporta i valori specifici di Curve Number (CN) ottenuti per ciascuno dei bacini oggetto di studio, risultanti dall'integrazione delle componenti di uso del suolo e litologia, secondo la procedura descritta. Questi valori costituiscono il riferimento operativo per l'implementazione del modello idrologico.

Corso d'Acqua	Sezione di chiusura	Curve Number CN (AMC II)	Curve Number CN (AMC III)
Varatella	foce	72,51	85,85
Varatella	confluenza Barescione	72,91	86,09
Pattarello	confluenza Varatella	62,99	79,65
Barescione	confluenza Varatella	73,33	86,35

Tabella 6 - Valori di Curve Number (CN) calcolati per i bacini in esame.

Una volta definito il valore del parametro Curve Number (CN) per il bacino in esame, è possibile stimare la pioggia efficace cumulata  $P_n$  generata durante un evento meteorico, in funzione della precipitazione lorda cumulata  $P$ , utilizzando la seguente formulazione del metodo SCS:

$$P_n = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

dove:

- $I_a$  è la perdita iniziale, ovvero il volume di precipitazione che non contribuisce al deflusso perché assorbito dal terreno prima dell'inizio dello scorrimento superficiale;
- $S$  rappresenta il massimo volume specifico di acqua trattenibile dal suolo in condizioni di saturazione.

Il valore di  $S$  è direttamente legato al parametro CN mediante la seguente relazione empirica:

$$S = 254 \cdot \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) [mm]$$

Questa formulazione consente di stimare in modo semplice ma efficace la quota di pioggia che si trasforma in deflusso superficiale, tenendo conto delle condizioni di umidità iniziali e della capacità di infiltrazione del suolo.

#### 3.2.2.4 Modello afflussi deflussi – Metodo GIUH

Si procede ora all'applicazione del modello afflussi-deflussi, il quale consente l'inserimento di un evento pluviometrico definito come input, al fine di determinare la portata al colmo generata in corrispondenza dell'evento.

La variazione della portata nel tempo, e quindi la costruzione dell'idrogramma, può essere modellata mediante un integrale di convoluzione, il quale viene approssimato tramite sommatorie discrete per ciascun intervallo temporale. In questo contesto, l'integrale di convoluzione rappresenta l'interazione tra l'input di pioggia efficace e la risposta impulsiva del bacino (funzione GIUH), consentendo di simulare la trasformazione dell'afflusso in deflusso in termini di portata.

L'idrogramma di piena  $q(t)$  si ottiene quindi come:

$$q(t) = A \cdot \int_0^t r(\tau) \cdot u(t - \tau) d\tau$$

dove:

- $A$  è l'area del bacino idrografico;
- $r(\tau)$  è il tasso di pioggia netta;
- $u(t-\tau)$  è la funzione di risposta del bacino idrografico.

L'integrale può essere risolto per sommatorie discrete.

Il tasso di pioggia netta rappresenta la porzione di precipitazione che contribuisce effettivamente al deflusso superficiale, una volta sottratte le perdite iniziali e i fenomeni di infiltrazione, intercettazione e ritenzione superficiale. Questo parametro è fondamentale per la costruzione dell'idrogramma di piena, poiché costituisce l'input reale del sistema bacino.

Invece, la funzione di risposta del bacino, secondo la formulazione proposta dal metodo IUH, rappresenta la risposta idrologica teorica del bacino a un input impulsivo di pioggia netta unitaria.

In altri termini, l'IUH descrive l'andamento temporale della portata generata da un millimetro di pioggia efficace concentrato in un intervallo di tempo infinitesimamente piccolo.

L'espressione analitica più comune è costituita dalla funzione di probabilità distribuita secondo la distribuzione Gamma a due parametri (Nash, 1957).

$$u(t) = \frac{1}{k \cdot \Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^{\beta-1} e^{-\frac{t}{k}}$$

dove:

- $\beta$  è un parametro di forma;
- $k$  è un parametro di scala;
- $\Gamma()$  è la funzione gamma.

A questo punto, è necessario procedere alla determinazione dei due parametri  $\beta$  e  $k$  della funzione IUH formulata secondo una distribuzione Gamma. Per fare ciò, si fa riferimento alla teoria geomorfologica dell'idrogramma unitario istantaneo (GIUH), che stabilisce una relazione tra i suddetti due parametri e le caratteristiche geomorfologiche del bacino idrografico, descritte secondo le leggi di Horton.

$$\beta = 3,29 \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,78} R_L^{0,07}$$

$$k = 0,7 \left(\frac{R_A}{R_B \cdot R_L}\right)^{0,48} \cdot \frac{3,6 \cdot L_\Omega}{v}$$

dove:

- $L_\Omega$  è la lunghezza dell'asta d'ordine massimo;
- $v$  è la velocità media spaziotemporale di propagazione dell'onda di piena;
- $R_B$ ,  $R_L$  e  $R_A$  sono i rapporti hortoniani di biforcazione, lunghezza e area drenata.

Tutte le grandezze necessarie alla determinazione dei parametri  $\beta$  e  $k$  della distribuzione Gamma, come previsto dalla formulazione GIUH, sono state ricavate in modo agevole mediante l'utilizzo di un software GIS. In particolare, l'analisi ha fatto riferimento alla digitalizzazione del reticolo idrografico disponibile sul Geoportale della Regione Liguria, che ha fornito una base cartografica ufficiale e dettagliata.

Per la stima della velocità media di propagazione dell'onda di piena, si è optato per un confronto tra due formulazioni alternative del tempo di lag. La prima proviene direttamente dal metodo GIUH, mentre la seconda, che è stata infine adottata come riferimento, è la formulazione di Bocchiola. Utilizzando la formula di Bocchiola come base di riferimento, è stata effettuata una sorta di "taratura" del parametro della velocità, in modo tale che la formulazione GIUH producesse lo stesso risultato, garantendo così una coerenza tra i due metodi.

Si riportano nel seguito le due formulazioni del tempo di lag.

$$t_{LAG} = 2,3 \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,3} R_L^{-0,4} \frac{L_\Omega}{v} \quad \text{[formulazione metodo GIUH]}$$

$$t_{LAG} = 0,26 \cdot L^{0,82} \cdot \theta^{-0,2} \cdot (1 + S)^{0,13} \quad \text{[formulazione di Bocchiola et al., 2003]}$$

A questo punto, disponendo di tutti i parametri necessari — dalla pioggia netta alla funzione di risposta del bacino, fino al tempo di lag e alla velocità media di propagazione — è possibile applicare la formula di calcolo della portata  $q(t)$  e avviare la procedura iterativa di variazione della durata dell'evento piovoso. Questo consente di individuare la durata critica ( $d_{cr}$ ), ossia quella che produce il valore massimo di portata all'uscita del bacino, già identificato col nome di portata indice ( $Q_{indice}$ ).

### 3.2.2.5 Risultati del metodo

Veniamo ora ai risultati ottenuti attraverso l'applicazione del metodo dell'evento critico, che rappresenta l'integrazione complessiva tra il modello CN-SCS per la stima della pioggia efficace e il metodo GIUH per la trasformazione afflussi-deflussi. Il primo risultato significativo di questa procedura è la determinazione della portata indice per ciascun bacino, ovvero la portata di piena associata alla durata critica dell'evento pluviometrico di progetto.

La seguente tabella propone i risultati ottenuti dalla metodologia applicata.

Corso d'Acqua	Sezione di chiusura	Durata critica $d_{cr}$ [h]	Pioggia locale P [mm]	Coeff. di ragguglio $\Psi$ [-]	Pioggia raggugliata $P_a$ [mm]	Pioggia netta raggugliata R [mm]	Portata indice $Q_{indice}$ [m <sup>3</sup> /s]
Varatella	foce	3,70	58,4	0,96	56,3	25,6	<b>90,81</b>
Varatella	confluenza Barescione	2,86	54,4	0,97	52,8	23,2	<b>55,99</b>
Pattarello	confluenza Varatella	1,38	35,9	0,99	35,7	5,9	<b>1,03</b>
Barescione	confluenza Varatella	2,49	46,8	0,98	45,8	18,3	<b>23,34</b>

Tabella 7 - Riepilogo dei valori calcolati.

Una volta definita la portata indice per ciascun sottobacino, è possibile determinare la portata associata a un tempo di ritorno assegnato moltiplicando tale valore per il fattore di crescita  $\chi_T$  relativo alla regione idrologicamente omogenea in cui ricade l'area di studio.

Nel nostro caso specifico, l'area di studio ricade all'interno della zona C, così come definita dalle regionalizzazioni idrologiche disponibili. La tabella che segue riporta i valori numerici del fattore di crescita per alcuni tempi di ritorno significativi, utilizzati per la trasformazione della portata indice in portata di progetto.

Tempo di Ritorno 10 anni	Tempo di Ritorno 50 anni	Tempo di Ritorno 100 anni	Tempo di Ritorno 200 anni	Tempo di Ritorno 500 anni
1,82	3,29	4,14	5,17	6,87

Tabella 8 - Fattore di crescita per la regione C.

Per concludere, si riportano nella tabella seguente i valori di portata al colmo calcolati in corrispondenza dei tempi di ritorno considerati (50, 200 e 500 anni), ottenuti moltiplicando la portata indice per il rispettivo fattore di crescita. Questi valori rappresentano le portate di progetto da assumere come riferimento nelle successive valutazioni idrauliche.

Corso d'Acqua	Sezione di chiusura	Tempo di Ritorno	Tempo di Ritorno	Tempo di Ritorno
		50 anni	200 anni	500 anni
Varatella	foce	299	469	624
Varatella	confluenza Barescione	184	289	385
Pattarello	confluenza Varatella	3	5	7
Barescione	confluenza Varatella	77	121	160

Tabella 9 - Portate di progetto calcolate secondo le linee guida del DGR n.357/2008.

### 3.2.3 Conclusioni e scelta della portata di riferimento

Per concludere, si riporta nella tabella seguente un confronto tra i valori di portata al colmo derivanti dal vigente Piano di Bacino e quelli ottenuti applicando le linee guida della DGR n.357/2008.

Corso d'Acqua	Sezione di chiusura	Tempo di Ritorno	Tempo di Ritorno	Tempo di Ritorno
		50 anni	200 anni	500 anni
Varatella	foce	<b>380</b>	<b>550</b>	<b>670</b>
		299	469	624
Varatella	confluenza Barescione	<b>220</b>	<b>310</b>	<b>380</b>
		184	289	385
Pattarello	confluenza Varatella	<b>12</b>	<b>17</b>	<b>20</b>
		3	5	7
Barescione	confluenza Varatella	<b>100</b>	<b>140</b>	<b>170</b>
		77	121	160

Tabella 10 - Confronto tra le portate al colmo del vigente PdB (riga superiore) e le portate al colmo stimate con le linee guida della DGR n.357/2008 (riga inferiore).

Sebbene le due stime presentino alcune discrepanze, queste risultano contenute entro un intervallo compatibile con l'incertezza tipica delle valutazioni idrologiche.

Nonostante ciò, **si è ritenuto opportuno mantenere come riferimento le portate già previste dal Piano di Bacino**, in quanto esse costituiscono il parametro di progetto finora adottato in modo sistematico, sia nella pianificazione che nella realizzazione degli interventi idraulici sul territorio.

L'adozione di valori più bassi, come quelli ottenuti dal modello applicato in questo studio, comporterebbe una riduzione dei colmi di piena di progetto che, sebbene formalmente coerente con la metodologia seguita, introdurrebbe un disallineamento rispetto agli standard utilizzati nei progetti pregressi e potenzialmente un abbassamento del margine di sicurezza. Per questi motivi, si è preferito non modificare il riferimento progettuale già consolidato.

Chiarita la scelta delle portate al colmo, si è proceduto alla costruzione degli idrogrammi di piena. Poiché il valore della portata al colmo  $q_T$  è stato fissato, il problema si è quindi ridotto alla determinazione della coppia di parametri  $\{a_T^*, d_{cr}\}$  in grado di riprodurre esattamente il valore di  $q_T$  precedentemente stimato.

Gli idrogrammi calcolati per i tre bacini idrografici sono riportati nelle seguenti figure.

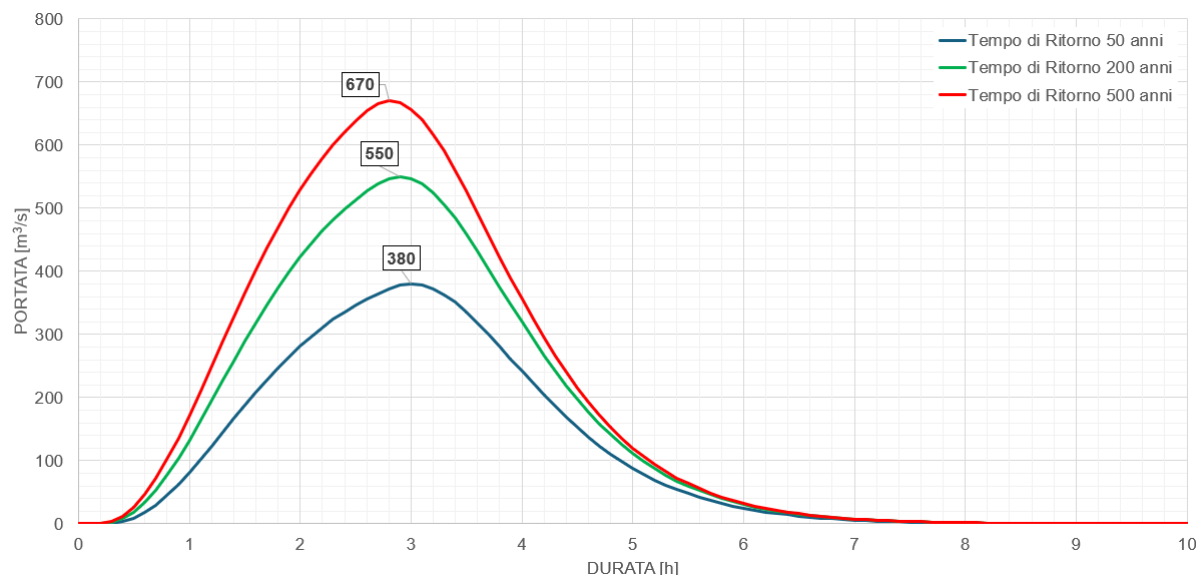


Figura 35 - Idrogrammi di progetto per il bacino idrografico del Varatella.

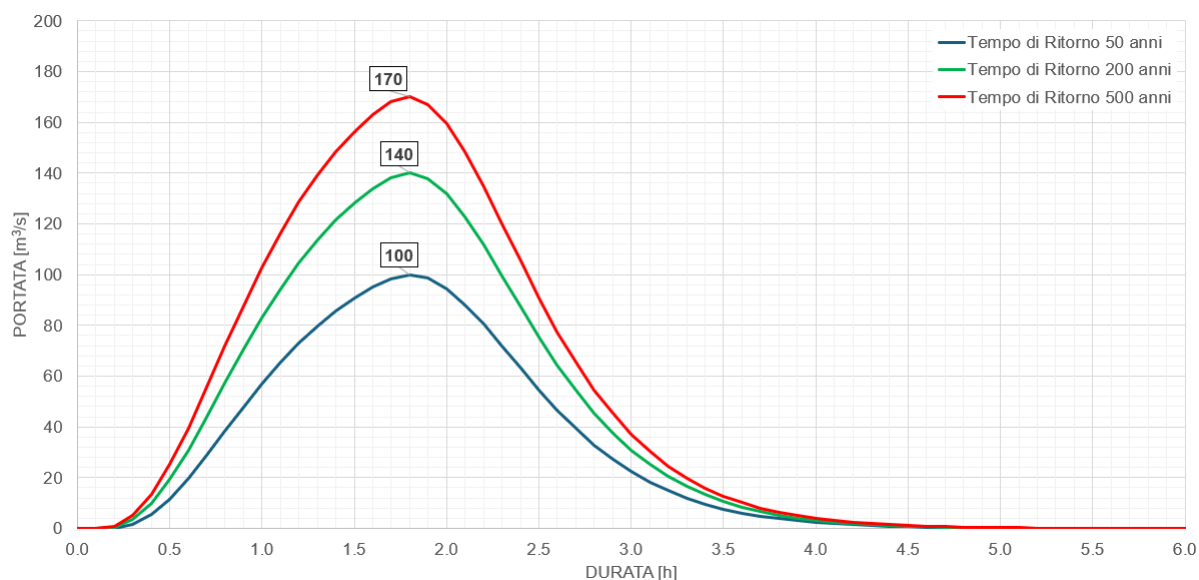


Figura 36 - Idrogrammi di progetto per il bacino idrografico del Barescione.

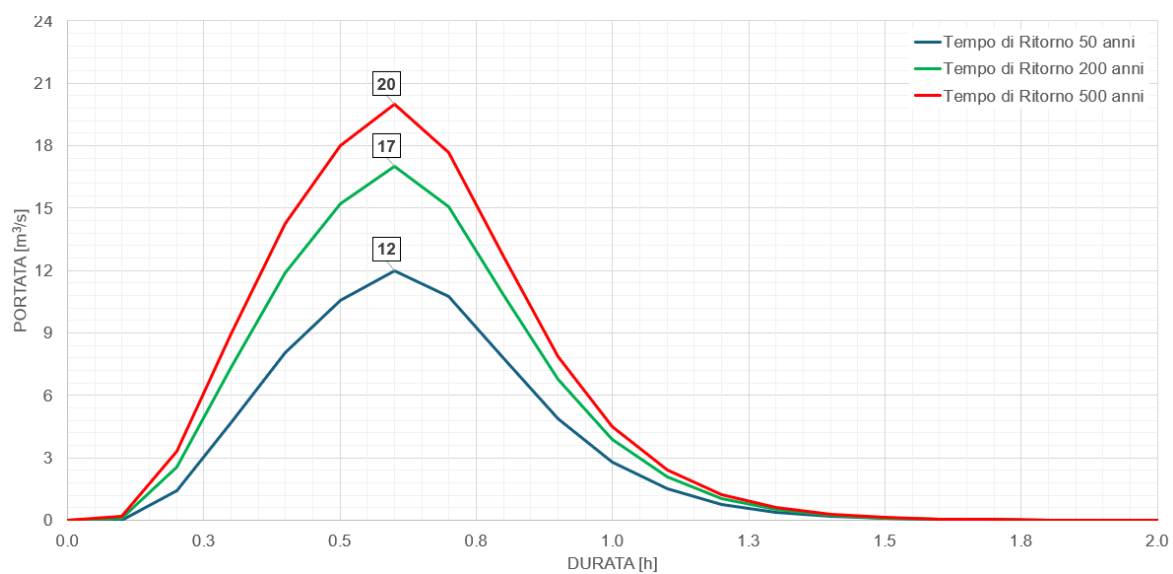


Figura 37 - Idrogrammi di progetto per il bacino idrografico del Pattarello.

## 4 Allestimento del modello numerico

Il modello idraulico è stato sviluppato attraverso l'integrazione di un modulo di modellazione monodimensionale, che permette di rappresentare con alta precisione i fenomeni idraulici lungo l'asse del corso d'acqua, e di un modulo bidimensionale, che consente di simulare con dettaglio i fenomeni di esondazione e la loro propagazione sul territorio circostante.

Tale approccio consente di ottenere una descrizione accurata e complementare: da un lato, il modulo monodimensionale fornisce una visione dettagliata della dinamica all'interno del corso d'acqua, mentre dall'altro, il modulo bidimensionale permette di analizzare in modo preciso l'interazione tra l'onda di piena e la morfologia del terreno, rendendo il modello particolarmente adatto per la simulazione di eventi di esondazione complessi.

In particolare, è stato impiegato il codice di calcolo MIKE + del DHI, che supporta l'approccio integrato tra la componente monodimensionale e quella bidimensionale.

Si rimanda all'ALLEGATO per un maggiore dettaglio.

### 4.1 Modulo monodimensionale

Per la configurazione del modulo monodimensionale, è fondamentale disporre di una conoscenza precisa delle geometrie dell'alveo inciso, al fine di garantire una rappresentazione accurata del corso d'acqua.

La necessità di ottenere una rappresentazione geometrica precisa delle sponde dell'alveo ha reso fondamentale l'elaborazione di un piano di indagini specifico, volto a garantire un rilievo topografico accurato dell'intero tratto oggetto di studio.

Si precisa che, sebbene il vigente Piano di Bacino comprenda una modellazione idraulica, questa è stata giudicata obsoleta o comunque non più adeguata, rendendo necessario un aggiornamento. Pertanto, le geometrie presenti nel Piano di Bacino non sono state utilizzate, e si è optato per l'esecuzione di un rilievo topografico completamente nuovo, al fine di garantire dati più aggiornati e accurati per la modellazione.

Le immagini che seguono (v. Figura 38, Figura 39 e Figura 40) presentano un estratto planimetrico dei tratti di corso d'acqua oggetto della modellazione, evidenziando le sezioni rilevate e integrate nel software di calcolo.

I tre corsi d'acqua sono stati schematizzati mediante un totale di 102 sezioni trasversali (67 nel Varatella, 23 nel Barescione, 12 nel Pattarello), delle quali la maggior parte derivano dal rilievo topografico. Alcune sezioni, invece, sono state inserite per interpolazione, con l'obiettivo di garantire una rappresentazione precisa delle discontinuità spondali, come nel caso dei muretti o degli argini frammentati.

Un elemento fondamentale nella modellazione monodimensionale è costituito dalla presenza di ponti e salti di fondo, che introducono perdite di carico. Per la rappresentazione dei ponti, è stata impiegata la schematizzazione di tipo *Culvert*, che tiene conto delle perdite di carico dovute all'ostruzione e all'influenza che tali strutture esercitano sul deflusso di piena. Per i salti di fondo, è stata invece adottata una schematizzazione di tipo *Weir*, che calcola la perdita di carico derivante dal salto idraulico subito dalla corrente nel passaggio.

I corsi d'acqua esaminati presentano una geometria complessa, caratterizzata da numerose interferenze; pertanto, è stato necessario includere 21 *Culvert* e 5 *Weir*. Inoltre, per ciascun ponte, è stato necessario posizionare una *Weir* nell'estradosso, al fine di considerare le eventuali possibilità di sormonto durante l'evento di piena.

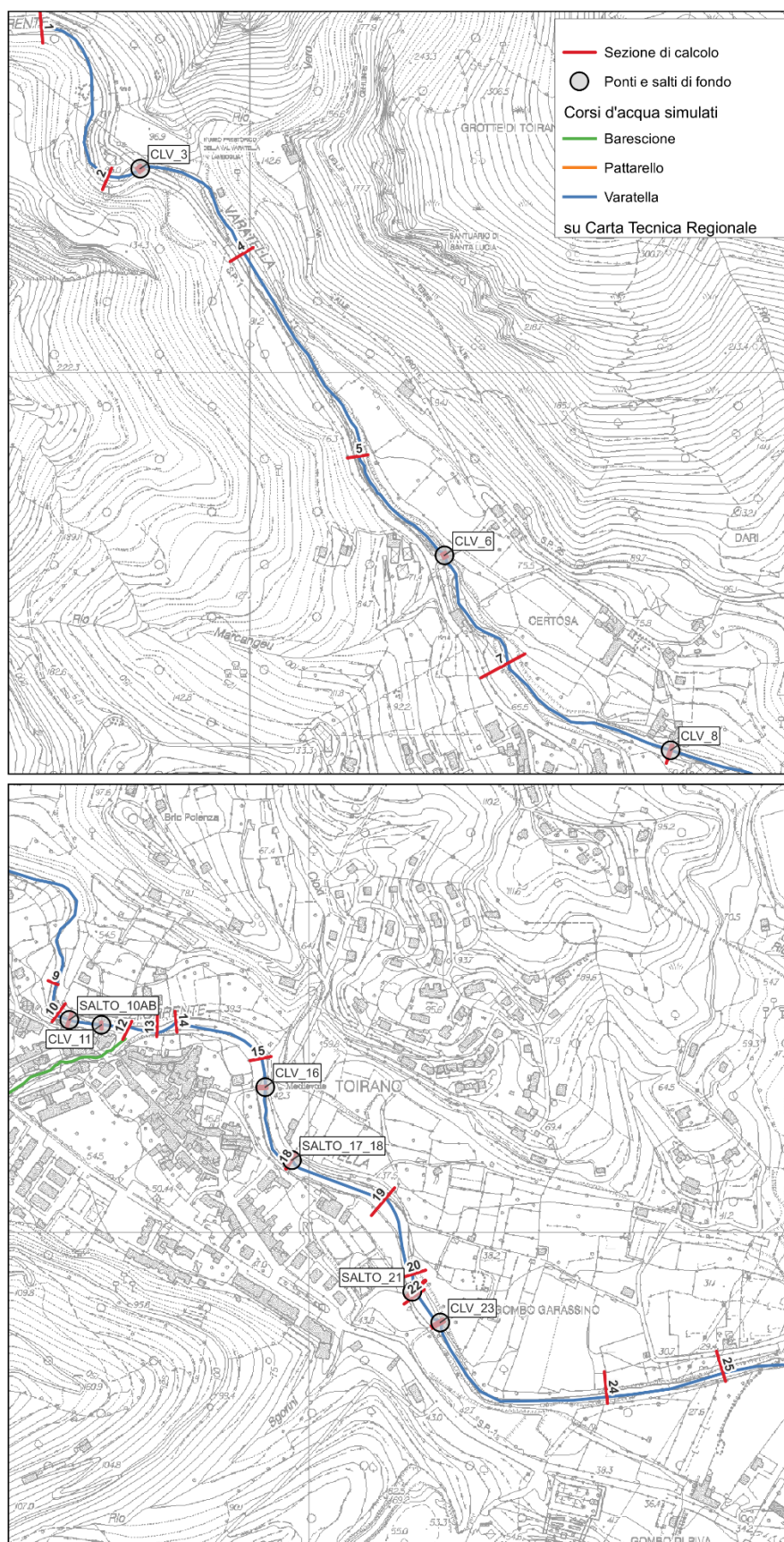


Figura 38 - Planimetria dei tratti simulati con il modello numerico. Indicazione dei ponti e dei salti idraulici inseriti. Varatella, zona monte.

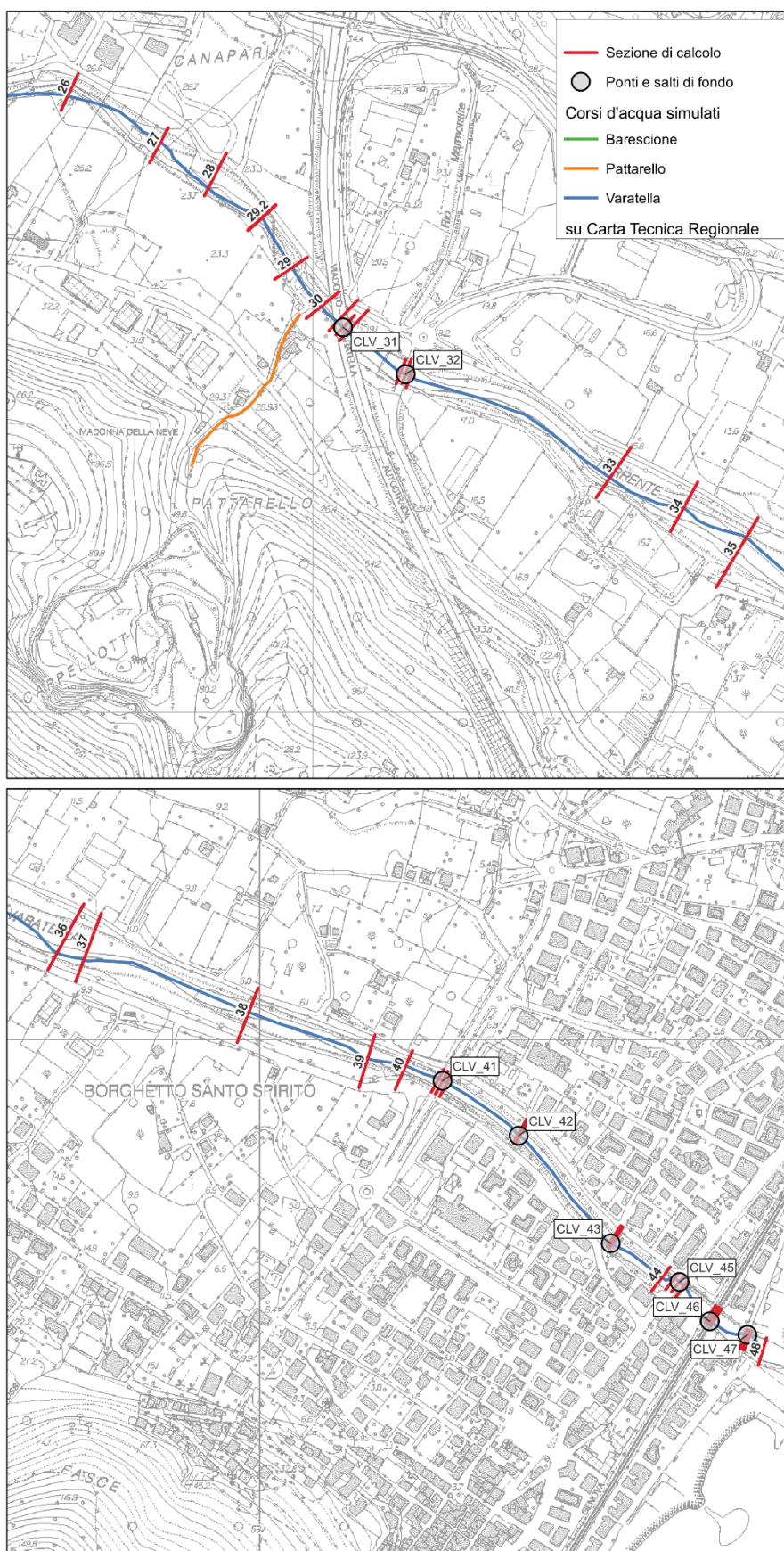


Figura 39 - Planimetria dei tratti simulati con il modello numerico. Indicazione dei ponti e dei salti idraulici inseriti. Varatella, zona valle.

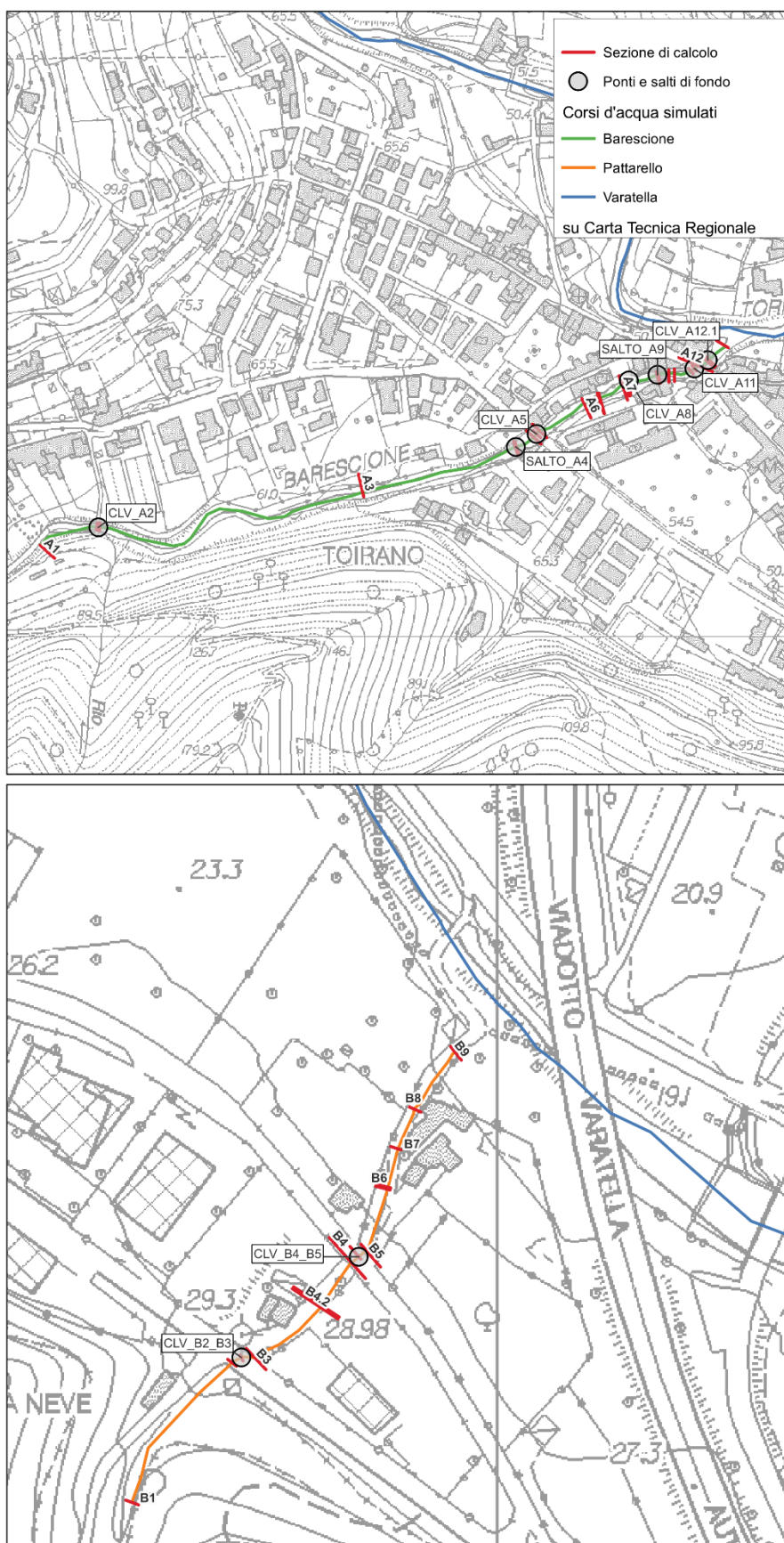


Figura 40 - Planimetria dei tratti simulati con il modello numerico. Indicazione dei ponti e dei salti idraulici inseriti. Barescione e Pattarello.

La tabella seguente riporta un'anagrafica completa delle sezioni di calcolo implementate nel modello, includendo, ove presenti, le quote di intradosso ed estradosso relative ai ponti. Si precisa inoltre che, per ciascun ponte o salto di fondo, è stato necessario definire una sezione a monte e una a valle, al fine di rappresentare correttamente le discontinuità idrauliche generate da tali opere.

Corso d'Acqua	ID Sezione	Progr. [m]	Quota di Fondo [m s.m.]	Quota di Sponda DX [m s.m.]	Quota di Sponda SX [m s.m.]	Quota Intradosso Manufatto [m s.m.]	Quota Estradosso Manufatto [m s.m.]	note
Barescione	A1	0,00	58,78	67,49	65,14			
Barescione	A2_m	54,86	57,52	62,52	62,56	62,03	62,54	CLV_A2
Barescione	A2_v	57,36	57,48	62,48	62,52			
Barescione	A3	312,93	53,85	57,18	55,75			
Barescione	A4	455,78	52,56	55,23	56,22			SALTO_A4
Barescione	A4_v	456,78	49,06	55,23	56,22			
Barescione	A5_m	474,69	48,43	55,98	55,98	54,50	56,48	CLV_A5
Barescione	A5_v	482,44	48,23	55,78	56,38			
Barescione	A6	529,80	46,31	57,53	53,42			
Barescione	A6.1	543,90	45,86	57,08	52,97			
Barescione	A6.2	544,90	45,76	52,27	52,87			
Barescione	A7	568,26	44,38	52,32	53,26			
Barescione	A8_m	574,83	43,90	52,47	52,91	53,12	54,4	CLV_A8
Barescione	A8_v	576,81	43,80	52,37	52,81			
Barescione	A9	601,91	44,02	55,01	54,02			SALTO_A9
Barescione	A9_v	602,91	41,28	55,01	54,02			
Barescione	A10	612,66	40,53	55,14	54,51			
Barescione	A10.1	617,71	40,18	54,79	48,91			
Barescione	A11	633,22	38,04	48,16	48,26	46,62	49,19	CLV_A11
Barescione	A12	641,06	38,17	48,22	48,37			
Barescione	A12.1_m	651,11	37,95	41,26	43,39	41,74	43,3	CLV_A12.1
Barescione	A12.1_v	652,81	37,85	41,16	43,29			
Barescione	A13	672,46	37,54	42,55	41,02			
Pattarello	A1	0,00	36,22	39,88	40,02			
Pattarello	B2	78,22	26,45	28,34	28,33	27,64	28,34	CLV_B2_B3
Pattarello	B3	88,89	25,64	28,25	28,23			
Pattarello	B4.2	126,13	23,45	25,22	26,18			
Pattarello	B4.1	127,13	23,40	26,17	26,13			
Pattarello	B4	150,13	23,00	25,77	25,73	24,08	25,77	CLV_B4_B5
Pattarello	B5	158,73	22,84	24,77	24,77			
Pattarello	B6	187,46	21,84	23,70	24,97			
Pattarello	B6.1	188,46	21,74	23,60	23,60			
Pattarello	B7	205,99	20,58	23,01	23,10			
Pattarello	B8	225,07	20,39	22,66	22,42			
Pattarello	B9	256,36	19,41	21,57	21,66			
Varatella	1	0,00	98,11	109,16	104,27			
Varatella	2	253,36	89,81	93,65	97,19			

Corso d'Acqua	ID Sezione	Progr. [m]	Quota di Fondo [m s.m.]	Quota di Sponda DX [m s.m.]	Quota di Sponda SX [m s.m.]	Quota Intradosso Manufatto [m s.m.]	Quota Estradosso Manufatto [m s.m.]	note
Varatella	3_m	295,54	87,46	92,15	92,15	91,94	93,8	CLV_3
Varatella	3_v	302,27	87,01	91,70	91,70			
Varatella	4	498,65	80,39	86,06	84,36			
Varatella	5	817,01	70,07	73,21	75,11			
Varatella	6_m	994,05	60,97	71,15	71,15	70,89	72,88	CLV_6
Varatella	6_v	1.000,24	60,67	70,85	70,85			
Varatella	7	1.176,30	53,01	60,54	66,70			
Varatella	8_m	1.433,04	44,10	51,65	51,65	51,52	53,08	CLV_8
Varatella	8_v	1.435,54	44,00	51,55	51,55			
Varatella	9	1.698,10	40,15	42,22	42,22			
Varatella	10	1.741,32	39,46	46,01	51,72			
Varatella	10A	1.758,53	40,59	43,38	50,98			SALTO_10AB
Varatella	10B	1.759,53	38,28	43,39	50,98			
Varatella	11_m	1.801,93	37,77	42,42	42,42	42,15	42,87	CLV_11
Varatella	11_v	1.803,40	37,73	42,38	42,38			
Varatella	12	1.840,06	37,07	42,31	37,59			Immissione Barescione
Varatella	13	1.878,24	37,00	39,59	39,65			
Varatella	14	1.907,69	36,39	39,42	40,22			
Varatella	15	2.035,90	35,43	37,97	37,41			
Varatella	16_m	2.073,09	34,62	42,00	37,33	41,21	42,88	CLV_16
Varatella	16_v	2.076,33	34,58	41,96	37,29			
Varatella	17	2.190,39	34,51	37,09	36,01			SALTO_17_18
Varatella	18	2.191,07	33,05	37,08	36,00			
Varatella	19	2.328,58	31,66	36,55	34,88			
Varatella	20	2.438,33	30,92	32,39	33,85			
Varatella	21	2.461,90	30,45	34,21	34,03			SALTO_21
Varatella	21_v	2.462,90	29,33	34,21	34,03			
Varatella	22	2.470,53	29,04	33,24	33,02			
Varatella	23_m	2.518,26	27,96	34,05	34,05	33,92	36,05	CLV_23
Varatella	23_v	2.522,26	27,86	33,95	33,95			
Varatella	24	2.801,10	24,25	28,54	27,85			
Varatella	25	2.960,29	21,94	28,07	26,33			
Varatella	26	3.081,21	21,43	25,92	24,99			
Varatella	27	3.221,76	19,81	24,01	23,29			
Varatella	28	3.311,25	17,88	23,09	23,46			
Varatella	29.2	3.389,65	18,09	21,69	23,76			
Varatella	29.1	3.390,65	14,29	19,02	19,96			
Varatella	29	3.466,83	16,19	20,92	21,02			
Varatella	30	3.531,79	16,07	20,09	18,98			Immissione Pattarello
Varatella	31_m	3.565,58	15,86	20,89	20,31	23,54	26,55	CLV_31
Varatella	31_v	3.584,78	15,66	20,69	20,11			

Corso d'Acqua	ID Sezione	Progr. [m]	Quota di Fondo [m s.m.]	Quota di Sponda DX [m s.m.]	Quota di Sponda SX [m s.m.]	Quota Intradosso Manufatto [m s.m.]	Quota Estradosso Manufatto [m s.m.]	note
Varatella	32_m	3.674,35	15,48	19,23	19,23	19,18	21,73	CLV_32
Varatella	32_v	3.688,50	15,38	19,13	19,13			
Varatella	33	3.990,32	9,35	17,56	18,40			
Varatella	34	4.097,80	9,08	17,26	15,55			
Varatella	35	4.191,64	8,51	15,81	15,08			
Varatella	36	4.387,00	6,76	12,42	11,72			
Varatella	37	4.423,74	6,41	12,31	10,55			
Varatella	38	4.657,14	4,93	8,66	8,01			
Varatella	39	4.827,70	3,56	6,79	6,42			
Varatella	40	4.879,51	3,41	6,05	6,76			
Varatella	41_m	4.926,74	2,95	5,86	5,57	8,31	10,65	CLV_41
Varatella	41_v	4.939,20	2,85	5,76	5,47			
Varatella	42_m	5.057,05	2,27	5,48	5,63	6,91	7,76	CLV_42
Varatella	42_v	5.059,55	2,25	5,46	5,61			
Varatella	43_m	5.246,10	0,81	5,13	5,13	6,05	6,64	CLV_43
Varatella	43_v	5.249,60	0,79	5,13	5,13			
Varatella	44	5.329,97	0,47	5,09	5,12			
Varatella	45_m	5.349,44	0,52	5,91	5,91	4,31	5,89	CLV_45
Varatella	45_v	5.366,44	0,32	5,87	5,87			
Varatella	46_m	5.420,75	0,22	3,74	3,74	3,69	5,62	CLV_46
Varatella	46_v	5.429,75	0,14	3,66	3,66			
Varatella	47_m	5.477,11	0,11	2,74	4,24	2,72	4,18	CLV_47
Varatella	47_v	5.483,41	0,07	1,5	2,7			
Varatella	48	5.513,00	0,17	1,23	2,63			

Tabella 11 - Anagrafica delle sezioni inserite nel modello numerico.

## 4.2 Modulo bidimensionale

Il modello idraulico adottato integra un modulo bidimensionale specificamente dedicato alla simulazione delle esondazioni che si verificano al di fuori dell'alveo inciso. Per poter rappresentare in modo efficace questi fenomeni, è stato necessario definire un'area esterna di esondazione da includere nel dominio di calcolo.

A tal fine si è fatto riferimento al modello digitale del terreno (DTM) messo a disposizione dal geoportale della Regione Liguria. Il DTM originario, caratterizzato da una risoluzione spaziale di 1x1 metro, è stato sottoposto a una procedura di ricampionamento e reinterpolazione per ottenere una griglia con celle da 2x2 metri (1830 righe e 2790 colonne).

Questa scelta deriva da un bilanciamento tra due esigenze contrastanti: da un lato, garantire un buon livello di dettaglio nella rappresentazione della morfologia del territorio; dall'altro, assicurare che il modello risultante sia effettivamente gestibile dal punto di vista computazionale. Infatti, una griglia con celle troppo piccole aumenterebbe la risoluzione ma renderebbe il file e le simulazioni difficilmente sostenibili in termini di risorse di calcolo. Al contrario, celle troppo grandi comporterebbero una perdita di dettaglio nei risultati. La risoluzione adottata rappresenta quindi un compromesso ottimale tra accuratezza e efficienza numerica.

La batimetria ottenuta a seguito del ricampionamento del DTM è stata ulteriormente sottoposta a una fase di verifica manuale, con l'obiettivo di garantire un'adeguata rappresentazione morfologica delle aree immediatamente adiacenti al corpo idrico. Tale controllo si è reso necessario in quanto un modello digitale del terreno, per sua natura, non è in grado di restituire con precisione elementi di piccola scala come muretti, modeste arginature spondali o altre discontinuità localizzate, che possono risultare sfumate o del tutto assenti nella griglia interpolata.

Per colmare tali lacune e assicurare una coerenza geometrica tra alveo e aree esterne, sono state confrontate le sezioni topografiche rilevate in campo con le quote derivate dal DTM, verificando che la transizione morfologica tra le sezioni e il terreno fosse omogenea e priva di discontinuità.

A seguito di questa fase di controllo e correzione, è stata definita la batimetria finale, integrata e corretta, che è stata successivamente adottata per la simulazione idraulica del modello bidimensionale. La seguente Figura 41 riporta il risultato ottenuto.

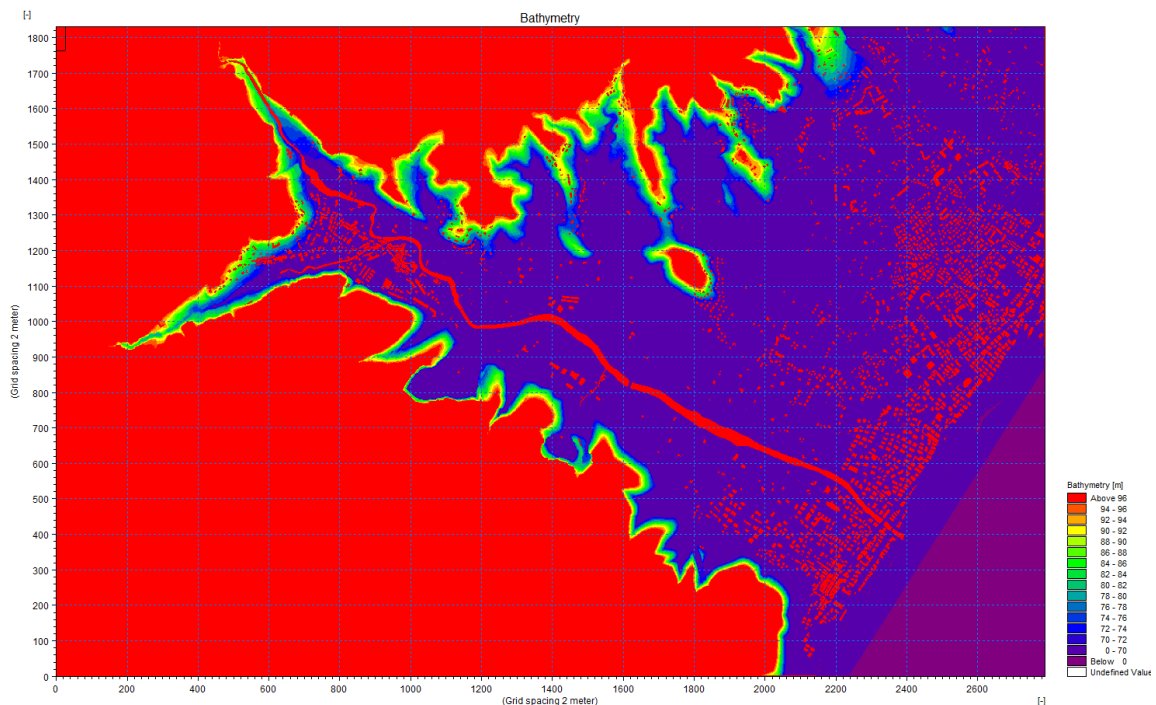


Figura 41 - Batimetria del modello 2D a maglia 2,0 x 2,0 m (dominio di calcolo complessivo).

### 4.3 Parametri e condizioni al contorno del modello

Il modello di simulazione, oltre alla descrizione geometrica, necessita della definizione delle condizioni al contorno idrodinamiche e di una serie di parametri quali: passo temporale di integrazione del sistema, coefficiente di resistenza distribuita (scabrezza) e coefficiente di viscosità turbolenta ("eddy viscosity").

La scabrezza rappresenta, all'interno delle equazioni di moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito sul fondo di scorrimento e sulle sponde dei canali di deflusso. In particolare, la scabrezza applicata ai modelli è stata differenziata tra alveo inciso (e quindi modellazione monodimensionale) e aree golenali (modellazione bidimensionale).

I sopralluoghi effettuati sull'asta del corso d'acqua e gli studi pregressi hanno fornito gli elementi necessari per la definizione dei valori di scabrezza da associare al tratto oggetto di studio. Tali valori sono stati definiti considerando in primis le Norme di Attuazione (NTA) del vigente Piano di

Bacino, e successivamente, come riscontro, valori tipici di riferimento riscontrabili in letteratura tecnica.

Corpo idrico [-]	Scabrezza di Gauckler Strickler adottata [m <sup>1/3</sup> s <sup>-1</sup> ]
Varatella	30
Barescione	30
Pattarello	20

Tabella 12 - Valori di scabrezza adottati nel modulo monodimensionale per i corpi idrici simulati.

Nell'area esterna al dominio monodimensionale, modellata tramite il modulo bidimensionale, è stata adottata una distribuzione spazialmente variabile della scabrezza, al fine di rappresentare con maggiore realismo le eterogeneità del territorio. In particolare, si è assegnato un valore di scabrezza  $K_s$  di Gauckler-Strickler pari a 40 m<sup>1/3</sup>s<sup>-1</sup> nelle zone urbanizzate e un valore pari a 30 m<sup>1/3</sup>s<sup>-1</sup> nelle aree naturali o meno antropizzate.

Come passo temporale di integrazione è stato necessario utilizzare, per ragioni di stabilità numerica legate al numero di Courant della corrente, un valore pari a 0,2 secondi.

La viscosità turbolenta è legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità e viene simulata nel modello tramite il coefficiente di eddy viscosity. A tale coefficiente è stato assegnato un valore costante pari a 0,5 m<sup>2</sup>/s sull'intera estensione del modello; tale parametro risulta comunque di minore rilevanza in quanto simulando deflussi di esondazione con scorrimento superficiale gli aspetti legati alla formazione di vortici sono senza dubbio trascurabili rispetto ai prevalenti termini di resistenza idraulica al moto per attrito sul fondo e presenza di ostacoli.

Le condizioni al contorno del modello prevedono, a monte, l'imposizione di idrogrammi di portata, mentre a valle sono state adottate differenti condizioni in funzione del corso d'acqua considerato: per il Varatella è stato imposto un livello idrico pari alla quota del mare, mentre per il Barescione e il Pattarello il livello di valle è stato assunto pari a quello risultante nel Varatella in corrispondenza della confluenza.

Gli idrogrammi di monte relativi ai bacini del Barescione e del Pattarello coincidono con quelli già illustrati nel paragrafo 3.2.3 e riportati in Figura 36 e Figura 37. Sebbene gli idrogrammi siano stati originariamente calcolati in corrispondenza delle sezioni di chiusura dei due tratti idrici, si è ritenuto plausibile applicarli direttamente all'imbocco del tratto simulato, assumendo che potessero essere traslati rigidamente verso monte senza alterarne significativamente le caratteristiche idrauliche.

Per quanto riguarda il Varatella, l'assunzione di traslare rigidamente l'idrogramma verso monte non è stata ritenuta idraulicamente appropriata. Si è quindi proceduto al calcolo di una nuova portata al colmo specifica per la sezione di imbocco del tratto simulato, ottenuta mediante un criterio proporzionale basato sulle superfici sottese. A partire da tale valore, è stato costruito un idrogramma distribuito da applicare lungo l'intero tratto di modellazione, calibrato in modo tale che la portata risultante alla sezione di valle fosse perfettamente coerente con l'idrogramma precedentemente stimato nel paragrafo 3.2.3 e rappresentato nella Figura 35.

## 5 Risultati delle simulazioni

I risultati delle simulazioni effettuate con il modello integrato mono-bidimensionale sono illustrati nei capitoli seguenti mediante l'ausilio di rappresentazioni grafiche esplicative quali:

- mappe delle aree di esondazione con rappresentazione delle altezze idriche massime sul piano campagna e delle massime velocità di flusso;
- profili longitudinali di inviluppo dei massimi livelli idrici lungo l'alveo inciso.

I valori numerici dei principali parametri idrodinamici caratterizzanti i valori massimi di inviluppo del profilo di piena sono indicati di seguito e riportati in specifiche tabelle:

- ID Fiume = identificativo asta;
- ID Sez. = identificativo sezione;
- Progr. = progressiva metrica lungo l'asta (m);
- Q = portata massima ( $m^3/s$ );
- P.L. = quota di pelo libero (m s.m.);
- h = altezza d'acqua sul fondo (m);
- v = velocità media della corrente (m/s);
- Fr = numero di Froude della corrente (-);
- H = carico idraulico totale (m s.m.).

Non sono restituiti i risultati sulle sezioni interpolate che sono state introdotte unicamente per migliorare l'integrazione delle equazioni del moto ottimizzando il passo spaziale. Inoltre, i parametri idraulici non sono definiti in corrispondenza delle strutture inserite all'interno del modello (gli attraversamenti); per queste si fa riferimento alla sezione immediatamente a monte (ad esempio per la valutazione del franco idraulico).

I risultati di seguito esposti fanno riferimento alle simulazioni associate agli idrogrammi di piena di riferimento nell'ipotesi di evento con massimo valore delle portate al colmo.

### 5.1 Profili di corrente in alveo

#### 5.1.1 Evento di piena cinquantennale (TR50)

Nella seguente Tabella 13 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso dei tre corsi d'acqua esaminati (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 50 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi.

Di seguito sono riportate le immagini dei profili idraulici estratti dal modello numerico monodimensionale, nelle quali sono evidenziati i tiranti idrici massimi e le portate di piena corrispondenti.

Per garantire un livello di dettaglio adeguato lungo l'intero sviluppo del corso d'acqua, si è reso necessario suddividere la rappresentazione in più immagini successive.

ID Fiume	ID Sez.	Progr. [m]	Q [m³/s]	P.L. [m s.m.]	h [m]	v [m/s]	Fr [-]	H [m s.m.]
Barescione	A1	0,00	99,72	61,99	3,21	3,58	0,72	62,65
Barescione	A2_m	54,86	99,68	61,67	4,15	3,97	0,65	62,47
Barescione	A2_v	57,36	99,67	60,54	3,06	5,52	1,06	62,10
Barescione	A3	312,93	99,54	56,32	2,47	4,13	0,92	57,18
Barescione	A4	455,78	99,43	55,19	2,63	3,49	0,73	55,82
Barescione	A4_v	456,78	99,41	51,39	2,33	4,05	0,90	52,22
Barescione	A5_m	474,69	99,41	51,22	2,79	3,98	0,77	52,03
Barescione	A5_v	482,44	99,41	49,93	1,70	6,67	1,68	52,20
Barescione	A6	529,80	99,43	48,14	1,83	6,14	1,46	50,06
Barescione	A6.1	543,90	99,44	47,72	1,86	6,04	1,43	49,58
Barescione	A6.2	544,90	99,44	47,69	1,93	5,81	1,35	49,41
Barescione	A7	568,26	99,45	47,11	2,73	3,09	0,64	47,59
Barescione	A8_m	574,83	99,46	47,15	3,25	2,53	0,50	47,48
Barescione	A8_v	576,81	99,47	47,15	3,35	2,45	0,47	47,45
Barescione	A9	601,91	99,48	46,98	2,96	3,73	0,72	47,69
Barescione	A9_v	602,91	99,49	42,82	1,54	6,97	1,83	45,30
Barescione	A10	612,66	99,49	42,39	1,86	5,79	1,42	44,10
Barescione	A10.1	617,71	99,49	42,26	2,08	5,12	1,19	43,59
Barescione	A11	633,22	99,50	41,98	3,94	4,44	0,74	42,98
Barescione	A12	641,06	99,51	41,75	3,58	4,76	0,84	42,91
Barescione	A12.1_m	651,11	99,51	41,63	3,68	3,07	0,58	42,11
Barescione	A12.1_v	652,81	99,52	41,26	3,41	3,38	0,67	41,85
Barescione	A13	672,46	99,51	41,12	3,58	3,91	0,75	41,90
Pattarello	A1	0,00	11,80	37,17	0,95	5,12	1,95	38,51
Pattarello	B2	78,22	11,83	28,37	1,92	2,24	0,53	28,62
Pattarello	B3	88,89	11,85	26,58	0,94	5,33	2,04	28,03
Pattarello	B4.2	126,13	11,87	24,21	0,76	2,56	1,04	24,55
Pattarello	B4.1	127,13	11,87	24,19	0,79	2,43	0,96	24,50
Pattarello	B4	150,13	11,90	23,89	0,89	2,12	0,78	24,12
Pattarello	B5	158,73	11,90	23,46	0,62	3,11	1,38	23,96
Pattarello	B6	187,46	11,94	22,50	0,66	4,08	1,71	23,35
Pattarello	B6.1	188,46	11,93	22,45	0,71	3,75	1,51	23,17
Pattarello	B7	205,99	11,92	21,83	1,25	3,56	1,16	22,48
Pattarello	B8	225,07	11,95	21,31	0,92	4,07	1,51	22,16
Pattarello	B9	256,36	12,02	20,11	0,70	3,46	1,50	20,73
Varatella	1	0,00	193,34	101,39	3,28	7,34	1,78	104,13
Varatella	2	253,36	196,63	94,22	4,41	4,27	0,79	95,15
Varatella	3_m	295,54	193,20	93,95	6,49	4,30	0,57	94,90
Varatella	3_v	302,27	185,67	90,51	3,50	8,40	1,57	94,11
Varatella	4	498,65	200,96	82,77	2,38	7,21	1,75	85,42
Varatella	5	817,01	208,24	72,38	2,31	7,21	1,65	75,04
Varatella	6_m	994,05	211,77	67,88	6,91	6,19	0,81	69,83
Varatella	6_v	1.000,24	212,73	64,88	4,21	10,65	1,73	70,66
Varatella	7	1.176,30	215,46	54,79	1,78	12,44	3,17	62,67

ID Fiume	ID Sez.	Progr. [m]	Q [m³/s]	P.L. [m s.m.]	h [m]	v [m/s]	Fr [-]	H [m s.m.]
Varatella	8_m	1.433,04	220,71	49,32	5,22	3,18	0,53	49,84
Varatella	8_v	1.435,54	221,59	47,82	3,82	5,20	1,11	49,20
Varatella	9	1.698,10	197,99	44,51	4,36	5,32	0,88	45,96
Varatella	10	1.741,32	227,07	44,17	4,71	3,91	0,74	44,95
Varatella	10A	1.758,53	227,65	44,05	3,46	4,10	0,73	44,90
Varatella	10B	1.759,53	225,73	42,59	4,31	3,50	0,58	43,21
Varatella	11_m	1.801,93	226,14	42,43	4,66	5,22	0,78	43,82
Varatella	11_v	1.803,40	226,57	41,64	3,91	6,27	1,03	43,64
Varatella	12	1.840,06	227,10	41,12	4,05	2,62	0,47	41,47
Varatella	13	1.878,24	307,95	40,84	3,84	4,64	0,83	41,93
Varatella	14	1.907,69	297,56	40,64	4,25	5,15	0,88	41,99
Varatella	15	2.035,90	288,91	40,15	4,72	3,16	0,51	40,66
Varatella	16_m	2.073,09	274,52	39,74	5,12	4,49	0,66	40,76
Varatella	16_v	2.076,33	241,64	39,24	4,66	4,38	0,68	40,22
Varatella	17	2.190,39	310,13	38,38	3,87	4,44	0,77	39,38
Varatella	18	2.191,07	286,65	36,32	3,27	4,82	0,91	37,50
Varatella	19	2.328,58	307,11	35,09	3,43	4,59	0,92	36,16
Varatella	20	2.438,33	304,05	34,38	3,46	3,78	0,71	35,11
Varatella	21	2.461,90	302,21	34,35	3,90	3,36	0,66	34,92
Varatella	21_v	2.462,90	292,75	32,75	3,42	2,85	0,52	33,17
Varatella	22	2.470,53	293,18	32,62	3,58	3,48	0,68	33,24
Varatella	23_m	2.518,26	315,30	32,25	4,29	4,44	0,72	33,25
Varatella	23_v	2.522,26	318,28	31,32	3,46	5,69	1,03	32,97
Varatella	24	2.801,10	323,78	28,08	3,83	6,19	1,21	30,04
Varatella	25	2.960,29	328,45	25,87	3,93	6,25	1,24	27,86
Varatella	26	3.081,21	332,47	24,17	2,74	4,97	1,16	25,43
Varatella	27	3.221,76	335,28	22,44	2,63	4,36	0,97	23,41
Varatella	28	3.311,25	336,95	21,65	3,77	3,81	0,81	22,39
Varatella	29.2	3.389,65	338,73	21,17	3,08	5,03	1,14	22,46
Varatella	29.1	3.390,65	339,56	21,16	6,87	5,07	1,15	22,47
Varatella	29	3.466,83	340,36	20,22	4,03	3,37	0,64	20,80
Varatella	30	3.531,79	341,78	19,92	3,85	3,71	0,69	20,62
Varatella	31_m	3.565,58	342,74	19,90	4,04	3,05	0,55	20,38
Varatella	31_v	3.584,78	343,22	18,91	3,25	4,06	0,82	19,75
Varatella	32_m	3.674,35	344,30	18,49	3,01	3,33	0,61	19,06
Varatella	32_v	3.688,50	345,35	17,32	1,94	5,20	1,20	18,70
Varatella	33	3.990,32	350,76	13,24	3,89	5,18	0,97	14,60
Varatella	34	4.097,80	353,15	12,36	3,28	4,58	0,97	13,42
Varatella	35	4.191,64	354,64	11,59	3,08	4,90	1,06	12,81
Varatella	36	4.387,00	358,49	9,87	3,11	3,04	0,67	10,35
Varatella	37	4.423,74	359,80	9,64	3,23	3,64	0,79	10,31
Varatella	38	4.657,14	360,58	8,30	3,37	4,49	0,94	9,33
Varatella	39	4.827,70	345,23	7,08	3,52	4,57	0,89	8,14
Varatella	40	4.879,51	325,15	6,75	3,34	5,18	0,96	8,12

ID Fiume	ID Sez.	Progr. [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	P.L. [m s.m.]	h [m]	v [m/s]	Fr [-]	H [m s.m.]
Varatella	41_m	4.926,74	301,81	6,44	3,49	3,86	0,82	7,20
Varatella	41_v	4.939,20	288,93	6,21	3,36	3,92	0,86	6,99
Varatella	42_m	5.057,05	258,33	5,51	3,24	3,85	0,89	6,26
Varatella	42_v	5.059,55	290,78	5,40	3,15	4,54	1,05	6,45
Varatella	42.1	5.111,18	313,38	5,80	3,99	2,84	0,51	6,21
Varatella	43_m	5.246,10	265,19	4,27	3,46	2,92	0,57	4,71
Varatella	43_v	5.249,60	266,16	4,27	3,48	2,92	0,56	4,70
Varatella	44	5.329,97	267,01	4,05	3,58	2,78	0,51	4,45
Varatella	45_m	5.349,44	268,02	3,94	3,42	3,11	0,56	4,44
Varatella	45_v	5.366,44	268,39	3,93	3,61	2,94	0,51	4,38
Varatella	46_m	5.420,75	270,08	3,73	3,51	3,00	0,52	4,19
Varatella	46_v	5.429,75	281,00	3,14	3,00	3,68	0,69	3,83
Varatella	47_m	5.477,11	281,51	2,87	2,76	3,98	0,78	3,67
Varatella	47_v	5.483,41	282,00	1,65	1,58	9,77	2,58	6,51
Varatella	48	5.513,00	282,33	0,50	0,33	-	-	-

Tabella 13 - Risultati di sintesi per lo scenario TR50.

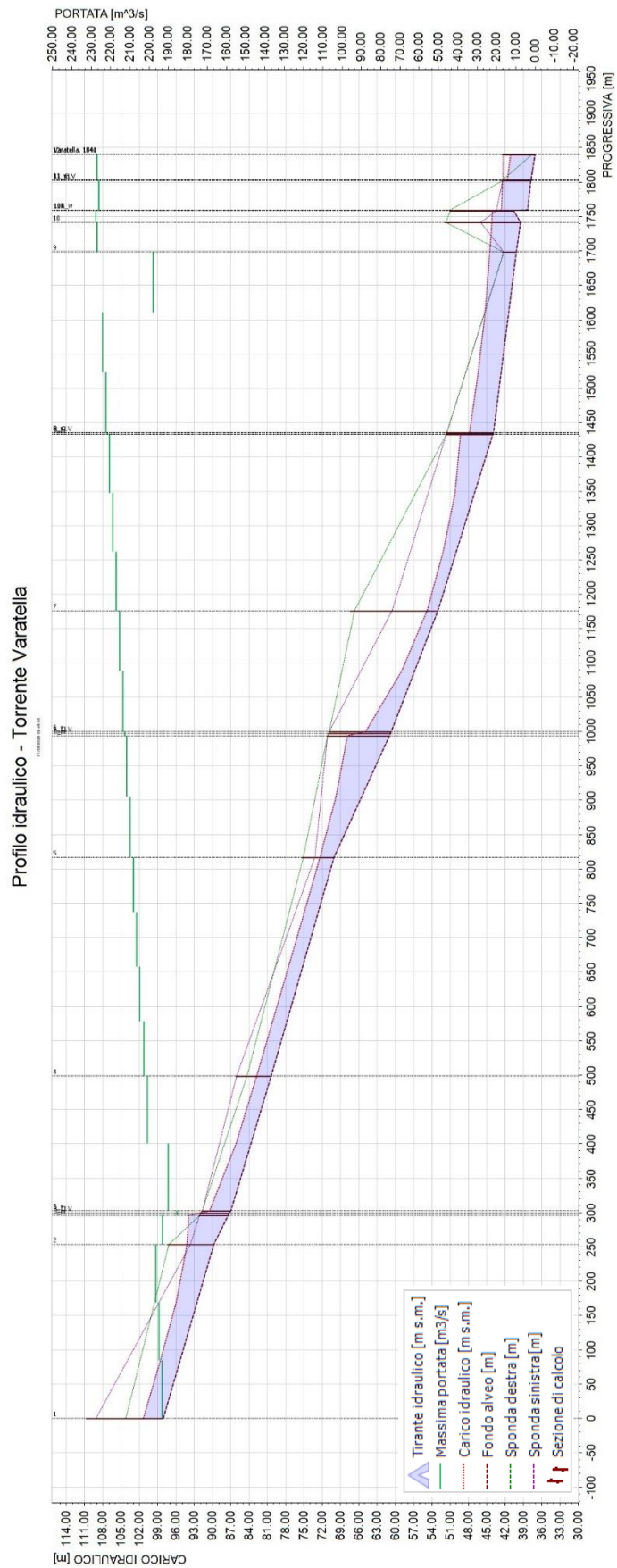


Figura 42 - Profilo di involucro dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR50). Da progressiva 0,00 m a progressiva 1.840,06 m.

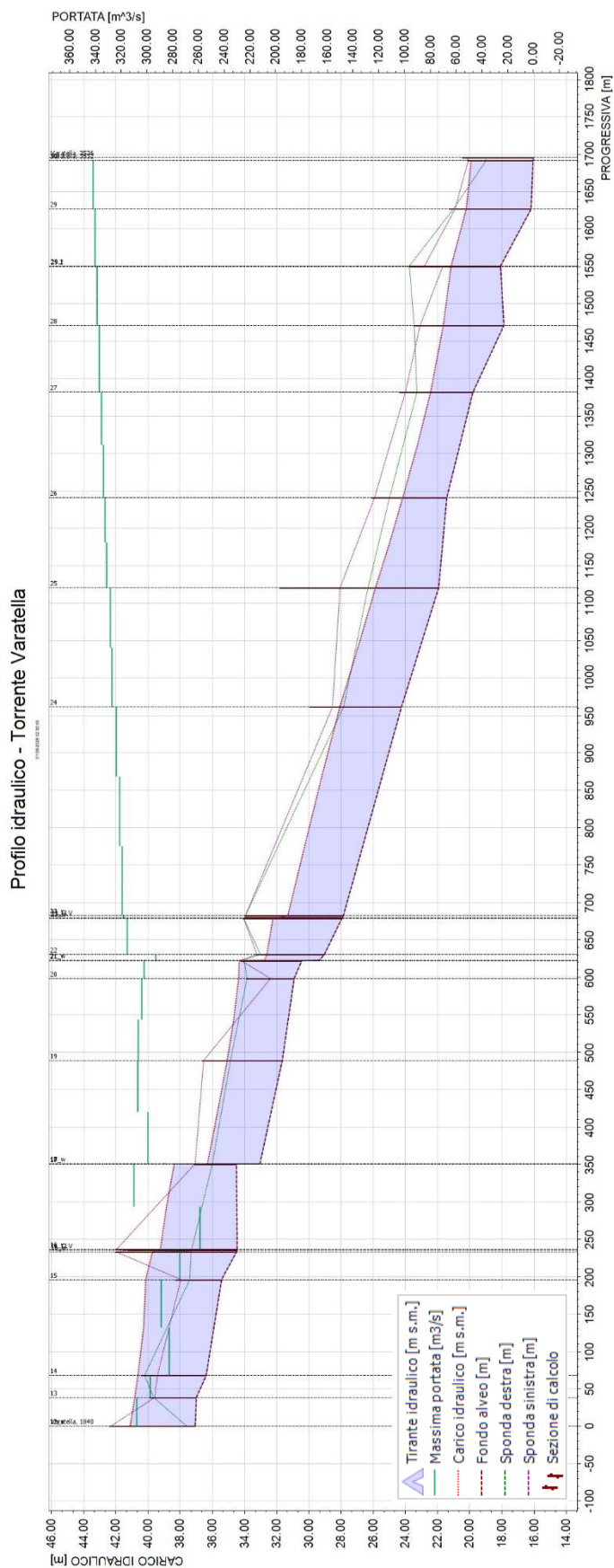


Figura 43 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR50). Da progressiva 1.840,06 m a progressiva 3.531,79 m.

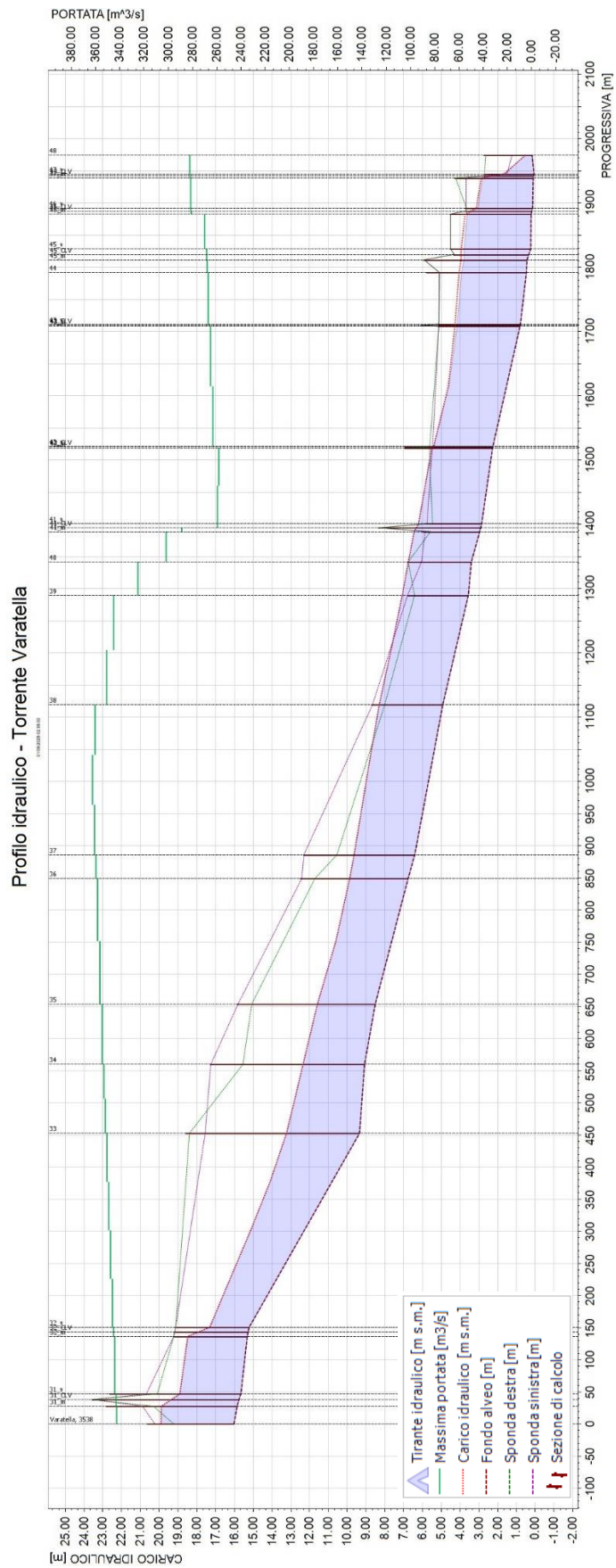


Figura 44 - Profilo di involucro dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR50). Da progressiva 3.531,79 m a progressiva 5.513,00 m.

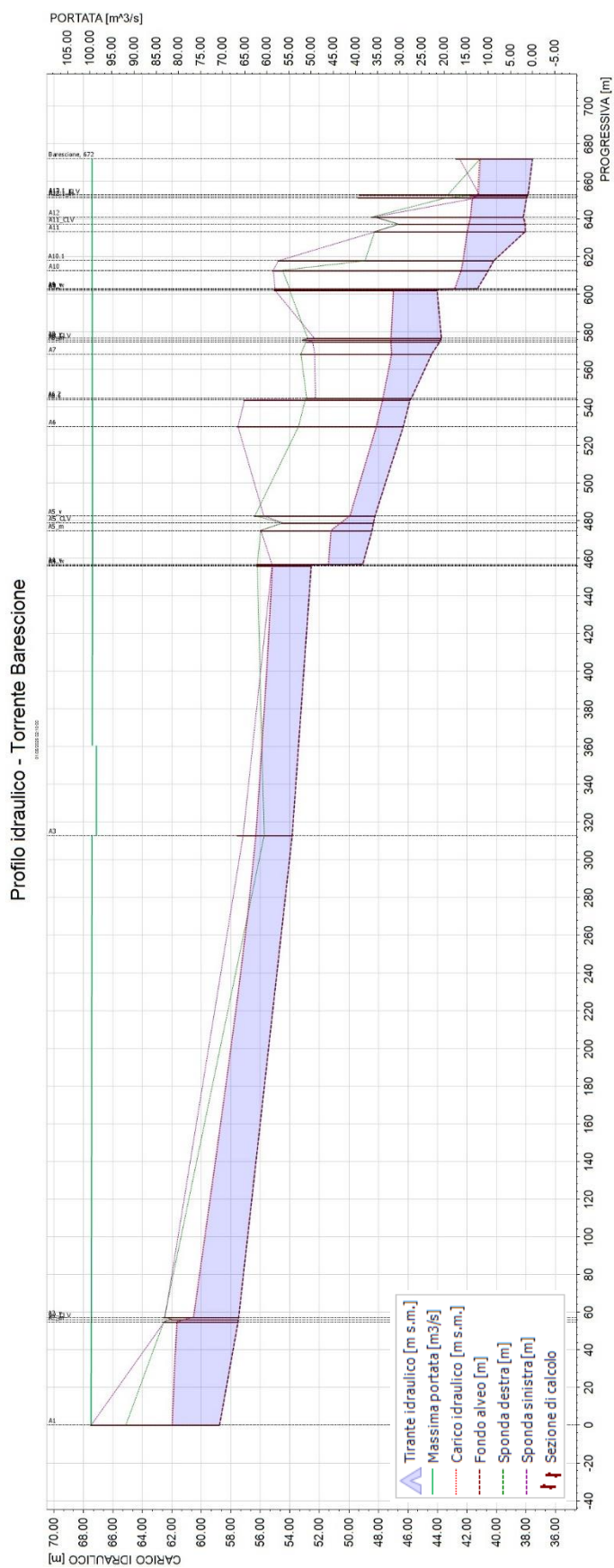


Figura 45 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Barescione (TR50).

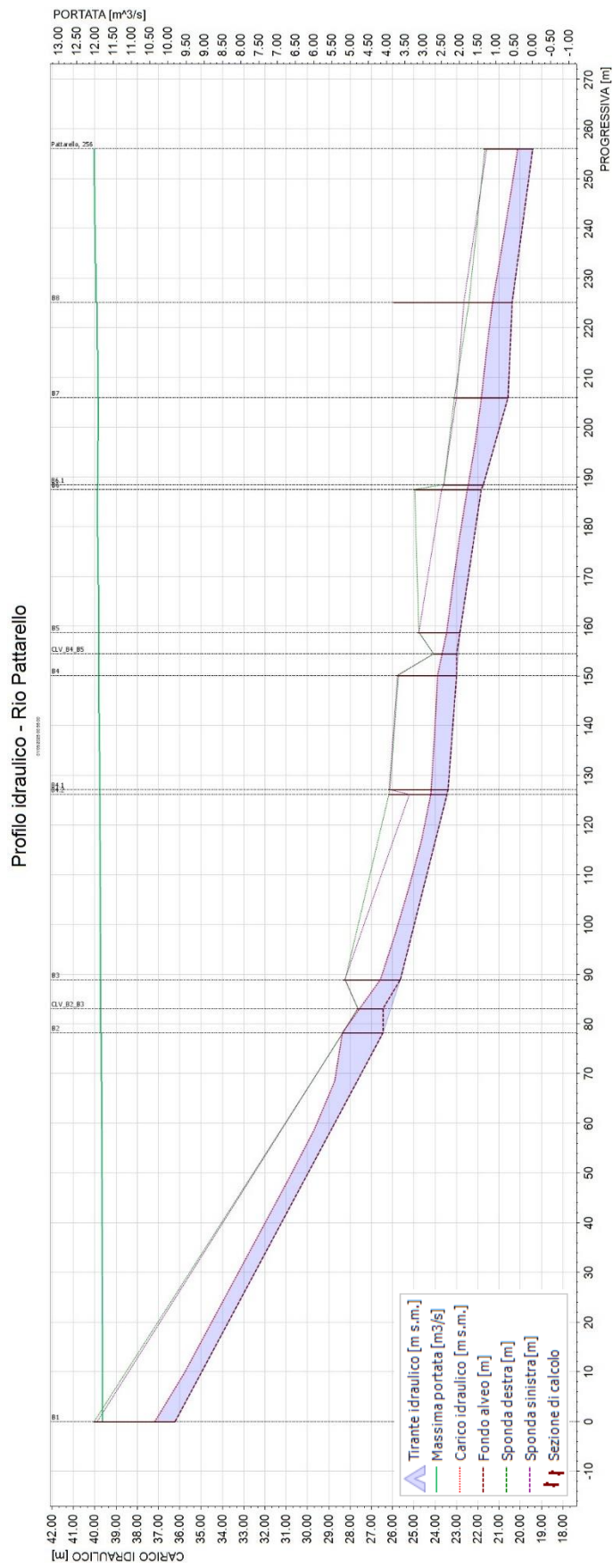


Figura 46 - Profilo di involuppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Rio Pattarello (TR50).

Nel tratto iniziale del **torrente Varatella**, per una lunghezza di circa 1,7 km, il numero di Froude assume valori mediamente superiori a 1, indicando un regime di corrente veloce. Tale comportamento è attribuibile alla marcata pendenza dell'alveo in questa porzione del corso d'acqua, che determina elevate velocità di deflusso.

Procedendo verso valle, il numero di Froude tende progressivamente a ridursi, portando il flusso a condizioni tipiche di corrente lenta, sebbene i valori restino spesso prossimi all'unità, segnalando una situazione di transizione.

Solo nell'ultimo tratto, in prossimità della foce, si osservano valori sensibilmente inferiori a 1, coerenti con un regime di corrente lenta più definito e stabile.

La conformazione del corso d'acqua favorisce, nel complesso, lo sviluppo di velocità di deflusso relativamente elevate. La velocità media stimata lungo l'intero tratto analizzato risulta pari a circa 4,73 m/s, valore sicuramente influenzato dalla consistenza della portata associata all'evento di piena con tempo di ritorno di 50 anni (TR50).

Nella porzione montana del tratto esaminato non si evidenziano lunghi segmenti con sormonto delle sponde. Episodi puntuali si osservano presso la sezione 2, dove si verifica il superamento della sponda sinistra, e alla sezione 3, in corrispondenza della quale entrambe le sponde risultano sormontate. In quest'ultima sezione è presente l'attraversamento CLV\_3, la cui significativa perdita di carico risulta essere la causa principale del sormonto, determinando non solo il superamento delle sponde, ma anche quello dell'impalcato stesso.

Procedendo verso valle, non si riscontrano ulteriori fenomeni di superamento spondale fino alla sezione 9, situata a circa 1,7 km dall'inizio del tratto considerato. A partire da questo punto, i sormonti delle sponde diventano sensibilmente più frequenti, con particolare incidenza sulla sponda sinistra.

In questo settore iniziano inoltre a manifestarsi criticità legate alla presenza di attraversamenti che influenzano in modo significativo la dinamica del deflusso in alveo, generando perdite di carico localizzate. Un esempio rilevante è rappresentato dal manufatto identificato come CLV\_16, che provoca una perdita di carico significativa pur senza andare in pressione. Si segnala inoltre la presenza del ponte CLV\_11, che, nonostante generi una perdita di carico modesta, risulta comunque in pressione, pur senza essere sormontato.

È opportuno, inoltre, considerare le ulteriori perdite di carico indotte dalla presenza di due salti di fondo localizzati in corrispondenza delle sezioni 17 e 21, che contribuiscono a modificare localmente il regime della corrente.

Proseguendo verso valle, si rilevano solo due ulteriori episodi di sormonto, entrambi di entità contenuta: il primo in corrispondenza della sezione 24, sulla sponda destra, e il secondo alla sezione 30. Nonostante le perdite di carico significative generate dagli attraversamenti CLV\_31 e CLV\_32, il deflusso di piena rimane confinato all'interno dell'alveo.

A partire dalla sezione 39, tuttavia, si osserva un sormonto spondale più persistente, dovuto principalmente a un marcato restringimento della sezione idraulica tra le sezioni 39 e 40. In tale contesto, si segnala che l'attraversamento CLV\_41, posizionato poco più a valle, non produce effetti rilevanti sulla dinamica della corrente.

L'analisi modellistica evidenzia come il tratto compreso tra le sezioni 39 e 42 costituisca il principale punto critico per l'esondazione del torrente, rappresentando la causa prevalente della fuoriuscita di portata dall'alveo verso le aree circostanti e l'abitato di Borghetto, come sarà chiaramente visibile nelle successive mappe di allagamento.

Si precisa infine che anche gli attraversamenti CLV\_46 e CLV\_47 presentano un funzionamento in pressione. Il primo, un attraversamento ferroviario di notevole massa, incide in modo non trascurabile sulla dinamica del deflusso, mentre il secondo, costituito da un ponte a soletta

continua privo di interferenze in alveo, risulta particolarmente basso e per questo motivo determina un effetto idraulico significativo. In entrambi i casi, pur essendo in pressione, non si registra il superamento dell'estradosso.

Complessivamente, come riportato anche nella Tabella 13, la portata massima contenuta in alveo calcolata alla sezione di chiusura del tratto indagato del torrente Varatella risulta pari a circa 282 m<sup>3</sup>/s. Confrontando questo valore con la portata di progetto attesa di 380 m<sup>3</sup>/s, stimata attraverso l'analisi idrologica illustrata nel paragrafo 3.2.3, si evidenzia una differenza pari a 98 m<sup>3</sup>/s.

Dal punto di vista volumetrico, l'idrogramma ottenuto dall'analisi idrologica prevedeva un volume complessivo di piena pari a 3.956.372 m<sup>3</sup>, mentre quello risultante dalla modellazione numerica restituisce un volume effettivamente convogliato verso valle di 3.076.388 m<sup>3</sup>. Ne deriva una perdita complessiva di circa 880.000 m<sup>3</sup>, attribuibile all'uscita di portata dal modello monodimensionale e dovuta a fenomeni di esondazione.

La figura seguente propone un confronto diretto tra l'idrogramma teorico e quello simulato alla foce del torrente Varatella, evidenziando le discrepanze in termini di portata e volume.

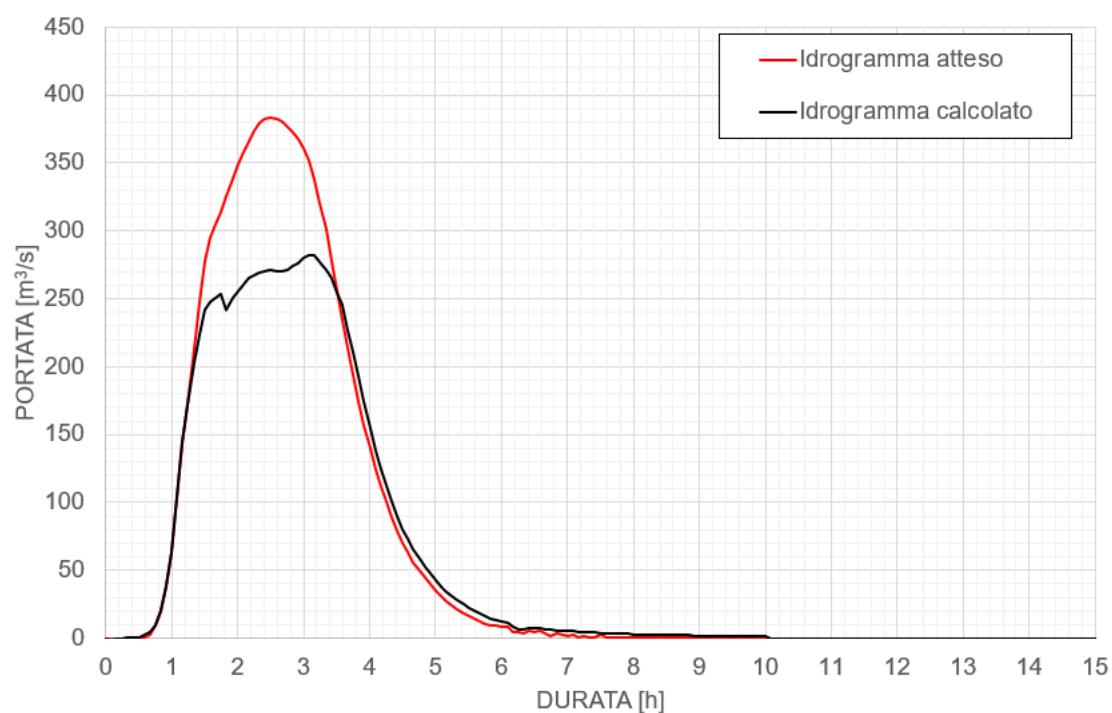


Figura 47 - Confronto tra l'idrogramma idrologico atteso e l'idrogramma calcolato alla foce (TR50). Torrente Varatella.

Si procede ora con l'analisi dei risultati relativi al **torrente Barescione**. Questo corso d'acqua presenta un tracciato particolarmente acclive ed è caratterizzato da un alveo fortemente incassato tra le sponde, con una sezione tipicamente stretta e profondamente incisa.

I valori del numero di Froude calcolati lungo il suo sviluppo riflettono chiaramente tali caratteristiche morfologiche: il valore medio si attesta attorno a 0,98, ma nel tratto iniziale, pari a circa 600 metri, si riscontrano valori sistematicamente superiori all'unità o comunque molto prossimi a essa, indicando condizioni di corrente veloce.

Nel tratto terminale, poco prima della confluenza con il Varatella, il numero di Froude si riduce leggermente, evidenziando una transizione verso un regime di corrente più lenta.

Dall'analisi del confronto tra le quote del pelo libero e le sommità arginali, non emergono sormonti significativi lungo il tracciato, ad eccezione di due casi puntuali. Il primo si verifica in

corrispondenza della sezione A3, dove si registra un sormonto di circa 60 cm sulla sponda destra; il secondo è rilevato presso la sezione A12.1.

In generale, ciò che contraddistingue questo tratto del Barescione è la notevole altezza delle sponde, che garantisce margini idraulici (franchi) particolarmente ampi lungo quasi tutto il corso, limitando così il rischio di esondazione in condizioni di piena.

Le considerazioni relative al contenimento del deflusso entro le sponde trovano piena conferma dal confronto tra la portata di progetto, stimata in fase di analisi idrologica pari a 100 m<sup>3</sup>/s, e la portata effettivamente calcolata all'ultima sezione del modello idraulico, pari a 99,5 m<sup>3</sup>/s. La differenza di soli 0,5 m<sup>3</sup>/s evidenzia una dispersione trascurabile dovuta a fenomeni di esondazione.

Risultati analoghi emergono dall'analisi volumetrica: l'idrogramma idrologico associava all'evento un volume complessivo di 615.287 m<sup>3</sup>, mentre il volume transitato alla foce secondo il modello numerico risulta pari a 615.178 m<sup>3</sup>. Anche in questo caso, la perdita è estremamente contenuta, nell'ordine di un centinaio di metri cubi.

A seguire, si propone un grafico di confronto tra l'idrogramma teorico e quello simulato alla chiusura del tratto modellato.

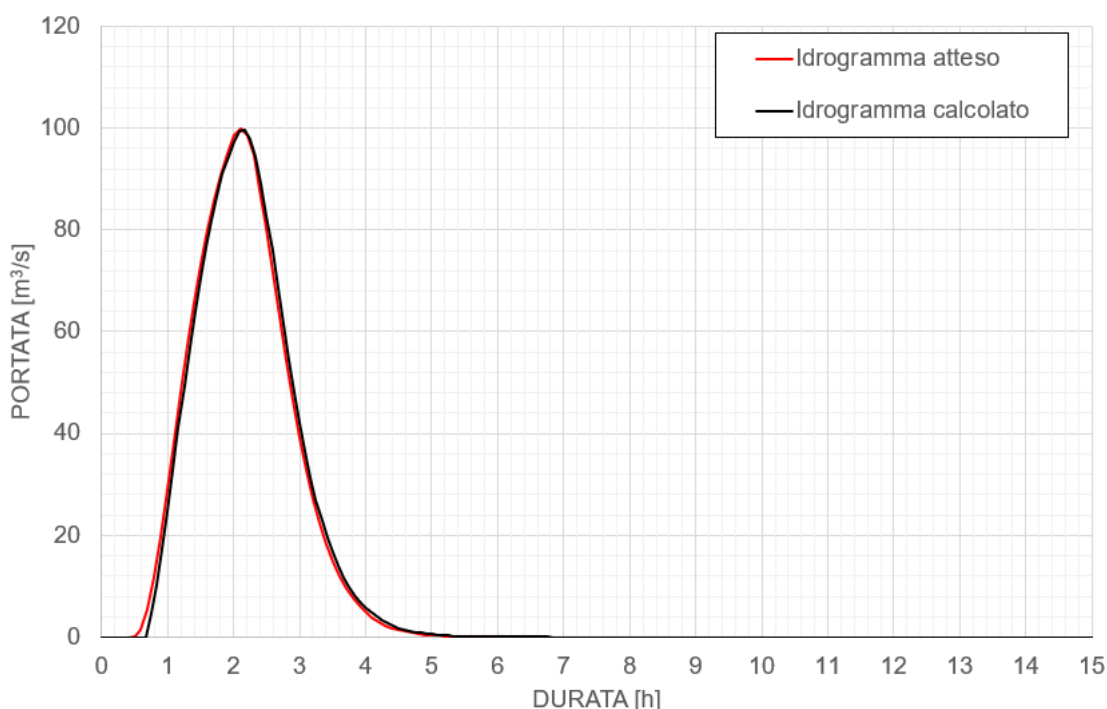


Figura 48 - Confronto tra l'idrogramma idrologico atteso e l'idrogramma calcolato alla foce (TR50). Torrente Barescione.

A completamento dell'analisi si riportano i risultati relativi al **Rio Pattarello**. L'intero corso del rio è caratterizzato da condizioni di moto veloce, come evidenziato da un valore medio del numero di Froude pari a 1,34. Le velocità della corrente, sebbene compatibili con tale regime, risultano comunque moderate, con una media stimata intorno a 3,49 m/s.

Nel complesso, la portata risulta contenuta all'interno dell'alveo per l'intera lunghezza del tratto modellato, nonostante l'evento analizzato abbia un tempo di ritorno di 50 anni. Tuttavia, è possibile rilevare un effetto significativo del primo attraversamento, identificato come CLV\_B2\_B3: la sezione idraulicamente utile risulta molto ridotta, determinando perdite di carico consistenti e un innalzamento del pelo libero fino a quote prossime a quelle delle sponde. L'attraversamento risulta non solo in pressione, ma anche sormontato, evidenziando una condizione di criticità rilevante per il deflusso.

L'attraversamento posto più a valle (CLV\_B4\_B5), invece, mostra un'influenza molto più contenuta sul regime di moto del deflusso.

Il confronto tra l'idrogramma teorico e quello risultante dalla modellazione numerica non evidenzia differenze significative, confermando che l'intera portata immessa a monte raggiunge la sezione di confluenza con il Varatella senza perdite lungo il tratto modellato. Il volume d'acqua contenuto in alveo risulta pari a 23.734 m<sup>3</sup>.

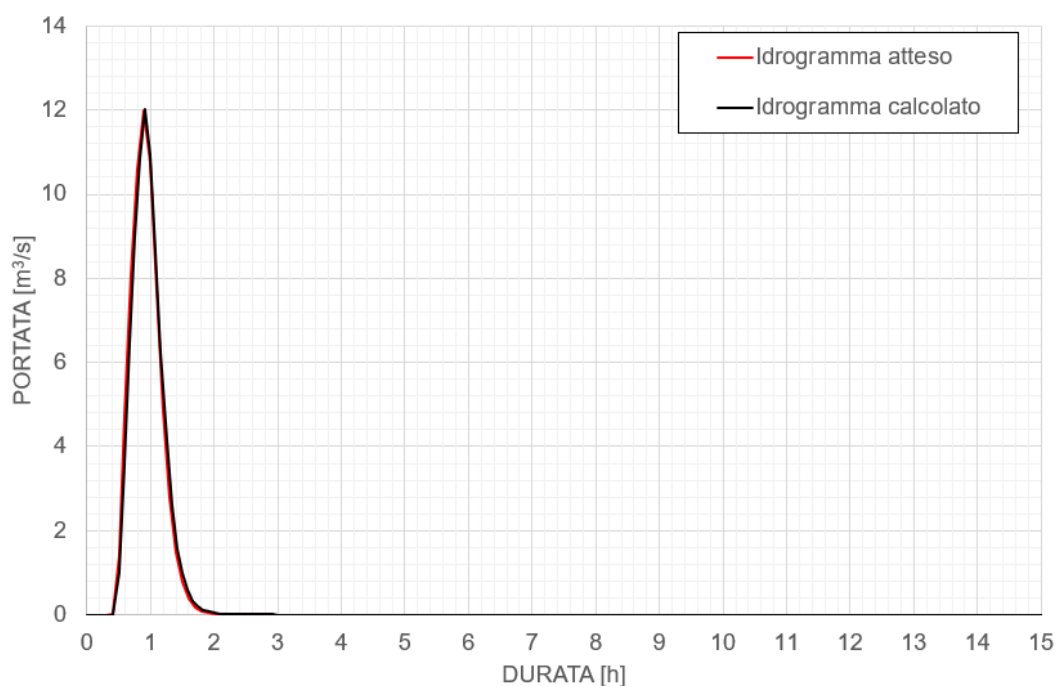


Figura 49 - Confronto tra l'idrogramma idrologico atteso e l'idrogramma calcolato alla foce (TR50). Rio Pattarello.

In conclusione, si propone un breve riepilogo delle condizioni di funzionamento degli attraversamenti presenti lungo il corso d'acqua. La tabella seguente sintetizza i principali risultati ottenuti dal modello idraulico monodimensionale, riportando, per ciascun attraversamento, la perdita di carico stimata e i valori del franco idraulico residuo, sia rispetto all'intradosso sia all'estradosso dell'impalcato.

Un franco idraulico negativo indica che l'attraversamento lavora in pressione, mentre un valore negativo rispetto all'estradosso segnala che si è verificato anche il sormonto dell'opera.

Corso d'Acqua	ID Attraversamento	Quota intradosso [m s.m.]	Perdita di carico [m]	Franco intradosso [m s.m.]	Franco estradosso [m s.m.]
Barescione	CLV_A2	62,03	0,37	0,36	0,87
Barescione	CLV_A5	54,50	0,17	3,28	5,26
Barescione	CLV_A8	53,12	0,03	5,97	7,25
Barescione	CLV_A11	46,62	0,08	4,64	7,21
Barescione	CLV_12.1	41,74	0,26	0,11	1,67
Pattarello	CLV_B2_B3	27,64	0,60	-0,73	-0,03
Pattarello	CLV_B4_B5	24,08	0,16	0,19	1,88
Varatella	CLV_3	91,94	0,79	-2,01	-0,15

Corso d'Acqua	ID Attraversamento	Quota intradosso [m s.m.]	Perdita di carico [m]	Franco intradosso [m s.m.]	Franco estradosso [m s.m.]
Varatella	CLV_6	70,89	0,83	3,01	5,00
Varatella	CLV_8	51,52	0,64	2,20	3,76
Varatella	CLV_11	42,15	0,18	-0,28	0,44
Varatella	CLV_16	41,21	0,55	1,47	3,14
Varatella	CLV_23	33,92	0,29	1,67	3,80
Varatella	CLV_31	23,54	0,62	3,64	6,65
Varatella	CLV_32	19,18	0,36	0,69	3,24
Varatella	CLV_41	8,31	0,21	1,87	4,21
Varatella	CLV_42	6,91	0,19	1,40	2,25
Varatella	CLV_43	6,05	0,01	1,78	2,37
Varatella	CLV_45	4,31	0,06	0,37	1,95
Varatella	CLV_46	3,69	0,36	-0,04	1,89
Varatella	CLV_47	2,72	0,62	-0,15	1,31

Tabella 14 - Riepilogo degli attraversamenti. Tempo di Ritorno 50 anni.

Al fine di rendere più chiara l'interpretazione dei dati e fornire un'immediata lettura visiva, si presenta di seguito un grafico che sintetizza i valori riportati nella tabella precedente.

L'istogramma mostra le perdite di carico associate a ciascun attraversamento, mentre lo stato di funzionamento idraulico è rappresentato da simboli a forma di rombo, colorati in base al valore del franco idraulico residuo: verde se il franco è positivo (condizione di deflusso libera), arancione se il franco è nullo (attraversamento in pressione), e rosso se, oltre alla condizione di pressione, si verifica anche il sormonto dell'estradosso.

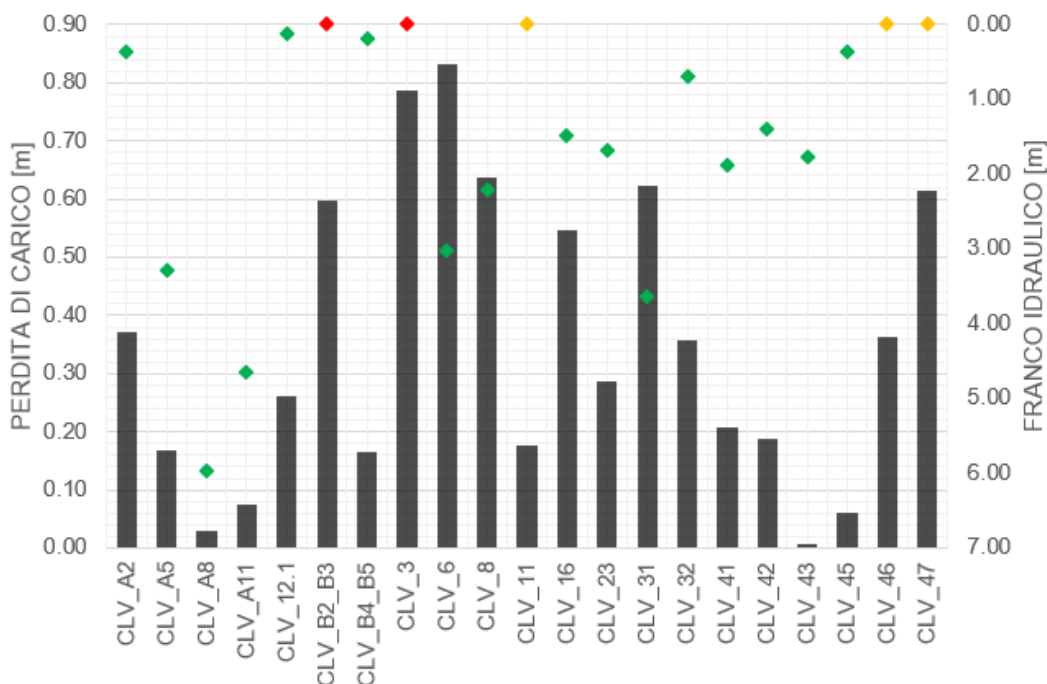


Figura 50 - Verifica degli attraversamenti, evidenza delle perdite di carico e dei franchi idraulici.TR50.

## 5.1.2 Evento di piena duecentennale (TR200)

Nel seguito, per lo scenario con tempo di ritorno di 200 anni, si adottano gli stessi criteri di presentazione impiegati per il TR50.

Nella Tabella 15 sono dunque riepilogati i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso dei tre corsi d'acqua esaminati (output del modello monodimensionale), considerati come inviluppo dei valori massimi per l'evento TR200.

A seguire, vengono proposte le immagini dei profili idraulici estratti dal modello numerico, con l'evidenziazione dei tiranti idrici massimi e delle portate di piena ad essi corrispondenti. Anche in questo caso, per assicurare un'adeguata definizione di dettaglio lungo l'intero sviluppo planimetrico, la rappresentazione è stata suddivisa in più immagini.

ID Fiume	ID Sez.	Progr. [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	P.L. [m s.m.]	h [m]	v [m/s]	Fr [-]	H [m s.m.]
Barescione	A1	0,00	139,68	63,34	4,56	3,18	0,55	63,85
Barescione	A2_m	54,86	139,63	63,07	5,55	4,08	0,57	63,91
Barescione	A2_v	57,36	139,07	61,24	3,76	6,16	1,06	63,17
Barescione	A3	312,93	138,79	56,82	2,97	4,62	0,92	57,91
Barescione	A4	455,78	137,10	55,72	3,16	3,93	0,74	56,51
Barescione	A4_v	456,78	136,26	52,04	2,98	4,21	0,82	52,95
Barescione	A5_m	474,69	138,59	51,89	3,46	4,44	0,77	52,90
Barescione	A5_v	482,44	138,59	50,37	2,14	7,29	1,62	53,08
Barescione	A6	529,80	138,58	48,67	2,36	6,60	1,38	50,90
Barescione	A6.1	543,90	138,60	48,29	2,43	6,41	1,32	50,39
Barescione	A6.2	544,90	138,60	48,27	2,51	6,22	1,26	50,24
Barescione	A7	568,26	138,61	47,74	3,36	3,41	0,63	48,33
Barescione	A8_m	574,83	138,62	47,79	3,89	2,85	0,50	48,20
Barescione	A8_v	576,81	138,63	47,78	3,98	2,77	0,48	48,17
Barescione	A9	601,91	138,64	47,64	3,62	4,18	0,73	48,53
Barescione	A9_v	602,91	138,65	43,50	2,22	6,65	1,45	45,76
Barescione	A10	612,66	138,65	43,23	2,70	5,37	1,08	44,70
Barescione	A10.1	617,71	138,65	43,15	2,97	4,84	0,93	44,35
Barescione	A11	633,22	138,64	42,98	4,94	4,85	0,72	44,18
Barescione	A12	641,06	138,64	42,96	4,79	4,84	0,73	44,16
Barescione	A12.1_m	651,11	138,63	42,86	4,91	2,95	0,48	43,30
Barescione	A12.1_v	652,81	138,62	42,29	4,44	3,36	0,58	42,87
Barescione	A13	672,46	138,32	42,15	4,61	3,96	0,65	42,94
Pattarello	A1	0,00	16,68	37,36	1,14	5,68	1,99	39,00
Pattarello	B2	78,22	16,71	29,02	2,57	2,32	0,47	29,30
Pattarello	B3	88,89	16,47	26,76	1,12	5,84	2,09	28,50
Pattarello	B4.2	126,13	16,75	24,39	0,94	2,81	1,01	24,79
Pattarello	B4.1	127,13	16,75	24,37	0,97	2,70	0,95	24,74
Pattarello	B4	150,13	16,79	24,09	1,09	2,37	0,78	24,37
Pattarello	B5	158,73	16,79	23,60	0,76	3,47	1,37	24,21
Pattarello	B6	187,46	16,83	22,68	0,84	4,37	1,60	23,66
Pattarello	B6.1	188,46	16,84	22,64	0,90	4,07	1,43	23,48
Pattarello	B7	205,99	16,81	22,06	1,48	4,07	1,19	22,90

ID Fiume	ID Sez.	Progr. [m]	Q [m³/s]	P.L. [m s.m.]	h [m]	v [m/s]	Fr [-]	H [m s.m.]
Pattarello	B8	225,07	16,76	21,49	1,10	4,62	1,54	22,57
Pattarello	B9	256,36	16,88	20,67	1,26	2,40	0,73	20,96
Varatella	1	0,00	272,88	101,86	3,75	8,07	1,80	105,18
Varatella	2	253,36	274,21	95,59	5,78	4,02	0,64	96,41
Varatella	3_m	295,54	251,10	95,12	7,66	4,67	0,56	96,23
Varatella	3_v	302,27	227,98	91,11	4,10	8,55	1,46	94,84
Varatella	4	498,65	281,61	83,21	2,82	8,04	1,76	86,50
Varatella	5	817,01	294,91	73,10	3,03	7,42	1,47	75,91
Varatella	6_m	994,05	295,55	69,66	8,69	6,61	0,77	71,89
Varatella	6_v	1.000,24	297,05	66,00	5,33	11,52	1,65	72,77
Varatella	7	1.176,30	305,27	55,30	2,29	13,25	2,97	64,25
Varatella	8_m	1.433,04	314,10	50,51	6,41	3,41	0,50	51,10
Varatella	8_v	1.435,54	315,57	48,44	4,44	5,80	1,10	50,15
Varatella	9	1.698,10	265,27	45,30	5,15	5,89	0,88	47,07
Varatella	10	1.741,32	318,78	44,95	5,49	4,26	0,74	45,88
Varatella	10A	1.758,53	323,04	44,80	4,21	4,71	0,76	45,93
Varatella	10B	1.759,53	311,83	44,04	5,76	3,46	0,49	44,65
Varatella	11_m	1.801,93	309,01	43,65	5,88	5,62	0,75	45,26
Varatella	11_v	1.803,40	283,84	42,62	4,89	6,24	0,91	44,60
Varatella	12	1.840,06	304,90	42,15	5,08	2,66	0,41	42,51
Varatella	13	1.878,24	415,11	41,79	4,79	4,81	0,75	42,97
Varatella	14	1.907,69	400,46	41,56	5,17	5,49	0,83	43,10
Varatella	15	2.035,90	378,43	41,19	5,76	3,28	0,47	41,74
Varatella	16_m	2.073,09	331,35	40,67	6,05	4,52	0,61	41,71
Varatella	16_v	2.076,33	300,67	40,08	5,50	4,54	0,64	41,14
Varatella	17	2.190,39	406,36	39,20	4,69	4,68	0,73	40,32
Varatella	18	2.191,07	370,77	36,86	3,81	5,25	0,91	38,26
Varatella	19	2.328,58	417,32	35,58	3,92	5,20	0,98	36,96
Varatella	20	2.438,33	405,22	34,81	3,89	4,39	0,77	35,79
Varatella	21	2.461,90	399,00	34,79	4,34	3,80	0,69	35,52
Varatella	21_v	2.462,90	374,66	34,05	4,72	2,56	0,39	34,38
Varatella	22	2.470,53	376,58	33,93	4,89	2,96	0,48	34,38
Varatella	23_m	2.518,26	418,69	33,51	5,55	4,46	0,63	34,53
Varatella	23_v	2.522,26	437,32	32,05	4,19	6,32	1,03	34,09
Varatella	24	2.801,10	438,28	28,66	4,41	6,83	1,28	31,04
Varatella	25	2.960,29	435,98	26,43	4,49	6,71	1,28	28,73
Varatella	26	3.081,21	454,61	24,61	3,18	5,49	1,16	26,15
Varatella	27	3.221,76	462,26	22,96	3,15	4,79	0,96	24,13
Varatella	28	3.311,25	464,75	22,23	4,35	4,17	0,80	23,11
Varatella	29.2	3.389,65	467,34	21,78	3,69	5,26	1,07	23,19
Varatella	29.1	3.390,65	468,44	21,77	7,48	5,29	1,08	23,20
Varatella	29	3.466,83	469,62	20,99	4,80	3,64	0,62	21,67
Varatella	30	3.531,79	454,73	20,67	4,60	3,92	0,65	21,45
Varatella	31_m	3.565,58	469,15	20,69	4,83	3,32	0,54	21,26

ID Fiume	ID Sez.	Progr. [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	P.L. [m s.m.]	h [m]	v [m/s]	Fr [-]	H [m s.m.]
Varatella	31_v	3.584,78	464,26	19,54	3,88	4,35	0,80	20,51
Varatella	32_m	3.674,35	475,48	19,13	3,65	3,79	0,63	19,86
Varatella	32_v	3.688,50	477,35	17,80	2,42	5,75	1,18	19,48
Varatella	33	3.990,32	486,98	13,89	4,54	5,82	1,03	15,62
Varatella	34	4.097,80	491,15	12,93	3,85	5,02	1,02	14,21
Varatella	35	4.191,64	493,74	12,11	3,60	5,49	1,09	13,64
Varatella	36	4.387,00	500,49	10,37	3,61	3,43	0,69	10,96
Varatella	37	4.423,74	502,76	10,13	3,72	4,14	0,82	11,00
Varatella	38	4.657,14	487,29	8,65	3,72	5,27	1,04	10,07
Varatella	39	4.827,70	430,98	7,34	3,78	5,21	0,97	8,72
Varatella	40	4.879,51	394,09	7,02	3,61	5,77	1,02	8,71
Varatella	41_m	4.926,74	353,85	6,67	3,72	4,10	0,83	7,53
Varatella	41_v	4.939,20	335,06	6,46	3,61	4,07	0,84	7,30
Varatella	42_m	5.057,05	285,85	5,86	3,59	3,60	0,76	6,52
Varatella	42_v	5.059,55	300,08	5,85	3,60	3,76	0,79	6,57
Varatella	42.1	5.111,18	306,42	5,54	3,73	3,02	0,56	6,01
Varatella	43_m	5.246,10	312,75	5,23	4,42	2,54	0,42	5,56
Varatella	43_v	5.249,60	333,11	5,23	4,44	2,70	0,45	5,60
Varatella	44	5.329,97	346,08	5,03	4,56	2,72	0,44	5,41
Varatella	45_m	5.349,44	351,53	4,91	4,39	3,14	0,49	5,41
Varatella	45_v	5.366,44	352,22	4,85	4,53	3,04	0,47	5,32
Varatella	46_m	5.420,75	351,87	4,64	4,42	3,09	0,48	5,12
Varatella	46_v	5.429,75	369,10	4,06	3,92	3,66	0,60	4,74
Varatella	47_m	5.477,11	355,02	3,88	3,77	3,63	0,61	4,55
Varatella	47_v	5.483,41	352,33	1,81	1,74	8,11	2,03	5,16
Varatella	48	5.513,00	356,48	0,50	0,33	-	-	-

Tabella 15 - Risultati di sintesi per lo scenario TR200.

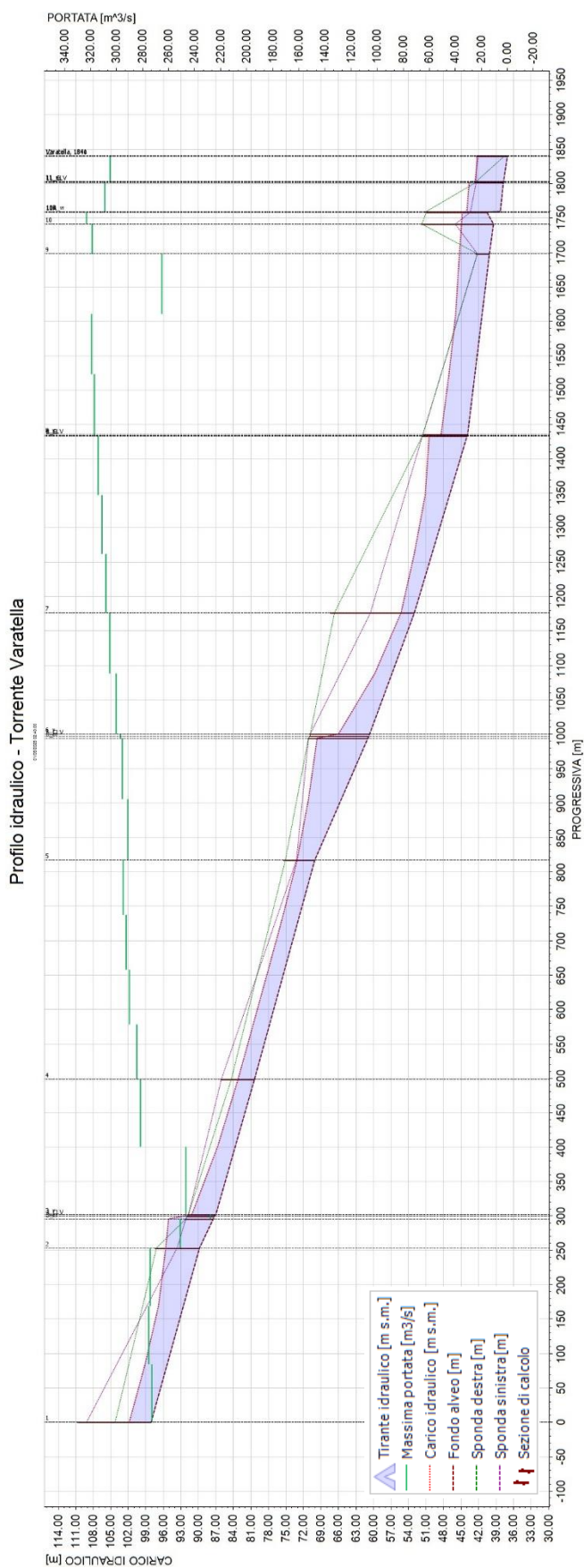


Figura 51 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR200). Da progressiva 0,00 m a progressiva 1.840,06 m.

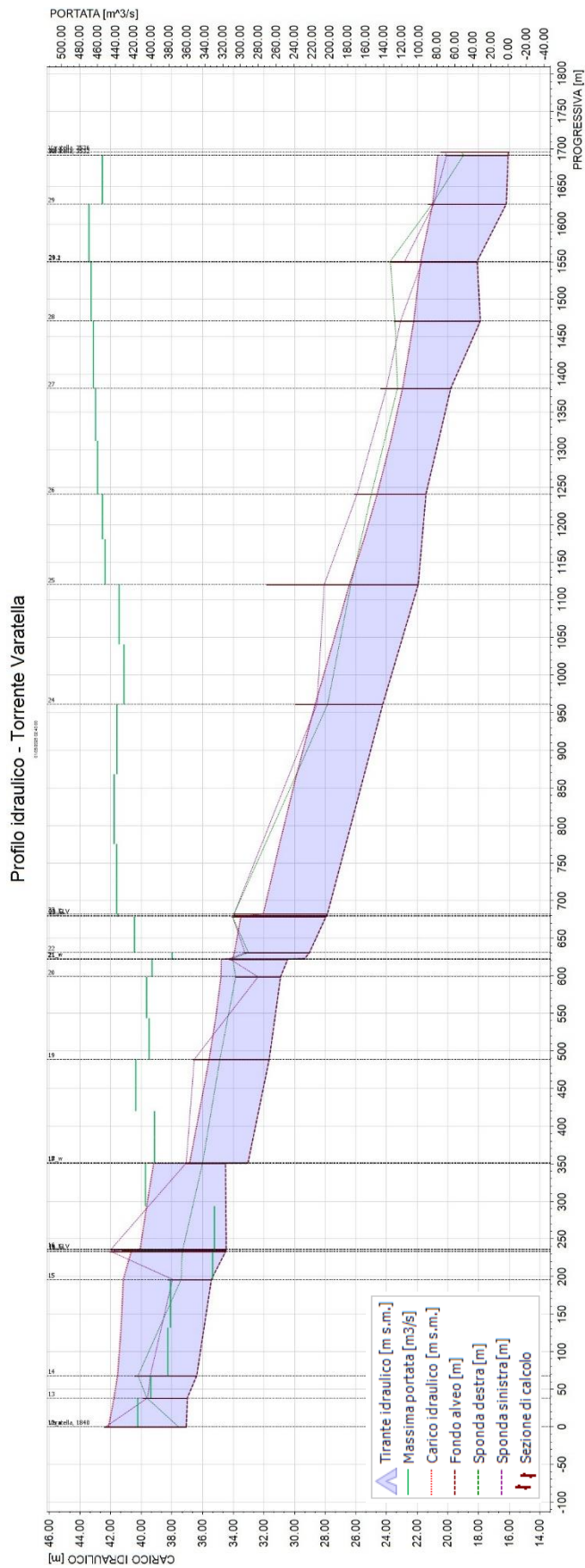


Figura 52 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR200). Da progressiva 1.840,06 m a progressiva 3.531,79 m.

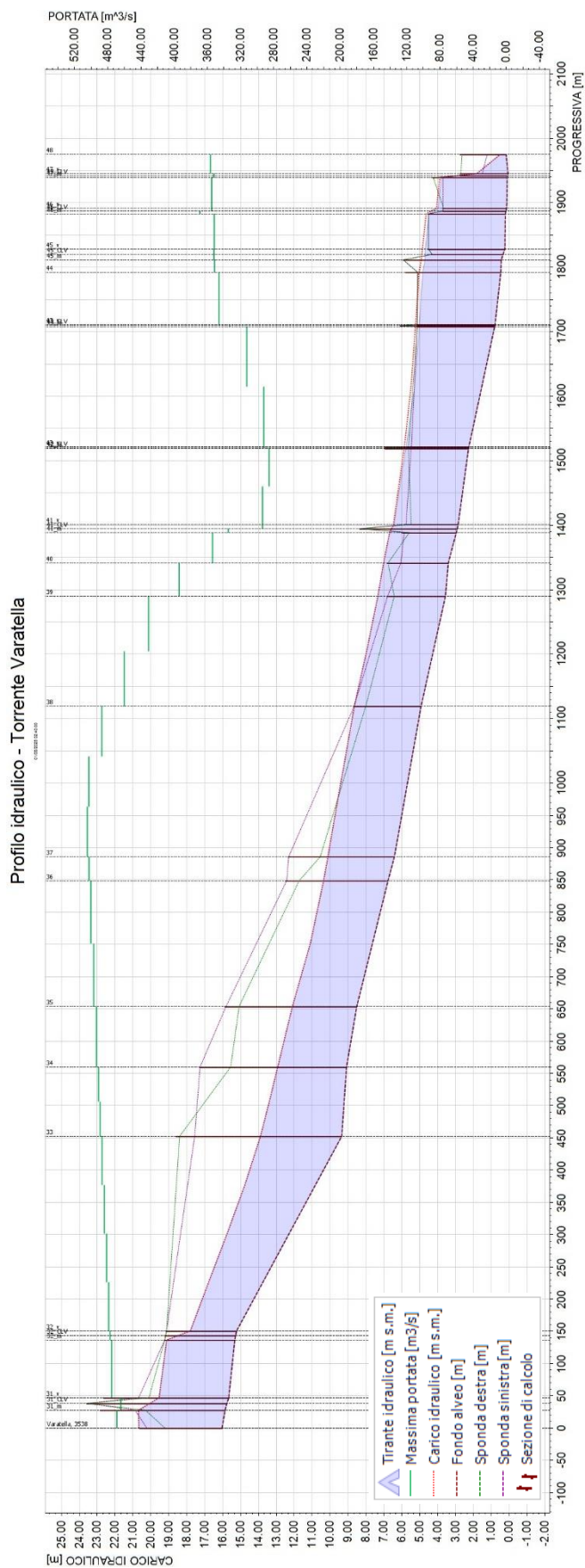


Figura 53 - Profilo di involuppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR200). Da progressiva 3.531,79 m a progressiva 5.513,00 m.

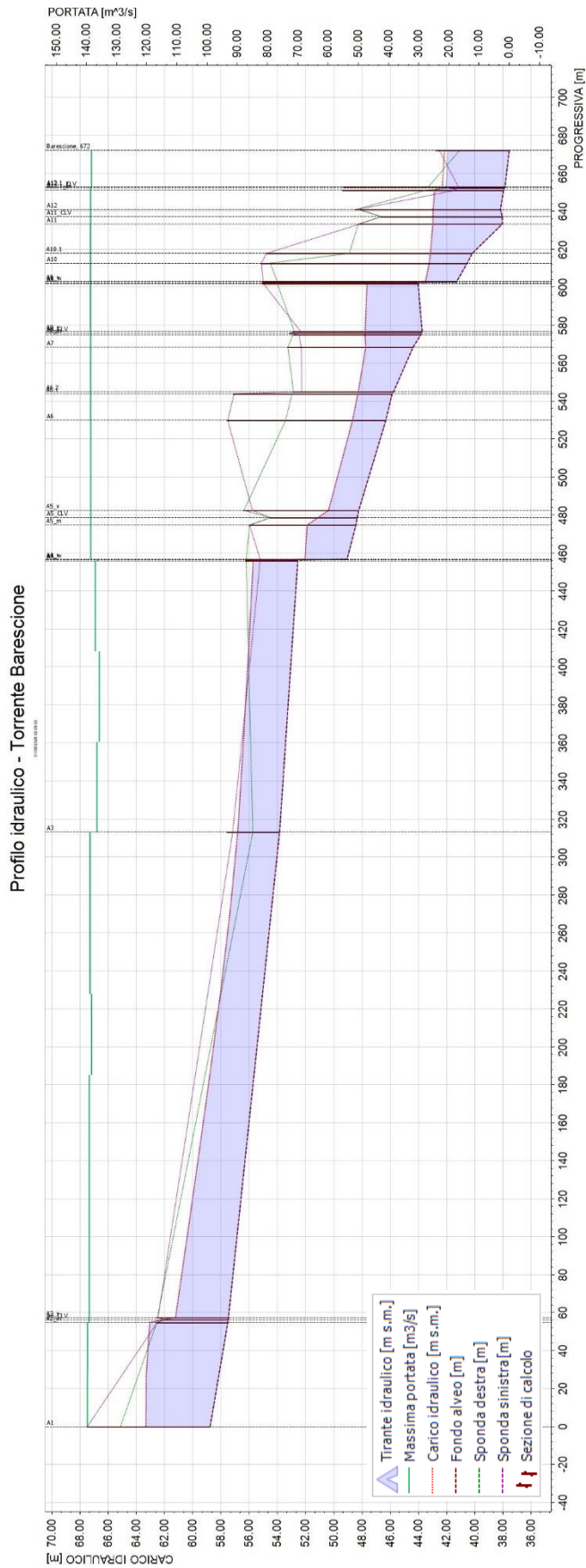


Figura 54 - Profilo di involucro dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Barescione (TR200).

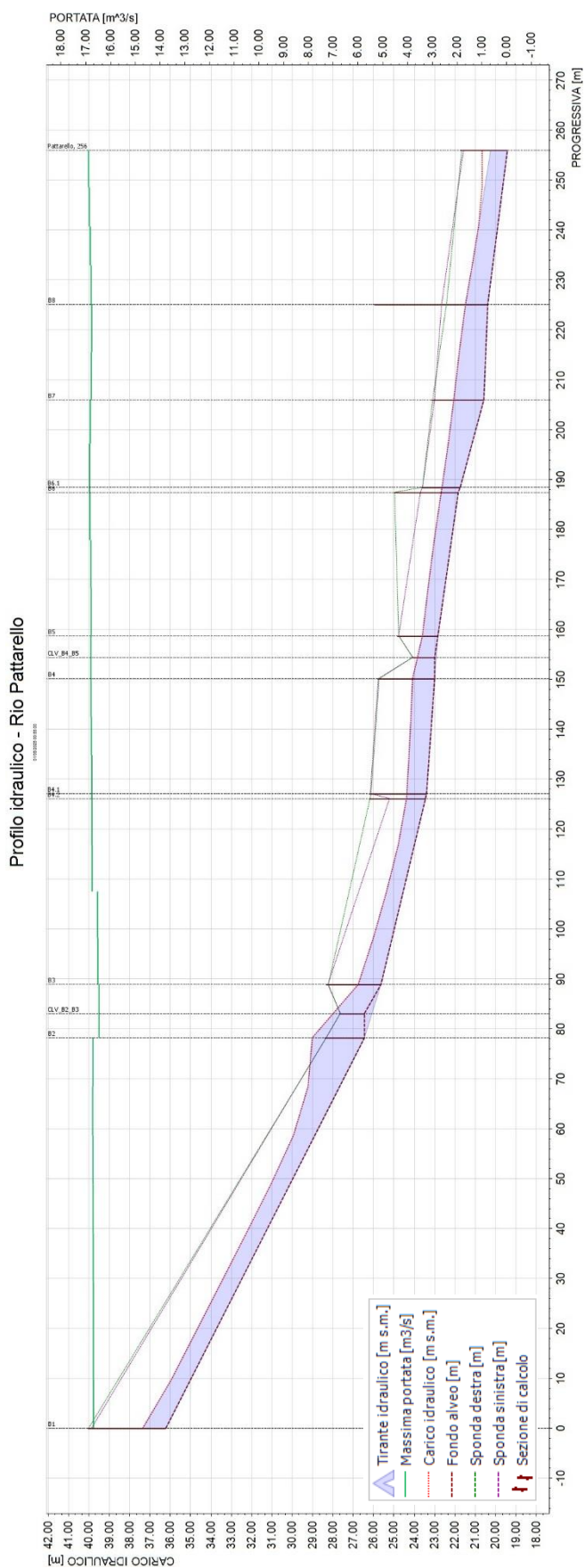


Figura 55 - Profilo di involuppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Rio Pattarello (TR200).

Per quanto riguarda il **torrente Varatella**, anche nello scenario con tempo di ritorno pari a 200 anni si riscontrano andamenti idrodinamici simili a quelli osservati per il TR50.

In particolare, nei primi 1,7 km circa del tratto analizzato, il numero di Froude risulta mediamente superiore all'unità, con un valore medio pari a 1,3, indicando quindi una condizione di corrente veloce. Tale comportamento è ancora una volta attribuibile alla pendenza marcata dell'alveo in questa porzione montana, che favorisce elevate velocità di deflusso in presenza di portate rilevanti.

Procedendo verso valle, si osserva un progressivo calo del numero di Froude, che tende a valori inferiori a 1 pur rimanendo prossimi a tale soglia. Questo evidenzia il passaggio a una corrente mediamente lenta, sebbene non si possa escludere, anche in questo scenario, la presenza di tratti puntuali caratterizzati da moto veloce. Un esempio significativo è il segmento compreso tra le sezioni 23 e 26, dove un lieve restringimento della sezione idraulica utile determina un aumento localizzato del numero di Froude.

Nel complesso, pur con una prevalenza di condizioni di corrente più moderata nella parte valliva, l'analisi restituisce un valore medio su tutto il tratto pari a 1,4, confermando che il torrente Varatella, anche con una piena di TR200, mantiene un regime generalmente veloce.

La velocità media si attesta intorno ai 5 m/s, un valore non trascurabile ma comunque coerente con le caratteristiche morfologiche del torrente in esame. Lungo il tratto analizzato si osservano variazioni significative della velocità, con un andamento piuttosto irregolare.

Rispetto allo scenario con tempo di ritorno 50 anni, nel caso TR200 i punti di uscita della portata risultano sia più numerosi che maggiormente distribuiti lungo tutto il tratto analizzato. La prima criticità si riscontra, come già evidenziato per il TR50, presso il primo attraversamento, identificato come CLV\_3: il manufatto va in pressione e viene anche sormontato, generando una perdita di carico rilevante che provoca il superamento delle sponde immediatamente a monte.

Un ulteriore punto critico è la sezione 9, dove si registra nuovamente il sormonto di entrambe le sponde. Da questo punto in poi i fenomeni di esondazione diventano più frequenti. Particolarmente significativo è il comportamento del CLV\_11, che oltre a essere in pressione viene anch'esso sormontato, con effetti evidenti anche in alcune sezioni a monte, dove si verificano ulteriori superamenti spondali.

Tra gli attraversamenti CLV\_11 e CLV\_16, i sormonti spondali risultano diffusi, sebbene il CLV\_16 – pur generando una perdita di carico visibile – non entri in pressione. Proseguendo verso valle, i fenomeni di sormonto continuano, con una tendenza a interessare in particolare la sponda destra del Varatella.

Gli attraversamenti localizzati nella parte più a valle non risultano mai in pressione, sebbene in alcuni casi generino perdite di carico significative. Un esempio è il CLV\_32, che pur non andando in pressione presenta un franco idraulico pressoché nullo.

Infine, gli ultimi tre attraversamenti del tratto – CLV\_45, CLV\_46 e CLV\_47 – risultano tutti in pressione ma non vengono sormontati. È opportuno ricordare che, già nello scenario TR50, sia il CLV\_46 che il CLV\_47 si trovavano in condizioni di moto in pressione.

Nel complesso, le fuoriuscite di portata osservate nello scenario TR200 non si discostano in modo sostanziale da quanto rilevato per il TR50: le dinamiche idrauliche restano analoghe. Difatti, l'incremento della portata associato all'evento con tempo di ritorno maggiore determina un generale innalzamento dei livelli idrici e un aumento diffuso dei fenomeni di sormonto lungo l'alveo.

In termini di portata defluente in alveo, le numerose fuoriuscite lungo il tratto analizzato determinano una significativa riduzione della portata verso valle. A fronte di una portata attesa, calcolata nel paragrafo 3.2.3, pari a 550 m<sup>3</sup>/s, quella effettivamente riscontrata nella sezione di

chiusura del torrente Varatella risulta pari a 356 m<sup>3</sup>/s. Ne deriva una dispersione per esondazione pari a circa 196 m<sup>3</sup>/s.

Anche il confronto in termini di volume conferma questo comportamento: l'idrogramma idrologico previsto per un evento con tempo di ritorno di 200 anni indicava un volume complessivo di 5.632.786 m<sup>3</sup>, mentre il volume effettivamente trasportato a valle è di 4.524.189 m<sup>3</sup>, con una perdita stimata di circa 1.110.000 m<sup>3</sup> dovuta all'esondazione.

La seguente Figura 56 mostra il confronto tra l'idrogramma atteso alla foce e l'idrogramma calcolato con il modulo monodimensionale.

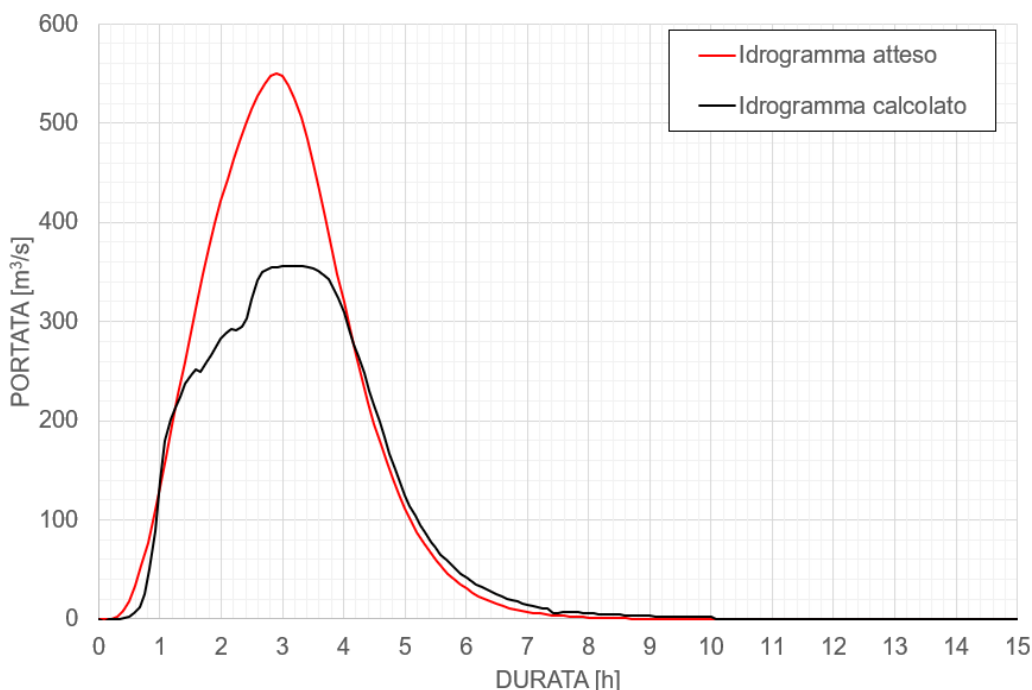


Figura 56 - Confronto tra l'idrogramma idrologico atteso e l'idrogramma calcolato alla foce (TR200). Torrente Varatella.

Si passa ora all'analisi dei risultati ottenuti per il **torrente Barescione**.

Anche in questo caso, le dinamiche idrauliche all'interno dell'alveo inciso, così come simulate tramite il modulo monodimensionale, risultano sostanzialmente analoghe a quanto osservato nello scenario con tempo di ritorno 50 anni. L'aumento della portata comporta inevitabilmente un innalzamento generalizzato dei livelli idrici, con conseguente incremento dei fenomeni di sormonto delle sponde.

Dal punto di vista del regime di moto, il torrente presenta ancora una combinazione di tratti a corrente veloce (numero di Froude > 1) e tratti a corrente lenta (numero di Froude < 1). Complessivamente, il valore medio del numero di Froude è pari a 0,87, il che conferma un regime di corrente lenta, pur prossimo alla soglia del moto veloce.

La velocità media della corrente in alveo è pari a 4,7 m/s, un valore pienamente coerente con le caratteristiche idrauliche attese per il corso d'acqua in esame.

La prima criticità significativa si manifesta in corrispondenza dell'attraversamento CLV\_A2, dove si registra un franco idraulico nullo: il ponte lavora quindi in pressione e viene anche sormontato a livello dell'estradosso. La conseguente perdita di carico determina un sormonto di entrambe le sponde nel tratto immediatamente a monte. Proseguendo verso valle, si rilevano ulteriori episodi localizzati di sormonto spondale, in particolare nelle sezioni A3 e A4.

I tre attraversamenti successivi non risultano invece influenzati dalla piena, grazie alla marcata incassatura del Barescione in questo tratto: l'elevata quota degli intradossi rispetto al pelo libero garantisce infatti un franco idraulico ampiamente sufficiente.

Un ulteriore sormonto delle sponde è infine riscontrato in prossimità della confluenza nel Varatella, in particolare a causa dell'attraversamento A12.1, che va in pressione in quanto caratterizzato da franco idraulico nullo.

Dal confronto tra le portate al colmo si evidenzia comunque che le esondazioni, ovvero i sormonti delle sponde, risultano estremamente contenute.

In corrispondenza della sezione di chiusura, la portata massima calcolata è pari a poco più di 138 m<sup>3</sup>/s, a fronte di una portata idrologicamente attesa di 140 m<sup>3</sup>/s, come stimato nel paragrafo 3.2.3.

Anche l'analisi dei volumi conferma la limitata entità delle perdite per esondazione: il volume complessivo dell'idrogramma di piena previsto dal calcolo idrologico era pari a 869.944 m<sup>3</sup>, mentre quello effettivamente transitato alla foce risulta di 866.374 m<sup>3</sup>. Ne consegue una dispersione complessiva di circa 3.600 m<sup>3</sup>, a dimostrazione del fatto che la piena è stata in gran parte contenuta all'interno dell'alveo.

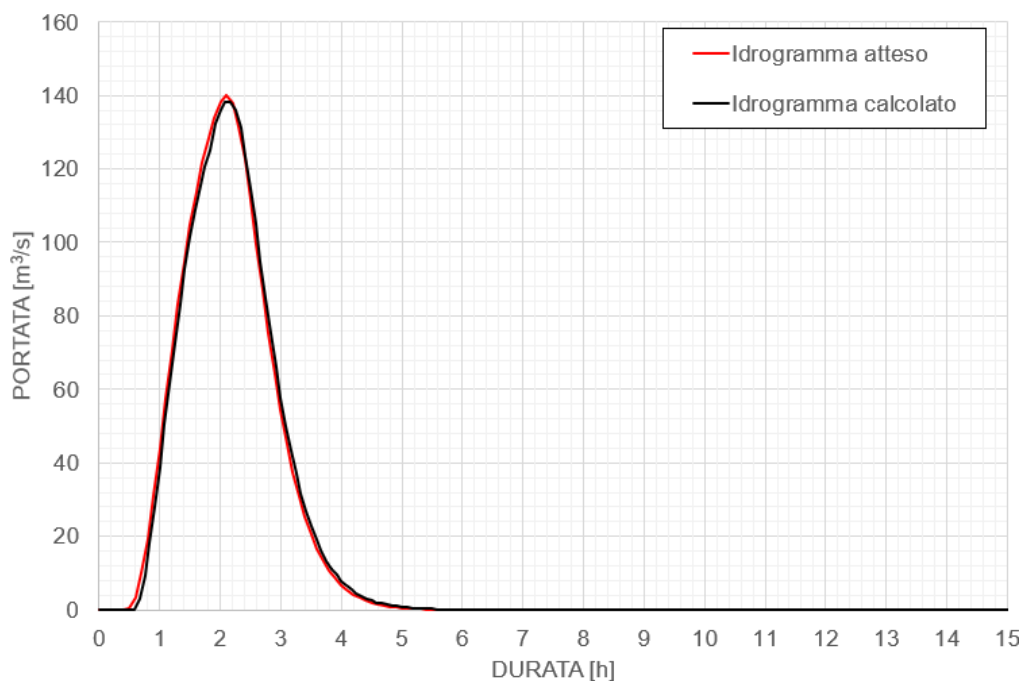


Figura 57 - Confronto tra l'idrogramma idrologico atteso e l'idrogramma calcolato alla foce (TR200). Torrente Barescione.

L'analisi dei risultati relativi al tempo di ritorno 200 anni si conclude con il **rio Pattarello**.

Anche in questo caso, analogamente a quanto osservato per il TR50, la dinamica del deflusso in alveo risulta sostanzialmente invariata. Il numero di Froude si mantiene quasi ovunque superiore a 1,0, con un valore medio pari a 1,26, confermando un regime di corrente veloce.

La velocità media della corrente, pari a circa 3,7 m/s, risulta coerente con quanto già evidenziato nello scenario a TR50.

La principale criticità, già individuata in precedenza, è rappresentata dall'attraversamento CLV\_B2\_B3, che risulta in pressione e viene anche sormontato dalla piena del rio. Anche il secondo attraversamento (CLV\_B4\_B5) entra in pressione, pur generando una perdita di carico contenuta, e in questo caso non si verifica sormonto dell'impalcato.

Complessivamente, la piena si mantiene all'interno dell'alveo inciso, con la presenza di lievi e localizzati sormonti spondali.

Anche il confronto tra l'idrogramma atteso alla foce e quello effettivamente calcolato evidenzia come la differenza tra i due risultati quasi trascurabile. Alla sezione di chiusura del rio Pattarello, la portata di piena calcolata è pari a 16,88 m<sup>3</sup>/s (v. Tabella 15), a fronte dei 17 m<sup>3</sup>/s stimati tramite l'analisi idrologica. Questo lieve scostamento comporta una perdita volumetrica di circa 100 m<sup>3</sup>: il volume atteso era infatti pari a 34.116 m<sup>3</sup>, mentre quello effettivamente defluito alla foce è risultato di 34.002 m<sup>3</sup>.

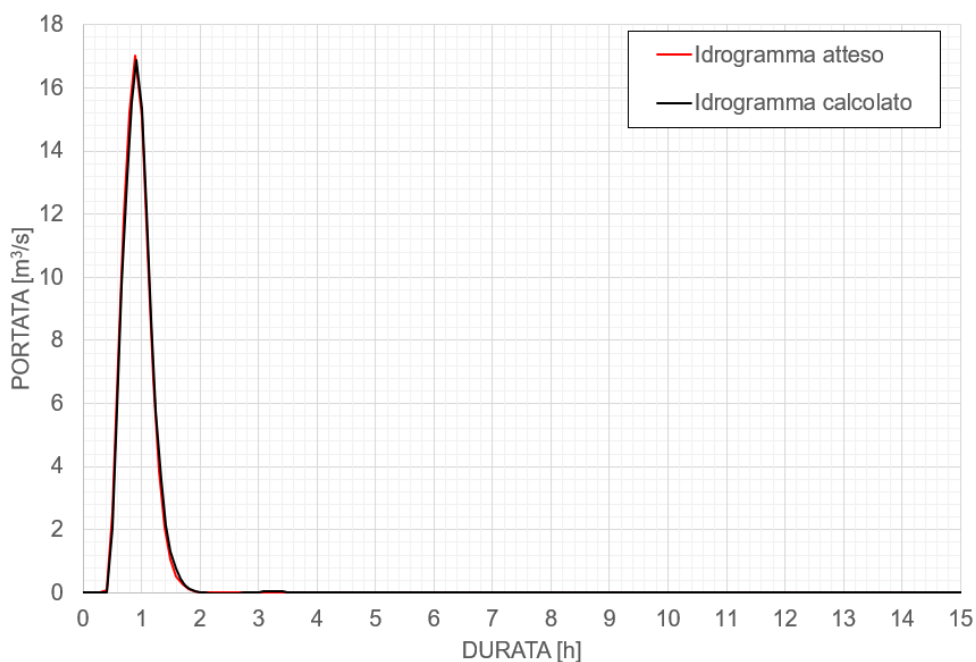


Figura 58 - Confronto tra l'idrogramma idrologico atteso e l'idrogramma calcolato alla foce (TR200). Rio Pattarello.

A conclusione dell'analisi, si propone una tabella riepilogativa dei principali risultati ottenuti dal modello monodimensionale in corrispondenza degli attraversamenti. Sono riportati i valori stimati di perdita di carico e i franchi idraulici residui, sia rispetto all'intradosso che all'estradosso dell'impalcato.

Si ricorda che un franco idraulico negativo rispetto all'intradosso indica un regime di moto in pressione, mentre un valore negativo anche rispetto all'estradosso segnala l'avvenuto sormonto dell'attraversamento.

Corso d'Acqua	ID Attraversamento	Quota intradosso [m s.m.]	Perdita di carico [m]	Franco intradosso [m s.m.]	Franco estradosso [m s.m.]
Barescione	CLV_A2	62,03	0,74	-1,04	-0,53
Barescione	CLV_A5	54,50	0,18	2,61	4,59
Barescione	CLV_A8	53,12	0,03	5,33	6,61
Barescione	CLV_A11	46,62	0,02	3,64	6,21
Barescione	CLV_12.1	41,74	0,44	-1,12	0,44
Pattarello	CLV_B2_B3	27,64	0,80	-1,38	-0,68
Pattarello	CLV_B4_B5	24,08	0,16	-0,01	1,68

Corso d'Acqua	ID Attraversamento	Quota intradosso [m s.m.]	Perdita di carico [m]	Franco intradosso [m s.m.]	Franco estradosso [m s.m.]
Varatella	CLV_3	91,94	1,39	-3,18	-1,32
Varatella	CLV_6	70,89	0,88	1,23	3,22
Varatella	CLV_8	51,52	0,95	1,01	2,57
Varatella	CLV_11	42,15	0,66	-1,50	-0,78
Varatella	CLV_16	41,21	0,57	0,54	2,21
Varatella	CLV_23	33,92	0,44	0,41	2,54
Varatella	CLV_31	23,54	0,75	2,85	5,86
Varatella	CLV_32	19,18	0,38	0,05	2,60
Varatella	CLV_41	8,31	0,23	1,64	3,98
Varatella	CLV_42	6,91	0,05	1,05	1,90
Varatella	CLV_43	6,05	0,03	0,82	1,41
Varatella	CLV_45	4,31	0,09	-0,60	0,98
Varatella	CLV_46	3,69	0,38	-0,95	0,98
Varatella	CLV_47	2,72	0,61	-1,16	0,30

Tabella 16 - Riepilogo degli attraversamenti. Tempo di Ritorno 200 anni.

In chiusura, si ripropone il grafico già introdotto nel paragrafo precedente, utile per una sintesi visiva immediata dello stato di funzionamento degli attraversamenti.

L'istogramma rappresenta le perdite di carico associate a ciascun manufatto, mentre lo stato idraulico è indicato mediante simboli a rombo, colorati in funzione del franco idraulico residuo: verde se positivo (deflusso libero), arancione in caso di franco nullo (attraversamento in pressione), e rosso se, oltre alla pressione, si verifica anche il sormonto dell'estradosso.

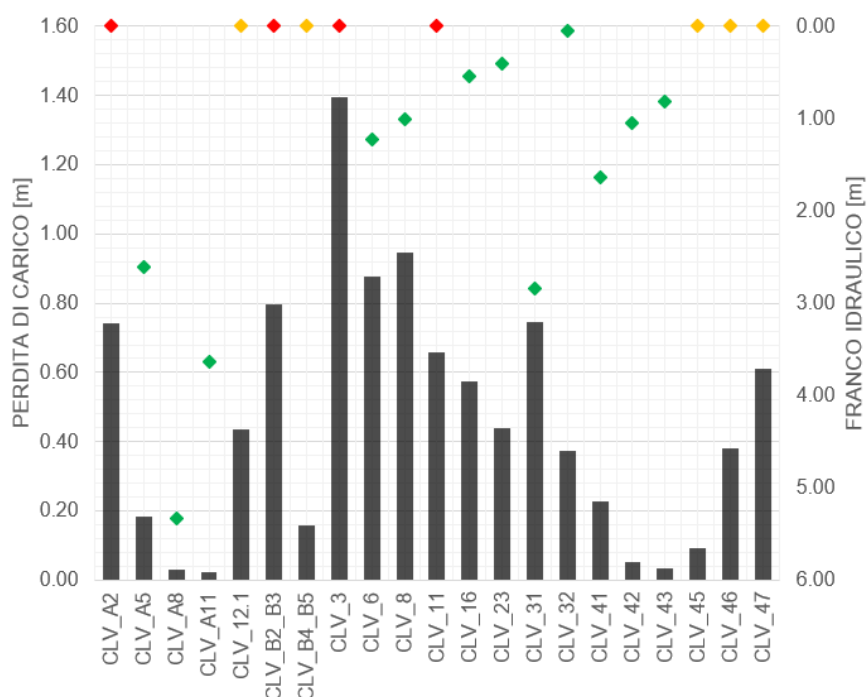


Figura 59 - Verifica degli attraversamenti, evidenza delle perdite di carico e dei franchi idraulici. TR200.

### 5.1.3 Evento di piena cinquecentennale (TR500)

Nel seguito, per lo scenario di piena con tempo di ritorno pari a 500 anni, si mantiene l'impostazione descrittiva già adottata nei casi con TR50 e TR200.

La Tabella 17 riepiloga i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso dei tre corsi d'acqua analizzati, ottenuti come involucro dei valori massimi risultanti dall'elaborazione del modello idraulico monodimensionale per l'evento TR500.

A seguire, sono riportati i profili idraulici estratti dal modello numerico, nei quali sono evidenziati i tiranti idrici massimi e le corrispondenti portate di piena. Anche in questo scenario, per garantire una rappresentazione sufficientemente dettagliata lungo l'intero sviluppo del reticolo, i risultati sono stati suddivisi in più immagini consecutive.

ID Fiume	ID Sez.	Progr. [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	P.L. [m s.m.]	h [m]	v [m/s]	Fr [-]	H [m s.m.]
Barescione	A1	0,00	169,67	64,07	5,29	3,05	0,54	64,55
Barescione	A2_m	54,86	167,65	63,69	6,17	4,37	0,58	64,66
Barescione	A2_v	57,36	159,56	61,66	4,18	6,30	1,02	63,68
Barescione	A3	312,93	169,16	57,16	3,31	4,98	0,93	58,42
Barescione	A4	455,78	165,74	56,05	3,49	4,27	0,76	56,97
Barescione	A4_v	456,78	160,50	52,50	3,44	4,24	0,76	53,42
Barescione	A5_m	474,69	166,91	52,36	3,93	4,70	0,77	53,49
Barescione	A5_v	482,44	167,88	50,70	2,47	7,64	1,58	53,67
Barescione	A6	529,80	167,87	49,06	2,75	6,86	1,33	51,46
Barescione	A6.1	543,90	167,89	48,70	2,84	6,65	1,27	50,95
Barescione	A6.2	544,90	167,89	48,67	2,91	6,46	1,22	50,80
Barescione	A7	568,26	168,04	48,17	3,79	3,61	0,62	48,83
Barescione	A8_m	574,83	168,06	48,22	4,32	3,05	0,50	48,70
Barescione	A8_v	576,81	168,06	48,22	4,42	2,98	0,49	48,67
Barescione	A9	601,91	168,10	48,10	4,08	4,46	0,73	49,11
Barescione	A9_v	602,91	168,11	44,59	3,31	5,35	0,95	46,05
Barescione	A10	612,66	168,09	44,47	3,94	4,37	0,72	45,44
Barescione	A10.1	617,71	168,06	44,45	4,27	3,99	0,63	45,26
Barescione	A11	633,22	168,18	44,33	6,29	4,56	0,59	45,39
Barescione	A12	641,06	218,37	44,61	6,44	5,57	0,72	46,20
Barescione	A12.1_m	651,11	174,05	44,33	6,38	2,69	0,37	44,70
Barescione	A12.1_v	652,81	170,11	43,58	5,73	2,99	0,44	44,04
Barescione	A13	672,46	162,47	43,42	5,88	3,47	0,50	44,03
Pattarello	A1	0,00	19,61	37,46	1,24	5,96	2,01	39,27
Pattarello	B2	78,22	19,33	29,21	2,76	2,50	0,49	29,53
Pattarello	B3	88,89	18,04	26,83	1,19	5,87	2,10	28,58
Pattarello	B4.2	126,13	19,59	24,50	1,05	2,89	0,97	24,92
Pattarello	B4.1	127,13	19,60	24,48	1,08	2,79	0,92	24,88
Pattarello	B4	150,13	19,63	24,22	1,22	2,42	0,74	24,52
Pattarello	B5	158,73	19,64	23,68	0,84	3,63	1,36	24,35
Pattarello	B6	187,46	19,66	22,78	0,94	4,51	1,55	23,82
Pattarello	B6.1	188,46	19,68	22,74	1,00	4,22	1,40	23,65
Pattarello	B7	205,99	19,69	22,18	1,60	4,31	1,20	23,13

ID Fiume	ID Sez.	Progr. [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	P.L. [m s.m.]	h [m]	v [m/s]	Fr [-]	H [m s.m.]
Pattarello	B8	225,07	19,64	21,58	1,19	4,90	1,55	22,80
Pattarello	B9	256,36	19,70	21,13	1,72	1,98	0,51	21,32
Varatella	1	0,00	334,35	102,18	4,07	8,54	1,80	105,90
Varatella	2	253,36	323,61	96,37	6,56	3,96	0,59	97,17
Varatella	3_m	295,54	281,07	95,72	8,26	4,82	0,56	96,90
Varatella	3_v	302,27	254,30	91,52	4,51	8,55	1,38	95,24
Varatella	4	498,65	336,56	83,49	3,10	8,47	1,76	87,14
Varatella	5	817,01	356,68	73,65	3,58	7,40	1,34	76,45
Varatella	6_m	994,05	342,80	71,05	10,08	6,48	0,69	73,19
Varatella	6_v	1.000,24	350,43	66,64	5,97	12,05	1,63	74,04
Varatella	7	1.176,30	370,38	55,57	2,56	14,15	3,00	65,77
Varatella	8_m	1.433,04	380,62	51,31	7,21	3,54	0,48	51,95
Varatella	8_v	1.435,54	382,35	48,93	4,93	6,00	1,05	50,76
Varatella	9	1.698,10	282,10	46,11	5,96	5,32	0,73	47,55
Varatella	10	1.741,32	380,45	45,96	6,50	3,86	0,62	46,72
Varatella	10A	1.758,53	376,91	45,98	5,39	4,22	0,60	46,89
Varatella	10B	1.759,53	498,73	44,78	6,50	4,82	0,64	45,96
Varatella	11_m	1.801,93	355,46	44,42	6,65	5,71	0,71	46,08
Varatella	11_v	1.803,40	313,12	43,60	5,87	5,70	0,76	45,26
Varatella	12	1.840,06	345,82	43,42	6,35	2,32	0,32	43,69
Varatella	13	1.878,24	493,24	42,98	5,98	4,44	0,61	43,98
Varatella	14	1.907,69	462,61	42,62	6,23	5,12	0,70	43,95
Varatella	15	2.035,90	413,27	42,18	6,75	2,99	0,39	42,63
Varatella	16_m	2.073,09	353,00	41,54	6,92	4,17	0,52	42,42
Varatella	16_v	2.076,33	343,35	40,98	6,40	4,41	0,58	41,97
Varatella	17	2.190,39	484,51	39,93	5,42	4,76	0,68	41,08
Varatella	18	2.191,07	438,37	37,28	4,23	5,51	0,90	38,83
Varatella	19	2.328,58	508,12	36,07	4,41	5,37	0,97	37,54
Varatella	20	2.438,33	477,34	35,44	4,52	4,36	0,70	36,40
Varatella	21	2.461,90	478,98	35,48	5,03	3,72	0,61	36,19
Varatella	21_v	2.462,90	445,81	35,17	5,84	2,41	0,33	35,46
Varatella	22	2.470,53	443,10	35,08	6,04	2,68	0,38	35,45
Varatella	23_m	2.518,26	451,75	34,53	6,57	4,02	0,52	35,36
Varatella	23_v	2.522,26	516,53	32,49	4,63	6,69	1,03	34,78
Varatella	24	2.801,10	524,65	28,99	4,74	7,34	1,31	31,74
Varatella	25	2.960,29	515,40	26,82	4,88	6,95	1,27	29,28
Varatella	26	3.081,21	547,24	25,04	3,61	5,52	1,17	26,59
Varatella	27	3.221,76	571,12	23,36	3,55	5,11	0,96	24,69
Varatella	28	3.311,25	574,58	22,65	4,77	4,47	0,81	23,67
Varatella	29.2	3.389,65	577,82	22,21	4,12	5,53	1,04	23,77
Varatella	29.1	3.390,65	578,80	22,20	7,91	5,56	1,05	23,78
Varatella	29	3.466,83	578,54	21,49	5,30	3,92	0,63	22,28
Varatella	30	3.531,79	539,04	21,13	5,06	4,13	0,65	22,00
Varatella	31_m	3.565,58	567,91	21,17	5,31	3,58	0,55	21,82

ID Fiume	ID Sez.	Progr. [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	P.L. [m s.m.]	h [m]	v [m/s]	Fr [-]	H [m s.m.]
Varatella	31_v	3.584,78	542,89	20,02	4,36	4,38	0,76	21,00
Varatella	32_m	3.674,35	578,72	19,59	4,11	4,09	0,65	20,44
Varatella	32_v	3.688,50	582,37	18,15	2,77	6,12	1,18	20,06
Varatella	33	3.990,32	593,63	14,30	4,95	6,28	1,07	16,31
Varatella	34	4.097,80	598,97	13,29	4,21	5,31	1,04	14,73
Varatella	35	4.191,64	602,32	12,45	3,94	5,89	1,12	14,22
Varatella	36	4.387,00	611,08	10,66	3,90	3,75	0,72	11,37
Varatella	37	4.423,74	614,13	10,42	4,01	4,54	0,86	11,47
Varatella	38	4.657,14	576,74	8,84	3,91	5,82	1,11	10,57
Varatella	39	4.827,70	477,82	7,48	3,92	5,51	1,00	9,03
Varatella	40	4.879,51	433,02	7,15	3,74	6,09	1,06	9,04
Varatella	41_m	4.926,74	383,55	6,80	3,85	4,23	0,83	7,71
Varatella	41_v	4.939,20	360,50	6,59	3,74	4,15	0,83	7,47
Varatella	42.1	5.111,18	313,38	5,80	3,99	2,84	0,51	6,21
Varatella	42_m	5.057,05	296,14	6,07	3,80	3,41	0,69	6,67
Varatella	42_v	5.059,55	304,83	6,06	3,81	3,50	0,71	6,69
Varatella	43_m	5.246,10	321,92	5,54	4,73	2,42	0,39	5,84
Varatella	43_v	5.249,60	342,85	5,54	4,75	2,56	0,41	5,87
Varatella	44	5.329,97	353,85	5,34	4,87	2,58	0,40	5,68
Varatella	45_m	5.349,44	368,70	5,22	4,70	3,06	0,46	5,69
Varatella	45_v	5.366,44	369,51	5,09	4,77	3,02	0,45	5,55
Varatella	46_m	5.420,75	364,73	4,88	4,66	3,03	0,45	5,35
Varatella	46_v	5.429,75	388,35	4,17	4,03	3,75	0,60	4,88
Varatella	47_m	5.477,11	366,21	3,99	3,88	3,63	0,60	4,66
Varatella	47_v	5.483,41	359,85	1,82	1,75	8,20	2,04	5,25
Varatella	48	5.513,00	365,21	0,50	0,33	-	-	-

Tabella 17 - Risultati di sintesi per lo scenario TR500.

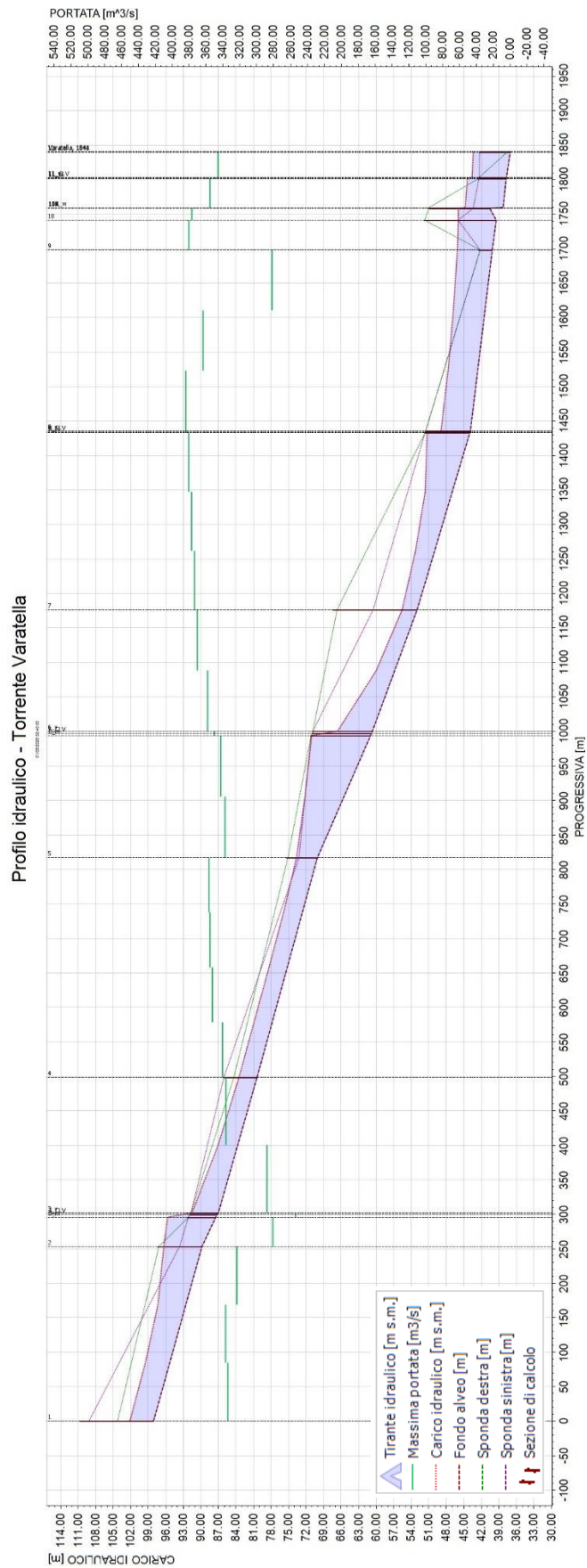


Figura 60 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR500). Da progressiva 0,00 m a progressiva 1.840,06 m.

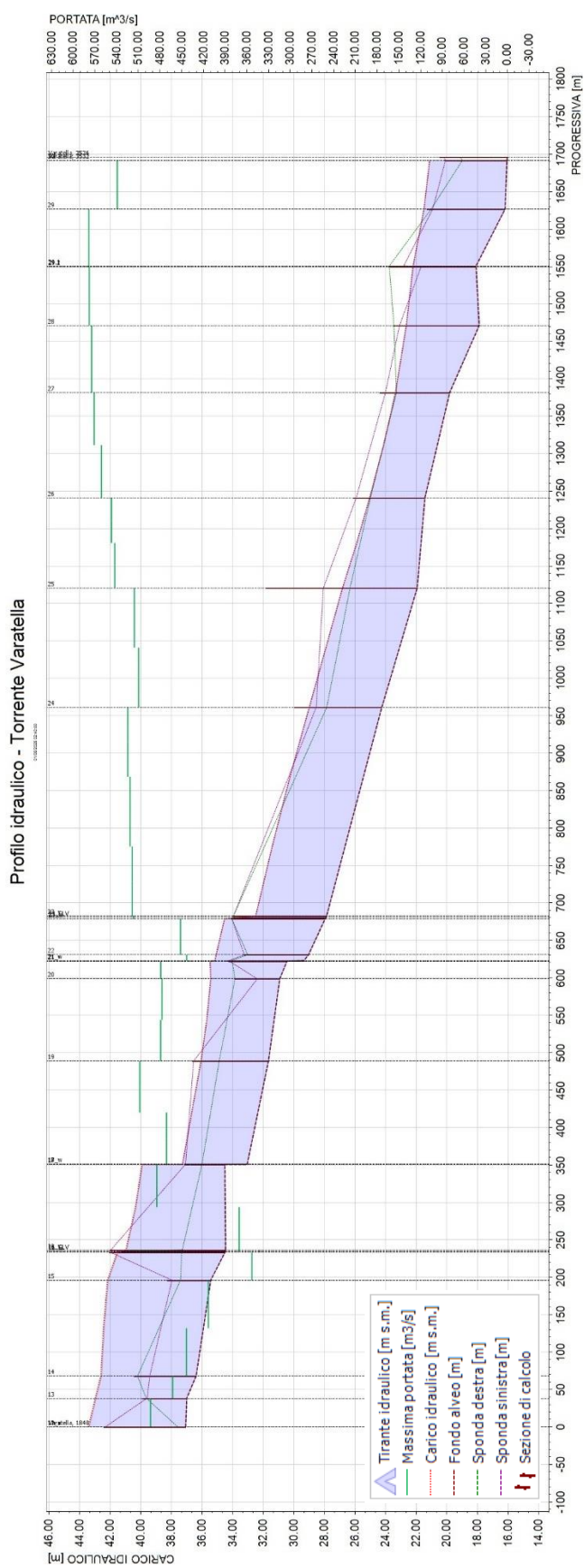


Figura 61 - Profilo di involuppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR500). Da progressiva 1.840,06 m a progressiva 3.531,79 m.

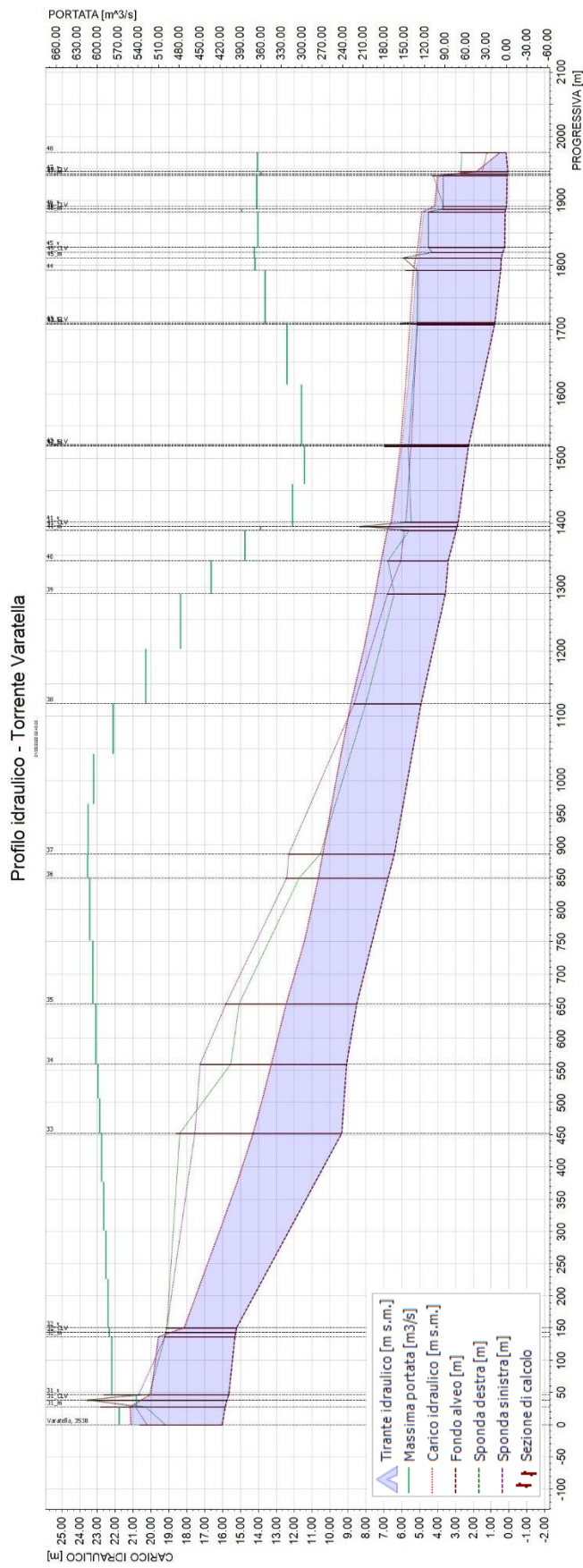


Figura 62 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR500). Da progressiva 3.531,79 m a progressiva 5.513,00 m.

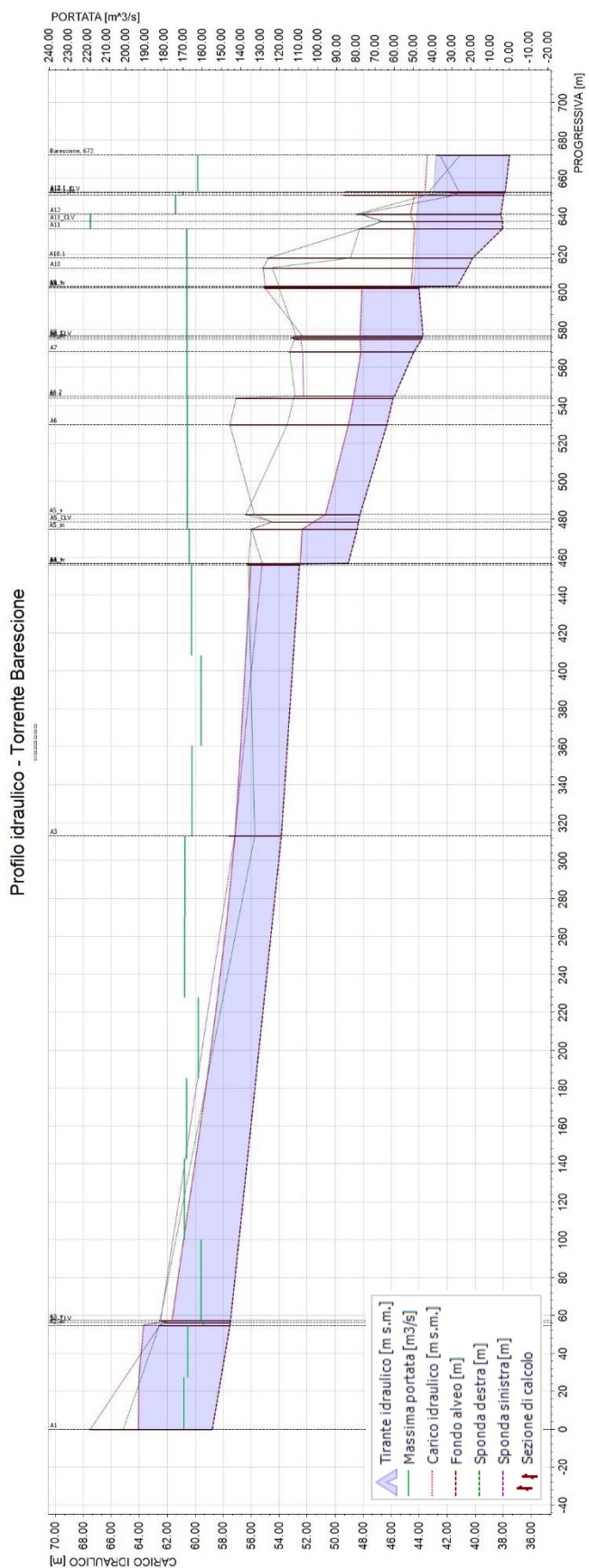


Figura 63 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Barescione (TR500).

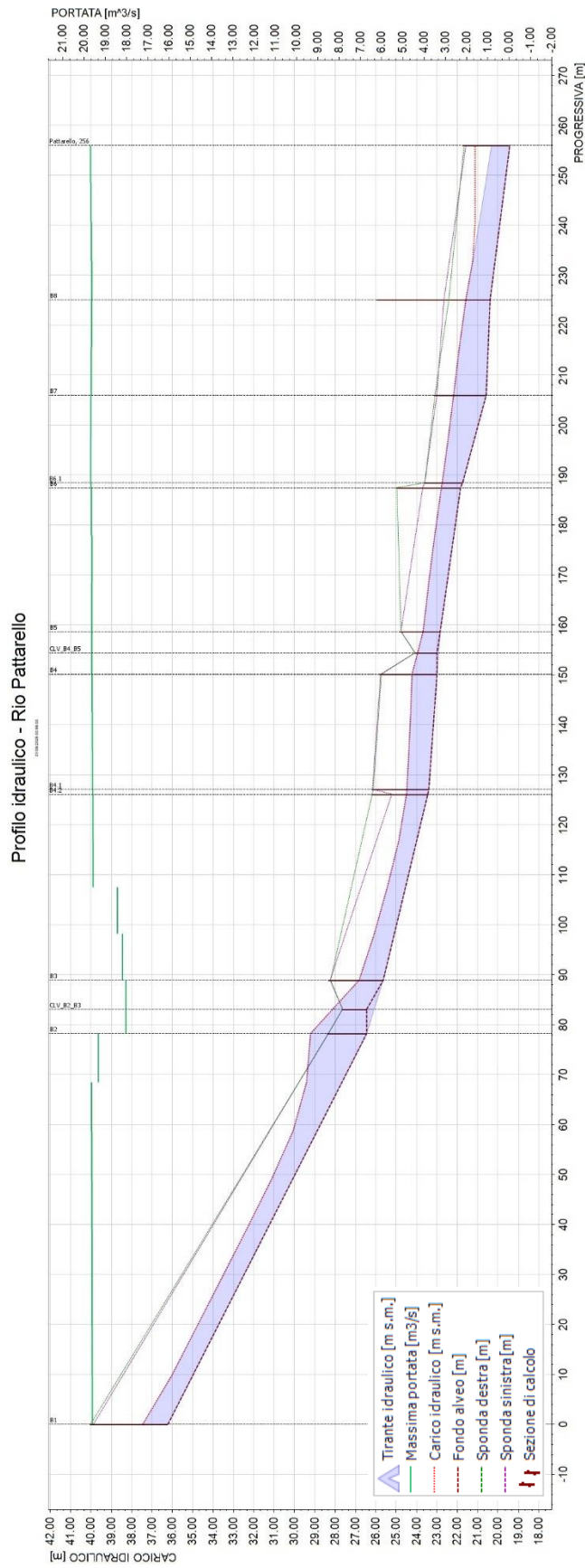


Figura 64 - Profilo di involuppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Rio Pattarello (TR500).

Focalizzandoci sul **torrente Varatella**, emerge che anche per lo scenario con tempo di ritorno pari a 500 anni, il comportamento idraulico osservato in termini di numero di Froude non si discosta in modo significativo da quanto già rilevato negli scenari precedenti.

Il valore medio risulta pari a 0,85, confermando un regime di corrente prevalentemente lenta. Pertanto, senza ripetere considerazioni già espresse nei paragrafi precedenti, si può affermare che la dinamica del deflusso mantiene caratteristiche del tutto analoghe.

È del tutto naturale che, analogamente a quanto osservato nel passaggio dal TR50 al TR200, anche nello scenario con TR500 si registri un generale incremento dei sormonti spondali. In questo caso, tali fenomeni risultano estesi lungo quasi l'intero sviluppo del corso d'acqua, fatta eccezione per poche sezioni che ne rimangono escluse.

Le velocità calcolate in alveo risultano solo leggermente superiori rispetto a quelle ottenute negli scenari precedenti; in media, si registra una velocità massima appena oltre i 5,0 m/s.

L'innalzamento generalizzato dei livelli idrici determina, come prevedibile, un aggravamento delle criticità legate agli attraversamenti. I ponti denominati CLV\_3 e CLV\_11, già soggetti a sormonto nello scenario con TR200, risultano sormontati anche in questo caso.

Rispetto allo scenario precedente, tuttavia, si osserva un incremento significativo del numero di attraversamenti che vanno in pressione, pur senza essere sormontati. Oltre a quelli già evidenziati per il TR200, si aggiungono infatti i ponti CLV\_6, CLV\_16, CLV\_23 e CLV\_32.

Passando all'analisi della portata effettivamente contenuta in alveo, il consueto confronto con la portata idrologicamente attesa (calcolata nel paragrafo 3.2.3) evidenzia un'importante differenza: a fronte di un valore teorico di 670 m<sup>3</sup>/s, la portata calcolata alla sezione di foce risulta pari a 365 m<sup>3</sup>/s. Questo significa che circa 305 m<sup>3</sup>/s si disperdono per esondazione, interessando diffusamente le aree limitrofe al corso d'acqua.

Una conferma di tale dinamica si ottiene anche dal confronto dei volumi: l'idrogramma teorico associato al TR500 prevedeva un volume complessivo di piena pari a 6.720.327 m<sup>3</sup>, mentre quello effettivamente registrato alla sezione terminale del Varatella risulta pari a 4.898.167 m<sup>3</sup>. Si stima quindi una perdita per esondazione di poco superiore a 1.800.000 m<sup>3</sup>.

Nella figura seguente è riportato il consueto confronto tra i due idrogrammi, dal quale risulta immediatamente percepibile la portata idrica dispersa lungo il tracciato.

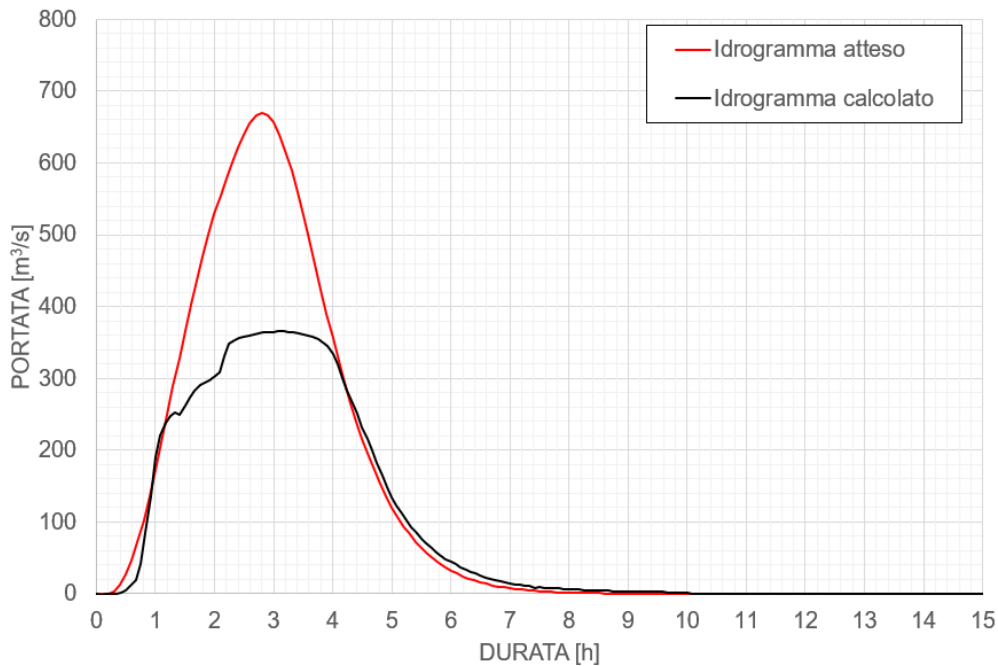


Figura 65 - Confronto tra l'idrogramma idrologico atteso e l'idrogramma calcolato alla foce (TR500). Torrente Varatella.

Passando ora all'analisi dei risultati relativi al **torrente Barescione**, si osserva — come di consueto — il comportamento del numero di Froude per una valutazione preliminare del regime di moto. Rispetto agli scenari precedenti, si registra un lieve decremento del valore medio lungo l'intero alveo, che risulta ora pari a 0,78. Ciò conferma un regime prevalentemente di corrente lenta, con valori comunque prossimi alla soglia critica.

In questo scenario, la velocità media di deflusso in alveo risulta pari a 4,6 m/s, un valore sostanzialmente in linea con quanto osservato nel precedente scenario TR200, a conferma della coerenza del comportamento idraulico del torrente Barescione anche per eventi di piena più intensi.

Nel complesso, il sormonto delle sponde non si discosta in modo sostanziale da quanto osservato nello scenario TR200: le sezioni interessate risultano pressoché le stesse. Tuttavia, si registra un incremento leggero ma diffuso dell'entità del sormonto, che lascia presagire un aumento delle portate effettivamente defluenti al di fuori dell'alveo.

Infine, l'analisi delle portate evidenzia, a differenza dei casi precedenti, uno scostamento più marcato tra l'idrogramma atteso e quello determinato dal modello numerico nella sezione terminale del tratto. Come di consueto, il confronto è illustrato nella Figura 66.

La portata di picco prevista (170 m<sup>3</sup>/s) contrasta con i circa 162 m<sup>3</sup>/s calcolati alla sezione di chiusura, indicando una dispersione per sormonto delle sponde dell'ordine di 8 m<sup>3</sup>/s.

Anche sul fronte volumetrico si registra una discrepanza significativa: il volume teorico stimato era pari a 1.061.141 m<sup>3</sup>, mentre quello ottenuto in uscita dal modello è di 1.033.955 m<sup>3</sup>, con un'esondazione complessiva di circa 27.185 m<sup>3</sup>.

La velocità media in alveo è stata stimata intorno a 3,8 m/s, mentre le criticità legate ai sormonti spondali risultano sostanzialmente analoghe a quelle riscontrate negli scenari precedenti. Come sempre, il principale punto critico rimane il primo attraversamento, denominato CLV\_B2\_B2, che continua a generare una perdita di carico significativa, provocando sia il suo sormonto che quello delle sponde circostanti. Il secondo attraversamento (CLV\_B4\_B5), pur non essendo sormontato, mantiene un comportamento critico in quanto funziona in pressione.

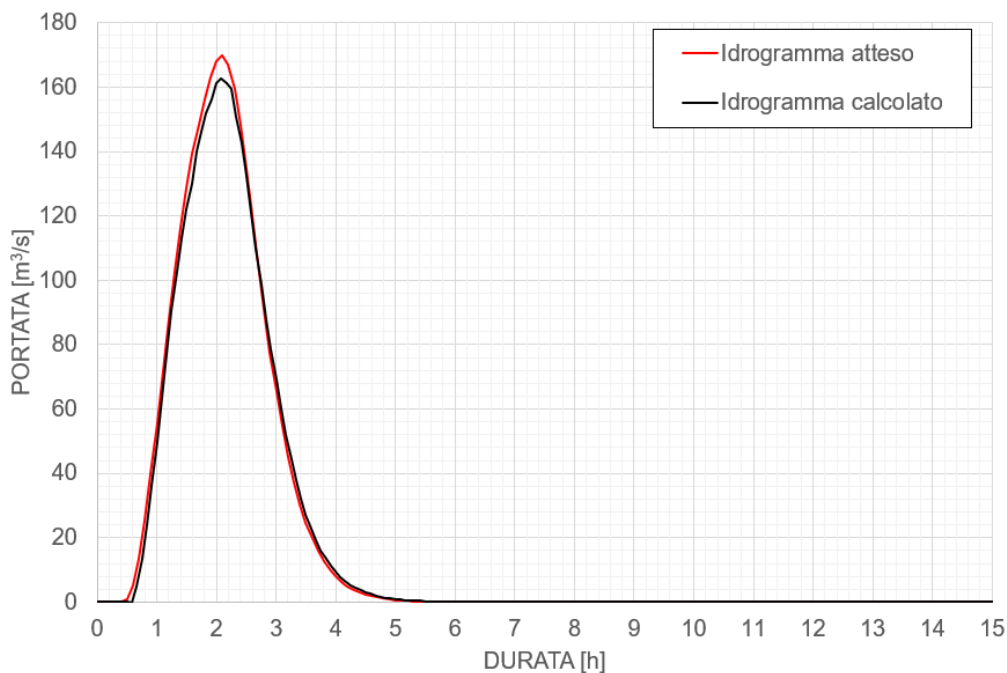


Figura 66 - Confronto tra l'idrogramma idrologico atteso e l'idrogramma calcolato alla foce (TR500). Torrente Barescione.

Si chiude l'analisi dei risultati del TR500 per il **rio Pattarello**. Come atteso, si osserva un leggero calo del numero di Froude, che nel suo insieme assume un valore medio pari a 0,78, indicativo di un regime di corrente lenta.

La velocità media in alveo è stata stimata intorno a 3,8 m/s, mentre le criticità legate ai sormonti spondali risultano sostanzialmente analoghe a quelle riscontrate negli scenari precedenti.

Il principale punto critico rimane il primo attraversamento, denominato CLV\_B2\_B3, che continua a generare una perdita di carico significativa, provocando sia il suo sormonto che quello delle sponde circostanti. Il secondo attraversamento (CLV\_B4\_B5), pur non essendo sormontato, mantiene un comportamento critico in quanto funziona in pressione.

Dal punto di vista della portata, lo scenario TR500 non evidenzia perdite significative per esondazione. Confrontando l'idrogramma teorico, elaborato nel paragrafo 3.2.3, con quello calcolato dal modello numerico alla sezione di chiusura del sistema idraulico, si osserva che la portata di colmo attesa era pari a 20 m³/s, mentre quella effettivamente calcolata è risultata di 19,7 m³/s. Questo implica che meno di 1 m³/s viene disperso per effetto di sormonto ed esondazione.

Analogamente, in termini volumetrici, l'idrogramma teorico sottendeva un volume pari a 40.381 m³, mentre il modello numerico ha stimato un volume in alveo di 40.019 m³, con una differenza di circa 360 m³ attribuibile a esondazione.

La figura che segue mostra il confronto tra i due idrogrammi.

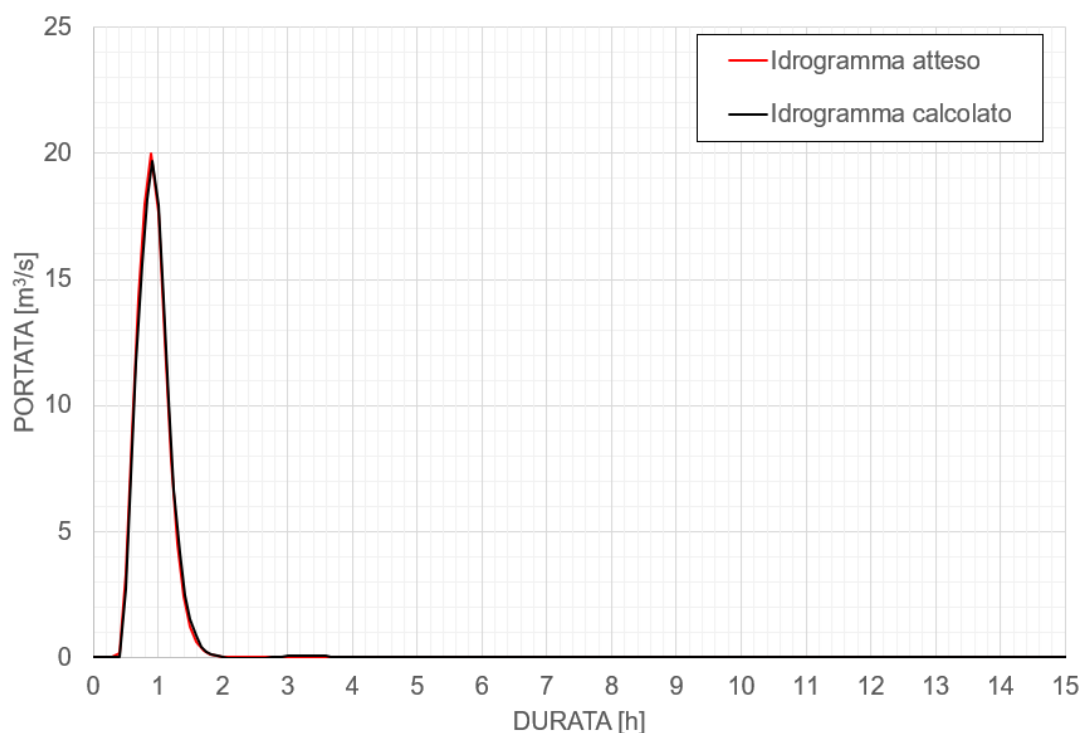


Figura 67 - Confronto tra l'idrogramma idrologico atteso e l'idrogramma calcolato alla foce (TR500). Rio Pattarello.

A conclusione dell'analisi, si propone una tabella riepilogativa dei principali risultati ottenuti dal modello monodimensionale in corrispondenza degli attraversamenti. Sono riportati i valori stimati di perdita di carico e i franchi idraulici residui, sia rispetto all'intradosso che all'estradosso dell'impalcato.

Si ricorda che un franco idraulico negativo rispetto all'intradosso indica un regime di moto in pressione, mentre un valore negativo anche rispetto all'estradosso segnala l'avvenuto sormonto dell'attraversamento.

Corso d'Acqua	ID Attraversamento	Quota intradosso [m s.m.]	Perdita di carico [m]	Franco intradosso [m s.m.]	Franco estradosso [m s.m.]
Barescione	CLV_A2	62,03	0,98	-1,66	-1,15
Barescione	CLV_A5	54,50	0,18	2,14	4,12
Barescione	CLV_A8	53,12	0,03	4,90	6,18
Barescione	CLV_A11	46,62	0,81	2,29	4,86
Barescione	CLV_12.1	41,74	0,66	-2,59	-1,03
Pattarello	CLV_B2_B3	27,64	0,94	-1,57	-0,87
Pattarello	CLV_B4_B5	24,08	0,17	-0,14	1,55
Varatella	CLV_3	91,94	1,66	-3,78	-1,92
Varatella	CLV_6	70,89	0,85	-0,16	1,83
Varatella	CLV_8	51,52	1,19	0,21	1,77
Varatella	CLV_11	42,15	0,81	-2,27	-1,55
Varatella	CLV_16	41,21	0,46	-0,33	1,34

Corso d'Acqua	ID Attraversamento	Quota intradosso [m s.m.]	Perdita di carico [m]	Franco intradosso [m s.m.]	Franco estradosso [m s.m.]
Varatella	CLV_23	33,92	0,58	-0,61	1,52
Varatella	CLV_31	23,54	0,82	2,37	5,38
Varatella	CLV_32	19,18	0,38	-0,41	2,14
Varatella	CLV_41	8,31	0,24	1,51	3,85
Varatella	CLV_42	6,91	0,02	0,84	1,69
Varatella	CLV_43	6,05	0,03	0,51	1,10
Varatella	CLV_45	4,31	0,14	-0,91	0,67
Varatella	CLV_46	3,69	0,46	-1,19	0,74
Varatella	CLV_47	2,72	0,59	-1,27	0,19

Tabella 18 - Riepilogo degli attraversamenti. Tempo di Ritorno 500 anni.

In chiusura, si ripropone il grafico già introdotto nei paragrafi precedenti, utile per una sintesi visiva immediata dello stato di funzionamento degli attraversamenti.

L'istogramma rappresenta le perdite di carico associate a ciascun manufatto, mentre lo stato idraulico è indicato mediante simboli a rombo, colorati in funzione del franco idraulico residuo: verde se positivo (deflusso libero), arancione in caso di franco nullo (attraversamento in pressione), e rosso se, oltre alla pressione, si verifica anche il sormonto dell'estradosso.

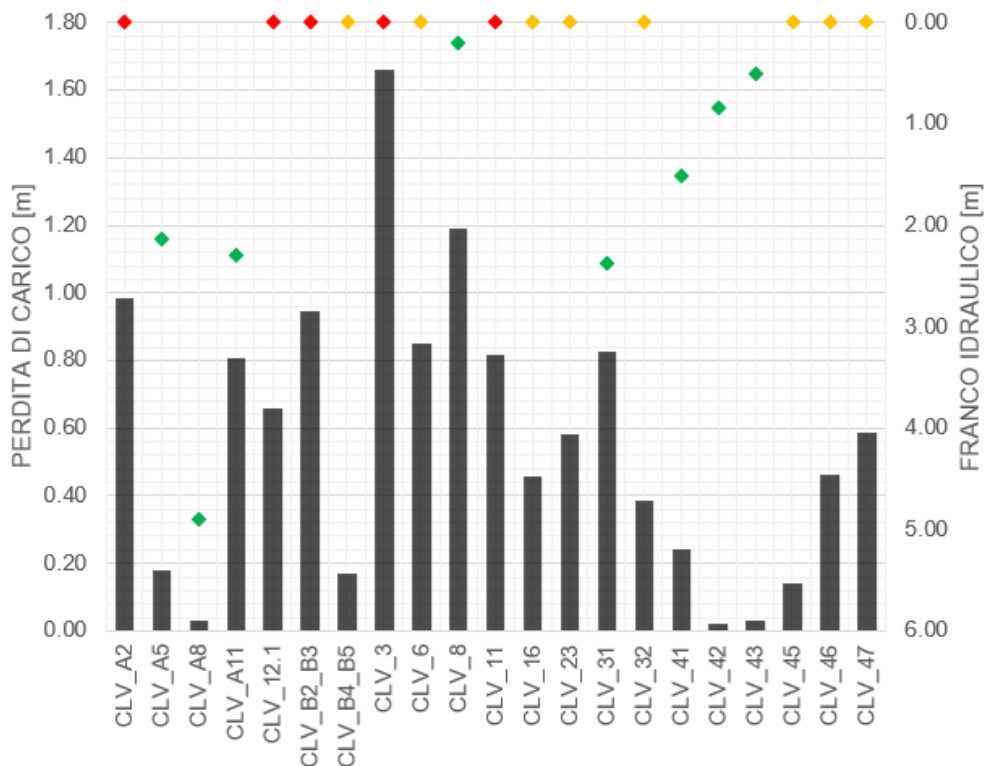


Figura 68 - Verifica degli attraversamenti, evidenza delle perdite di carico e dei franchi idraulici.TR500.

## 5.2 Analisi della propagazione delle esondazioni

Nel capitolo seguente verranno presentati i risultati ottenuti dal modello bidimensionale, che simula gli effetti delle esondazioni e dei sormonti spondali già evidenziati nell'analisi monodimensionale, illustrando come questi si propagano sul territorio circostante.

I risultati sono rappresentati mediante mappe di allegamento, nelle quali vengono riportati i massimi tiranti idrici e le massime velocità raggiunte durante l'evento di piena.

### 5.2.1 Evento di piena cinquantennale (TR50)

Nella Figura 69 e Figura 70 sono riportate, rispettivamente, le altezze massime d'acqua generate dall'esondazione e le velocità massime raggiunte durante l'evento di piena.

Il primo tratto interessato da fenomeni di esondazione è quello in corrispondenza dell'attraversamento della SP60, identificato nella modellazione monodimensionale come CLV\_3. Il rigurgito provocato dalla presenza dell'opera determina il sormonto delle sponde e l'allagamento della strada provinciale adiacente, con una propagazione dell'acqua che si estende verso valle per circa 300 metri.

Altre esondazioni si riscontrano nel tratto compreso tra la sezione 9 e la sezione 25. Si tratta di fenomeni piuttosto sporadici e distribuiti in modo disomogeneo lungo entrambe le sponde, con alternanza tra destra e sinistra. Le aree interessate sono prevalentemente costituite da terreni agricoli e zone non urbanizzate, anche se in alcuni casi la propagazione dell'acqua si avvicina a edifici isolati.

La maggior parte delle esondazioni si concentra all'interno del centro abitato di Borghetto Santo Spirito, la cui conformazione morfologica favorisce la propagazione dell'acqua lungo la rete stradale e, per effetto dell'orografia circostante, ne accentua l'accumulo.

I punti specifici di sormonto delle sponde sono già stati individuati nell'analisi condotta con il modello monodimensionale, sia in termini di superamento degli argini che di volumi idrici effettivamente dispersi. Un elemento rilevante è la presenza della linea ferroviaria, il cui rilevato agisce come una sorta di barriera al deflusso, rallentando la propagazione delle acque. Tuttavia, alcuni attraversamenti presenti lungo il tracciato ferroviario consentono comunque il passaggio di parte delle portate verso valle.

Va comunque precisato che i tiranti idrici simulati al suolo risultano in parte sovrastimati, poiché la modellazione bidimensionale adottata, per quanto dettagliata, non è in grado di rappresentare in modo esaustivo tutti i possibili percorsi di deflusso reale che l'acqua potrebbe seguire nel territorio. In particolare, non vengono considerati eventuali sistemi di drenaggio urbano, scarichi secondari o variazioni locali che, nella realtà, contribuirebbero a smaltire parzialmente i volumi esondati.

I due corsi d'acqua minori, il Barescione e il Pattarello, risultano completamente esenti da fenomeni di esondazione nello scenario TR50. Questo comportamento era stato già anticipato nell'analisi dei risultati ottenuti con la modellazione monodimensionale, in cui il confronto tra gli idrogrammi teorici e quelli effettivamente calcolati alla sezione di chiusura aveva evidenziato una sostanziale coerenza in termini di portata e volume, indicando che l'intero deflusso si mantiene contenuto all'interno dell'alveo.

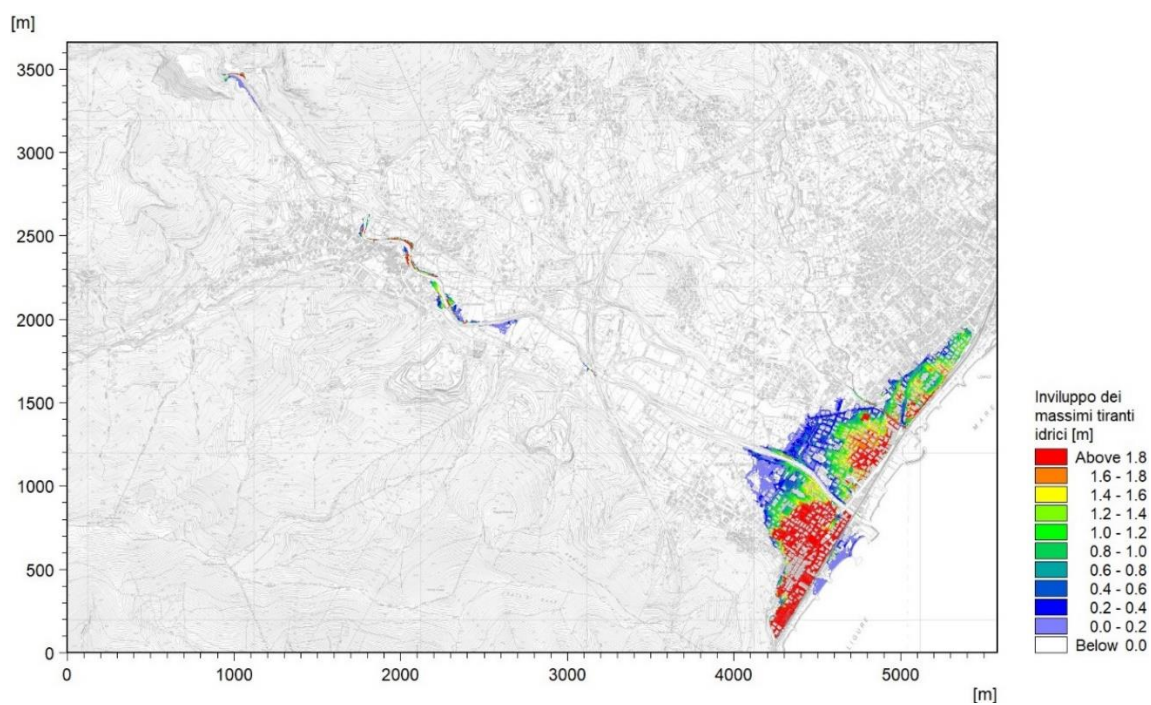


Figura 69 - Inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 50 anni.

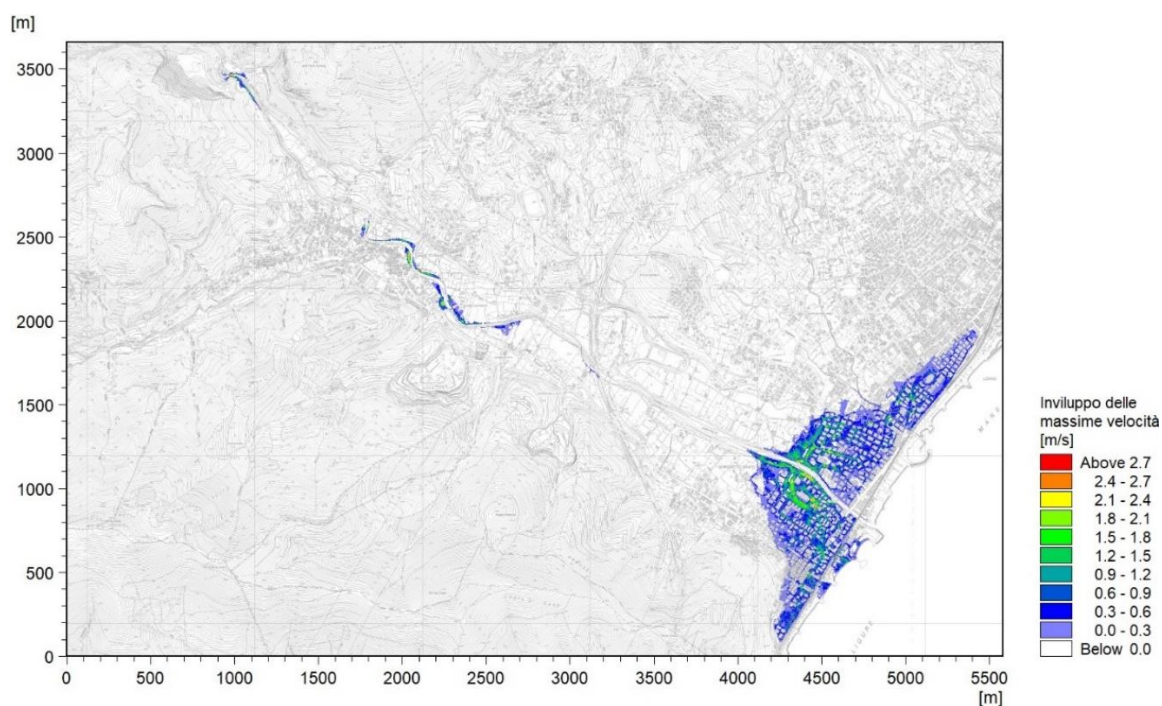


Figura 70 - Inviluppo delle massime velocità rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 50 anni

## 5.2.2 Evento di piena duecentennale (TR200)

Passiamo ora alla presentazione dei risultati ottenuti per lo scenario di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni (TR200). Nella Figura 71 e nella Figura 72 sono riportate, rispettivamente, le altezze massime d'acqua associate all'esondazione e le velocità massime raggiunte durante l'evento.

Nel complesso, le dinamiche di esondazione non presentano variazioni significative rispetto a quanto osservato nello scenario TR50.

In particolare, gli effetti generati dall'attraversamento CLV\_3 risultano pressoché invariati, con un'estensione delle aree allagate solo leggermente più ampia.

In questo scenario si aggiunge tuttavia un nuovo punto di fuoriuscita in corrispondenza della sezione 5: la portata fuoriuscita interessa prevalentemente l'area in sponda sinistra.

Ulteriori incrementi localizzati delle aree esondate si riscontrano nei pressi del ponte di Via della Certosa (CLV\_8), da cui originano allagamenti che si sviluppano lungo la sponda sinistra del torrente.

Proseguendo verso valle, almeno fino alla sezione 24, si osservano esondazioni leggermente più estese rispetto a quelle già individuate nello scenario TR50.

Nel tratto compreso tra la sezione 24 e l'attraversamento autostradale si osserva un ampliamento delle aree esondate rispetto allo scenario TR50, sebbene le dinamiche di propagazione risultino sostanzialmente analoghe. L'incremento dei volumi idrici coinvolti è naturalmente legato alla maggiore intensità dell'evento di piena considerato.

Avvicinandosi all'abitato di Borghetto Santo Spirito, le esondazioni appaiono leggermente più estese e caratterizzate da tiranti idrici mediamente più elevati. Le aree interessate risultano in gran parte coincidenti con quelle già colpite nello scenario precedente, fatta eccezione per un diffuso sormonto della sede ferroviaria, dovuto all'accumulo e alla canalizzazione dei deflussi nella zona a monte dell'infrastruttura.

Vale infine la pena ricordare che, anche in questo scenario, la modellazione bidimensionale ha tenuto conto degli attraversamenti ferroviari, che offrono comunque un parziale sfogo dei deflussi verso valle e verso mare.

In questo scenario, a differenza di quanto osservato nel caso precedente, si registrano alcune esondazioni lungo il tracciato del torrente Barescione, seppur di entità contenuta. In corrispondenza del ponte di Via Biandasse si rilevano modesti fenomeni di fuoriuscita in sponda sinistra a monte dell'attraversamento, seguiti da ulteriori esondazioni in sponda destra a valle del ponte.

Ulteriori allagamenti di lieve entità si manifestano anche a valle della sezione A3 e a monte dell'attraversamento della SP60, interessando principalmente la sponda sinistra idraulica. È importante sottolineare che, come confermato anche dalle simulazioni monodimensionali, i volumi idrici fuoriusciti risultano molto limitati — nell'ordine di circa 3.600 m<sup>3</sup> — e i relativi tiranti al suolo si mantengono pertanto contenuti.

Considerazioni analoghe valgono anche per il rio Pattarello. Gli effetti già evidenziati in corrispondenza dell'attraversamento della SP60 determinano una modesta esondazione, con fuoriuscita di portata dall'alveo che coinvolge la sede stradale della provinciale e si propaga in direzione sud-est, interessando alcune aree adiacenti. Anche in questo caso, i tiranti idrici risultano molto contenuti, coerentemente con i volumi di esondazione stimati, che si mantengono su valori molto ridotti.

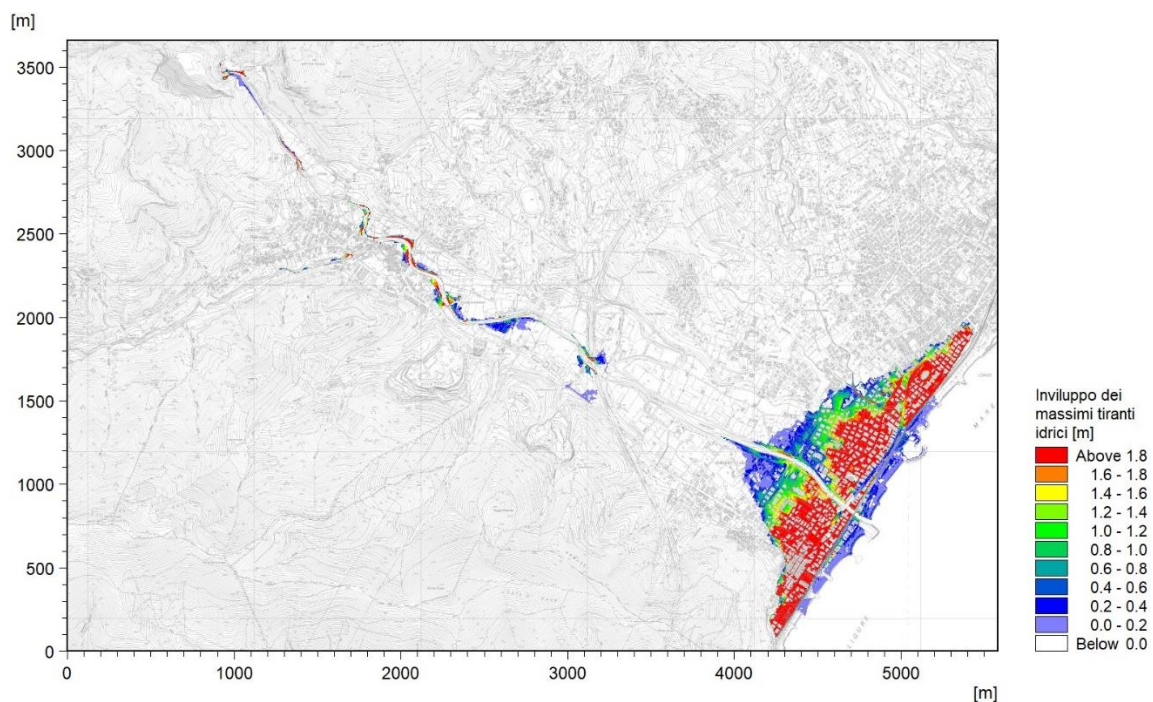


Figura 71 - Inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 200 anni.

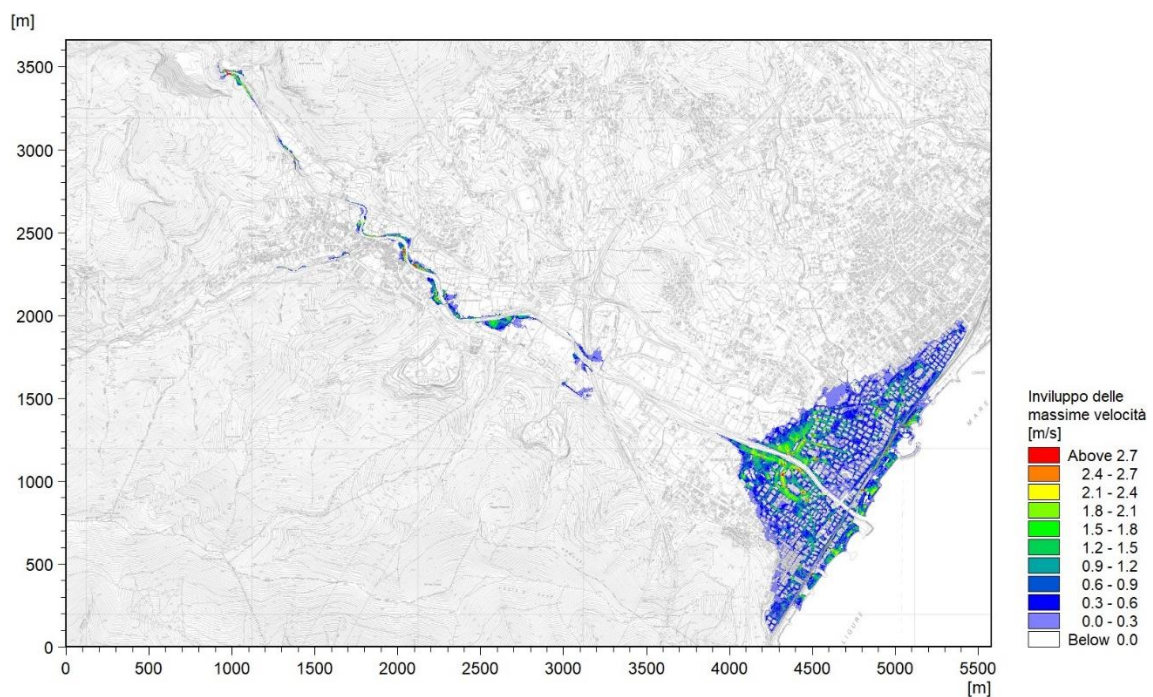


Figura 72 - Inviluppo delle massime velocità rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 200 anni.

### 5.2.3 Evento di piena cinquecentennale (TR500)

Concludiamo l'analisi delle mappe di esondazione con lo scenario caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 500 anni. Come già anticipato, la Figura 73 e la Figura 74 riportano rispettivamente le altezze massime d'acqua generate dall'esondazione e le velocità massime raggiunte durante l'evento di piena.

Nel complesso, la dinamica di propagazione dell'esondazione risulta coerente con quanto osservato negli scenari precedenti; tuttavia, l'entità dei volumi idrici fuoriusciti nel torrente Varatella è decisamente maggiore, comportando un'estensione più ampia delle superfici interessate dai deflussi al suolo.

L'aspetto più significativo introdotto da questo scenario riguarda l'attivazione di una nuova area di esondazione lungo la sponda sinistra idraulica, compresa tra il ponte autostradale e l'ingresso nell'abitato di Borghetto Santo Spirito. Si tratta principalmente di zone agricole con la presenza sporadica di edifici, che nei precedenti scenari risultavano totalmente escluse dai fenomeni di allagamento.

Per quanto riguarda il centro abitato di Borghetto, non si riscontrano variazioni rilevanti rispetto allo scenario TR200, confermando l'assetto delle esondazioni già descritto in precedenza.

Infine, anche nel torrente Barescione si osserva un'intensificazione delle esondazioni, con un incremento più marcato dei deflussi superficiali lungo la sponda destra idraulica. Questi tendono a propagarsi lungo la Strada Provinciale, coinvolgendo alcuni edifici presenti in prossimità del corso d'acqua e interessando anche il Parco del Marchese, situato nelle immediate vicinanze.

Per quanto riguarda il rio Pattarello, la dinamica di esondazione risulta sostanzialmente analoga a quella già descritta per lo scenario TR200, con la sola differenza di una modesta estensione delle aree allagate, coerente con l'incremento dei volumi d'acqua generati dall'evento di piena più severo.

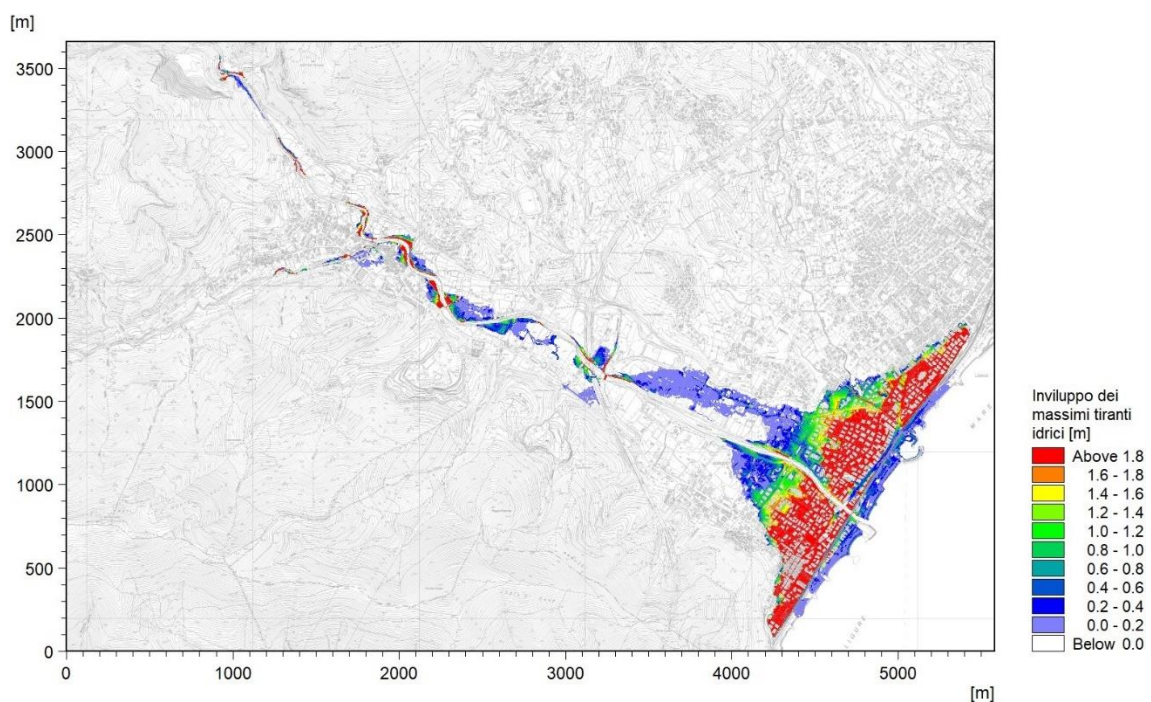


Figura 73 - Inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 500 anni.

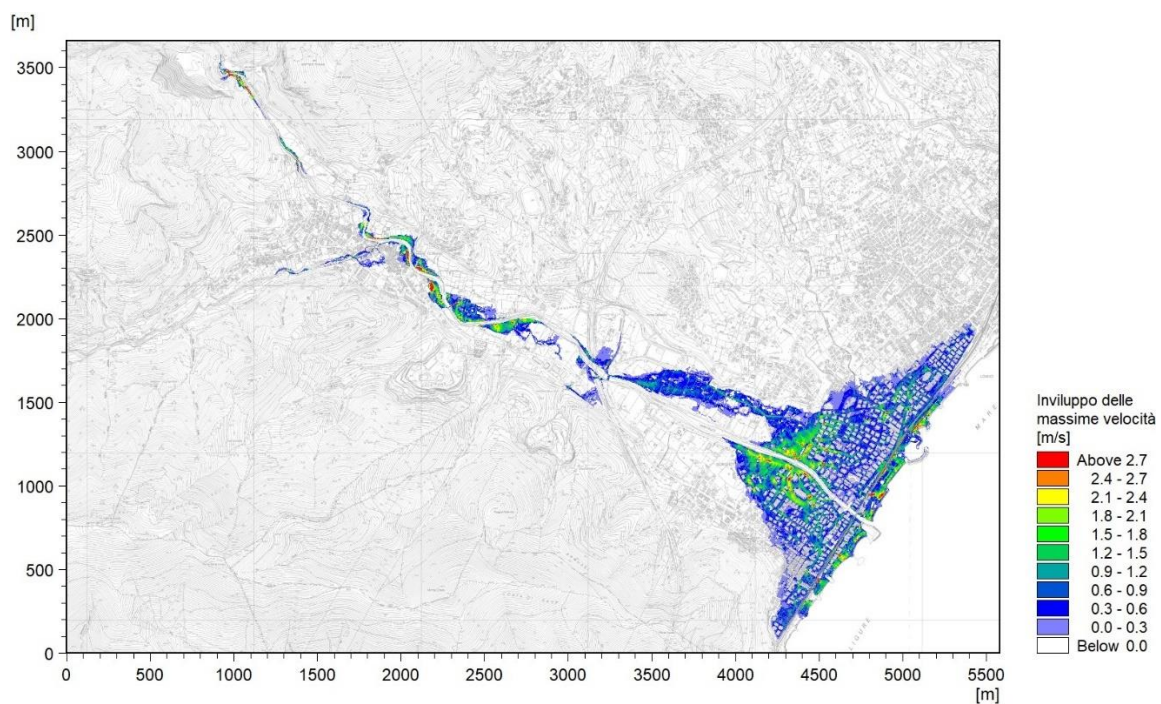


Figura 74 - Inviluppo delle massime velocità rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 500 anni.

### 5.3 Confronto con le fasce di pericolosità vigenti

A valle della modellazione numerica idraulica svolta nel presente studio, è stato effettuato un confronto tra le aree potenzialmente soggette a esondazione, individuate per i tre eventi di progetto (TR50, TR200 e TR500), e le fasce di pericolosità idraulica vigenti (rispettivamente Fascia A, B e C) del Piano di Bacino attualmente in vigore.

Tale confronto ha evidenziato differenze significative, sia in termini di estensione che di localizzazione delle aree allagabili, a conferma della necessità di un aggiornamento basato su dati, metodologie e condizioni di riferimento più attuali.

In particolare, lungo il tratto intermedio del torrente Varatella, la modellazione condotta non mostra fenomeni di esondazione per nessuno dei tre eventi considerati, mentre le fasce vigenti individuano in questo settore un'area esondabile estesa, ricadente prevalentemente in Fascia A e B. Questo disallineamento potrebbe essere attribuito a interventi di adeguamento idraulico intervenuti nel periodo successivo alla redazione del Piano di Bacino, che non risultano pienamente recepiti nella pianificazione vigente. Tra questi si segnalano, ad esempio, le modifiche al tratto compreso tra l'autostrada e l'abitato di Borghetto Santo Spirito, che potrebbero aver migliorato sensibilmente la capacità di deflusso del reticolo.

Al contrario, proprio nell'abitato di Borghetto, le simulazioni attuali mostrano esondazioni più estese rispetto alle fasce vigenti, in particolare in direzione nord-est, suggerendo una maggiore vulnerabilità idraulica in ambito urbano rispetto a quanto precedentemente stimato.

Anche nei bacini minori del torrente Barescione e del rio Pattarello si osservano discrepanze rilevanti: le nuove simulazioni restituiscono un quadro di esondazione molto più contenuto, con un'assenza quasi totale di allagamenti nelle aree limitrofe agli alvei, in netto contrasto con le fasce A e B attualmente previste.

Tali differenze sono giustificabili e attese, alla luce di molteplici fattori: l'evoluzione del territorio, le opere di sistemazione idraulica eventualmente realizzate nel tempo, nonché il fatto che il Piano di Bacino vigente si basa su analisi condotte con metodologie differenti e su dati meno aggiornati rispetto a quelli disponibili oggi. Inoltre, i modelli utilizzati nel presente studio si avvalgono di una rappresentazione spaziale più dettagliata e di una modellazione idraulica bidimensionale, che consente una stima più realistica dei fenomeni di propagazione delle piene.

A supporto di queste considerazioni, nel seguito si riportano tre mappe di confronto, relative ai tre scenari di progetto (TR50, TR200 e TR500), in cui si mettono a confronto le aree di esondazione ottenute dalla presente modellazione con le corrispondenti fasce di pericolosità (A, B e C) del piano vigente, al fine di evidenziare in modo chiaro le aree di coerenza e di disallineamento tra le due fonti.

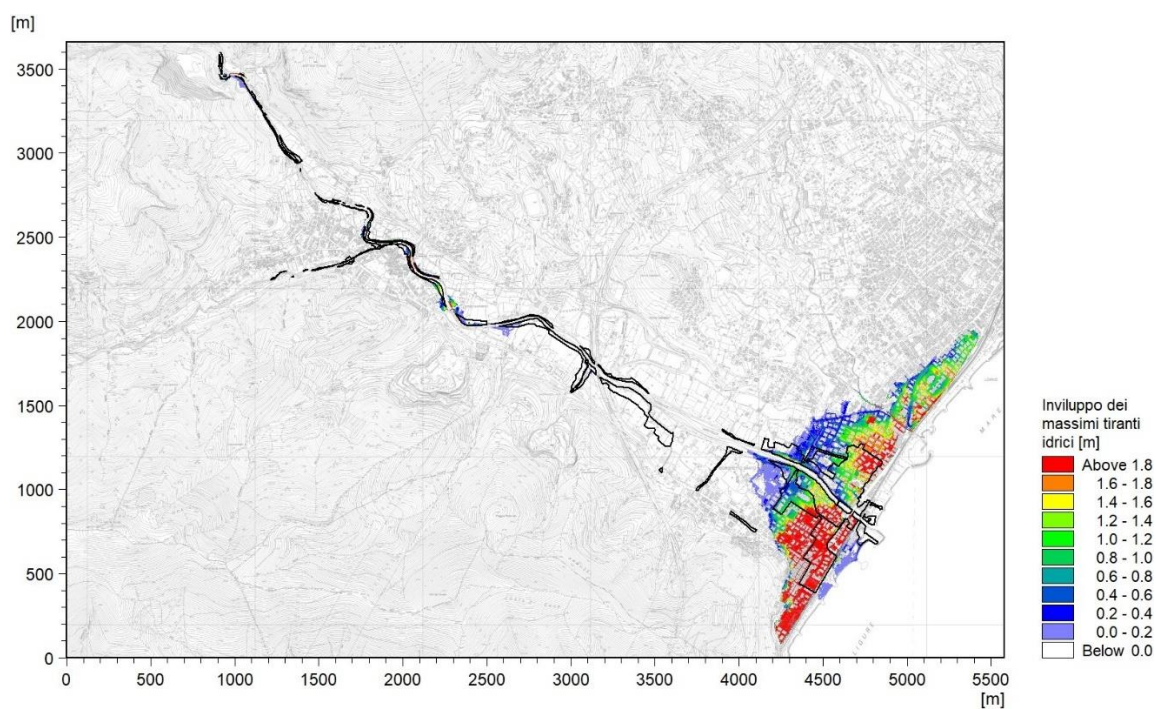


Figura 75 - Mappa di confronto tra le esondazioni simulazione nel presente studio (TR50) e la fascia A del vigente Piano di Bacino.

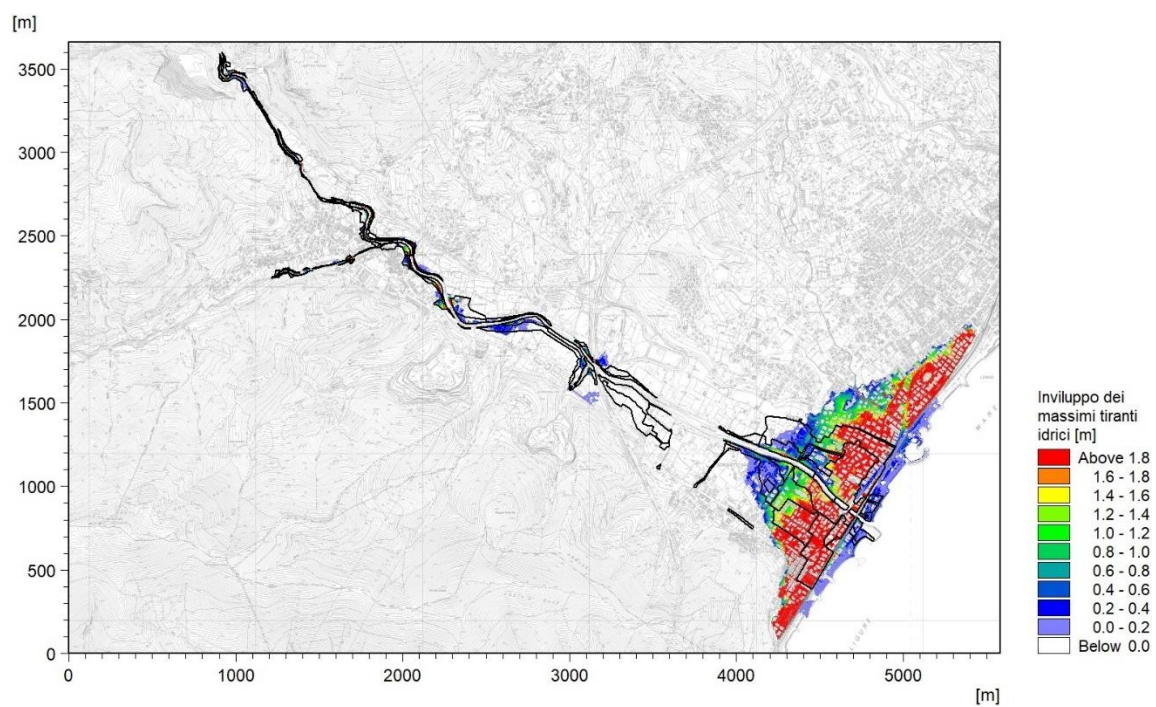


Figura 76 - Mappa di confronto tra le esondazioni simulazione nel presente studio (TR200) e la fascia B del vigente Piano di Bacino.

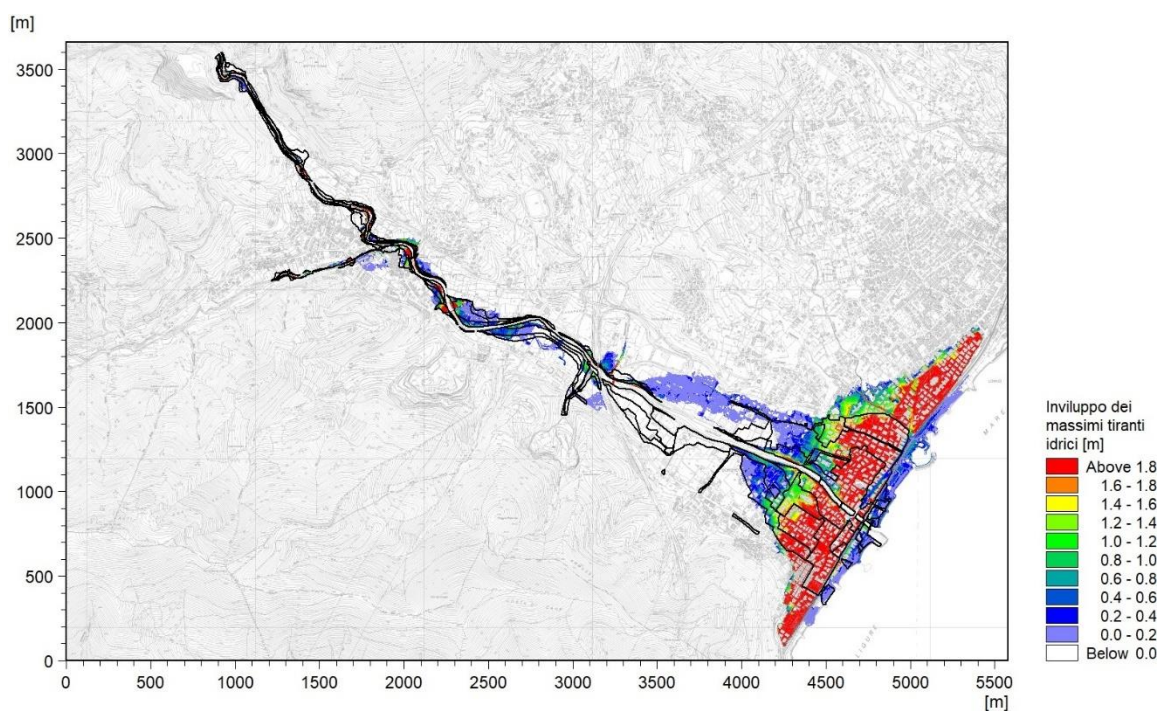


Figura 77 - Mappa di confronto tra le esondazioni simulazione nel presente studio (TR500) e la fascia C del vigente Piano di Bacino.

## 6 Analisi di sensitività dei risultati

### 6.1 Scenario con carenza di franco e ridotta capacità di deflusso

Nell'ambito delle valutazioni relative al rischio idraulico, un aspetto di fondamentale importanza riguarda l'analisi di sensitività dei risultati ottenuti nelle simulazioni idrologico-idrauliche, con riferimento a condizioni operative meno favorevoli rispetto a quelle assunte nello scenario di funzionamento ordinario.

In particolare, il presente capitolo approfondisce gli effetti di una carenza di franco idraulico nel deflusso delle piene, con l'obiettivo di includere un coefficiente di sicurezza nella determinazione delle potenziali aree soggette a esondazione, come richiesto dal quadro normativo e contrattuale vigente.

In linea con approcci consolidati già adottati in altri studi sul territorio ligure, la verifica è stata condotta attraverso simulazioni accessorie, mantenendo inalterate le condizioni pluviometriche dei tre eventi di progetto considerati (TR50, TR200 e TR500), ma modificando alcuni parametri geometrici e strutturali del modello per rappresentare un sistema idraulico in condizioni degradate.

Nello specifico, le assunzioni modellistiche introdotte per simulare la condizione di minore efficienza idraulica sono:

- l'innalzamento rigido del fondo alveo di 30 cm, al fine di simulare fenomeni di interrimento o accumulo di materiale, con conseguente riduzione del franco spondale disponibile al passaggio dell'onda di piena;
- la parzializzazione delle sezioni dei ponti del 10%, per tener conto della possibile ostruzione parziale dovuta a detriti flottanti, vegetazione o manutenzione carente.

L'obiettivo è valutare quanto tali variazioni influenzino i risultati in termini di livelli idrici, portate circolanti ed estensione delle aree esondate, con riferimento a ciascun tempo di ritorno.

#### 6.1.1 Evento di piena cinquantennale (TR50)

Nel seguito sono presentati i risultati dell'analisi di sensitività condotta sia con il modello monodimensionale, mediante i profili idraulici rappresentati dalla Figura 72 alla Figura 88, sia con il modello bidimensionale, limitatamente alle mappe di inviluppo dei massimi tiranti idrici di esondazione (Figura 83).

I risultati mostrano un incremento generalizzato dei livelli idrici lungo l'intero tratto modellato, con un conseguente sormonto più diffuso delle sponde. La mappa bidimensionale evidenzia anche un aumento, seppur contenuto, delle aree allagate rispetto allo scenario ordinario.

L'entità degli incrementi risulta in generale modesta, sia in termini di superficie allagata che di tiranti idrici.

Un esempio significativo è riscontrabile sul rio Pattarello, dove la maggiore criticità è riconducibile all'ostruzione parziale dell'attraversamento CLV\_B2\_B3, che genera una lieve area di esondazione non presente nello scenario base. Questi risultati confermano la sensibilità locale del reticolo idrografico a condizioni di deflusso penalizzato, anche in presenza di variazioni geometriche relativamente limitate.

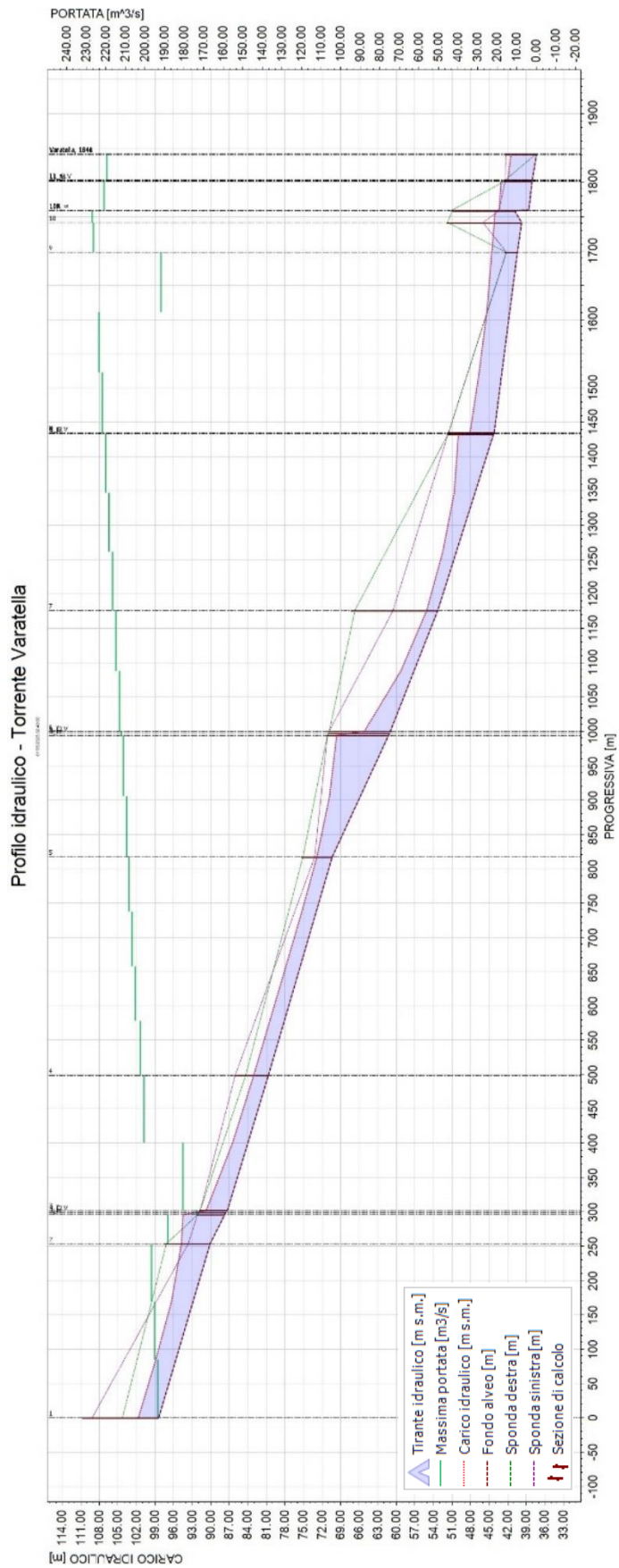


Figura 78 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR50). Da progressiva 0,00 m a progressiva 1.840,06 m. Scenario 1 di sensitività.



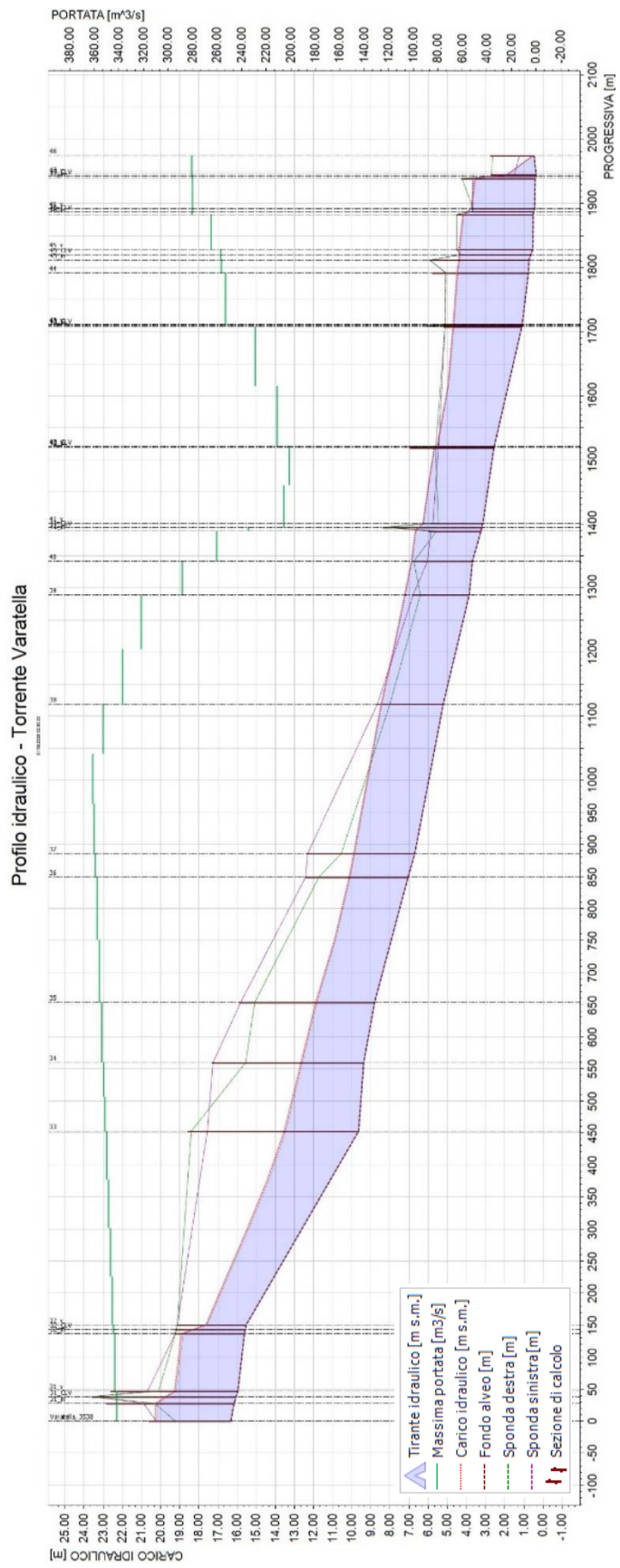


Figura 80 - Profilo di involucro dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR50). Da progressiva 3.531,79 m a progressiva 5.513,00 m. Scenario 1 di sensitività.

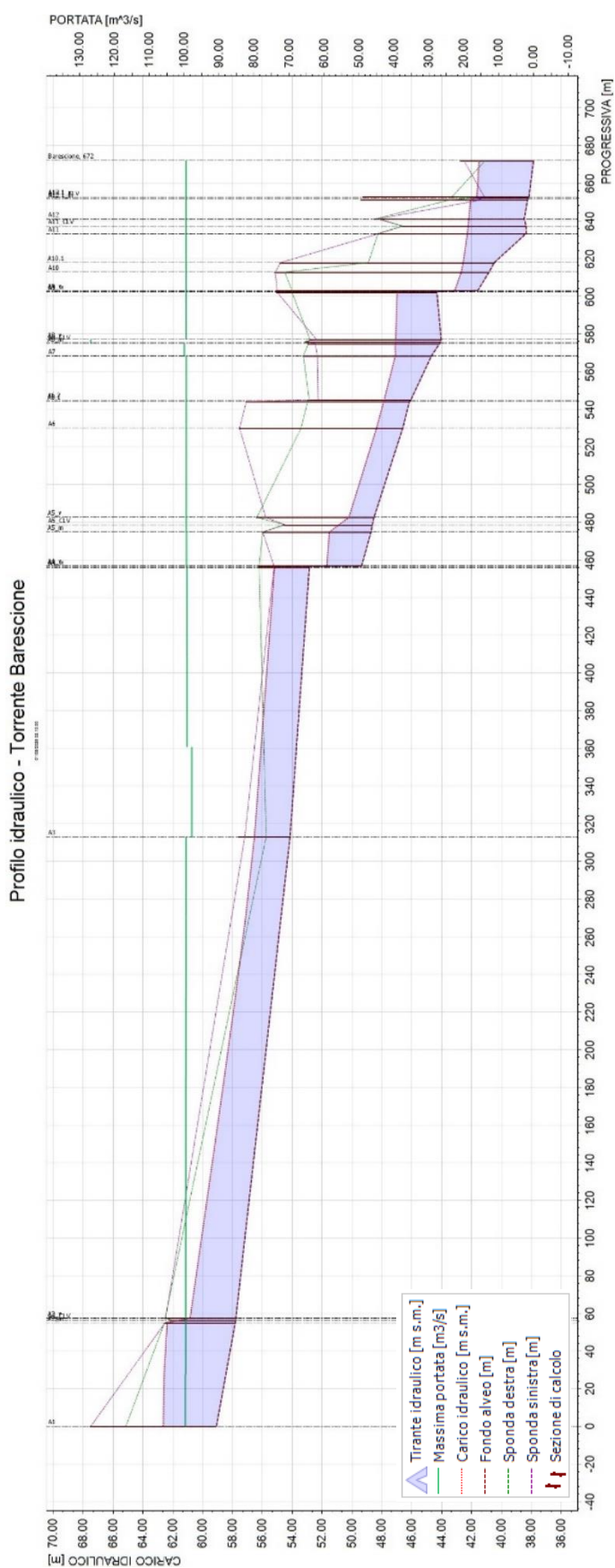


Figura 81 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Barescione (TR50). Scenario 1 di sensitività.

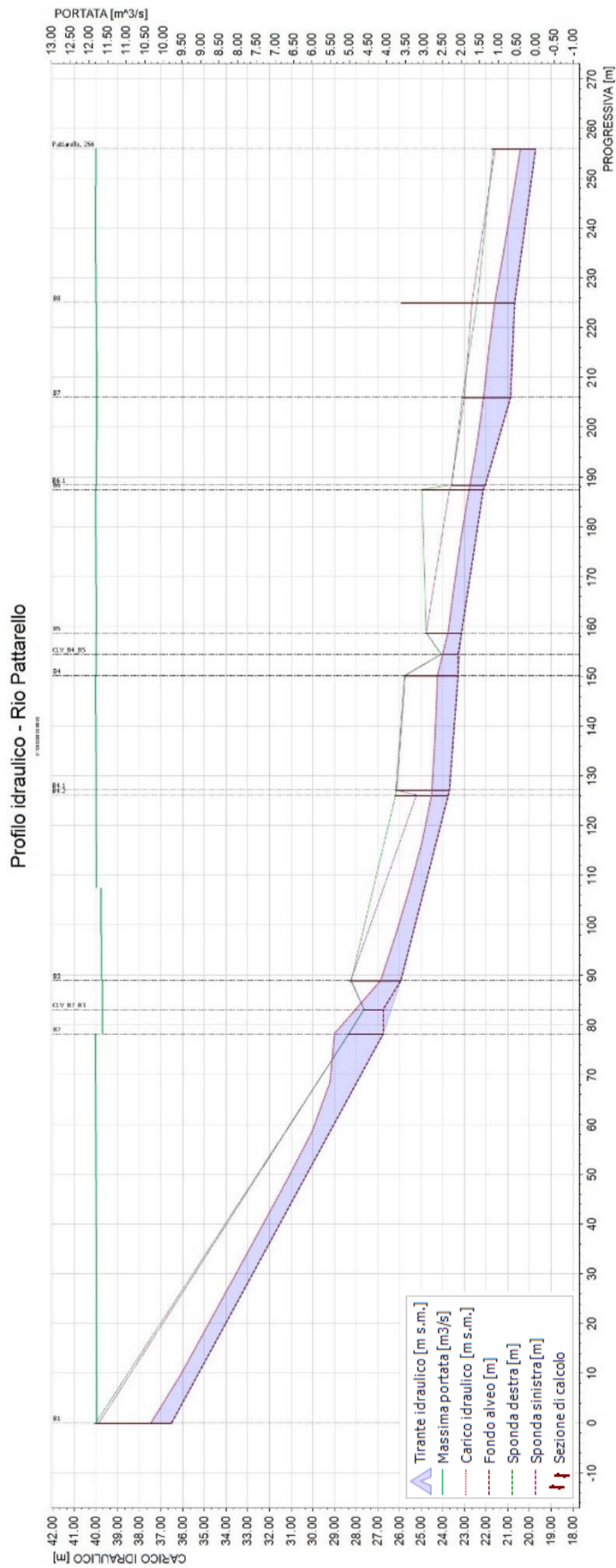


Figura 82 - Profilo di involuppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Rio Pattarello (TR50). Scenario 1 di sensitività.

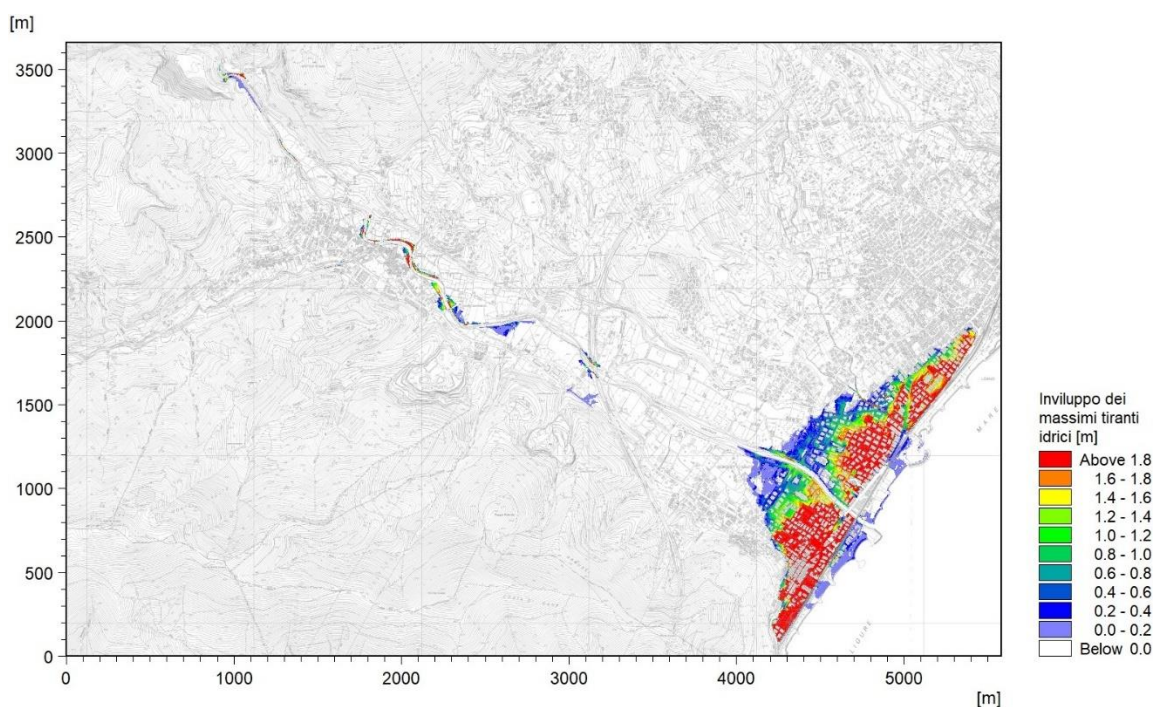


Figura 83 - Inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 50 anni. Scenario 1 di sensibilità.

### 6.1.2 Evento di piena duecentennale (TR200)

I risultati ottenuti per il tempo di ritorno TR200 confermano, nella sostanza, le dinamiche osservate per l'evento con TR50, con un generale incremento dei livelli idrici in alveo e una lieve espansione delle aree allagate, coerente con le ipotesi penalizzanti adottate nell'ambito dell'analisi di sensibilità. La risposta del sistema risulta quindi qualitativamente simile, ma con alcune differenze localizzate che meritano attenzione.

In particolare, si segnala un incremento delle esondazioni lungo il torrente Varatella, nel tratto compreso tra l'autostrada e l'abitato di Borghetto Santo Spirito.

In questo settore, l'allagamento - che nello scenario base si manifestava solo con l'evento estremo TR500 - compare già con il TR200, a conferma della maggiore vulnerabilità idraulica introdotta dalle condizioni degradate simulate (innalzamento del fondo alveo e parzializzazione degli attraversamenti).

Questo comportamento evidenzia come, anche in presenza di modifiche relativamente contenute alla geometria del sistema, il superamento della capacità di contenimento possa verificarsi con eventi meno estremi, anticipando fenomeni di esondazione in aree urbanizzate e sensibili dal punto di vista del rischio.

Nel seguito sono riportati i profili idraulici (da Figura 78 a Figura 82) e la mappa di inviluppo dei massimi tiranti idrici (Figura 83).

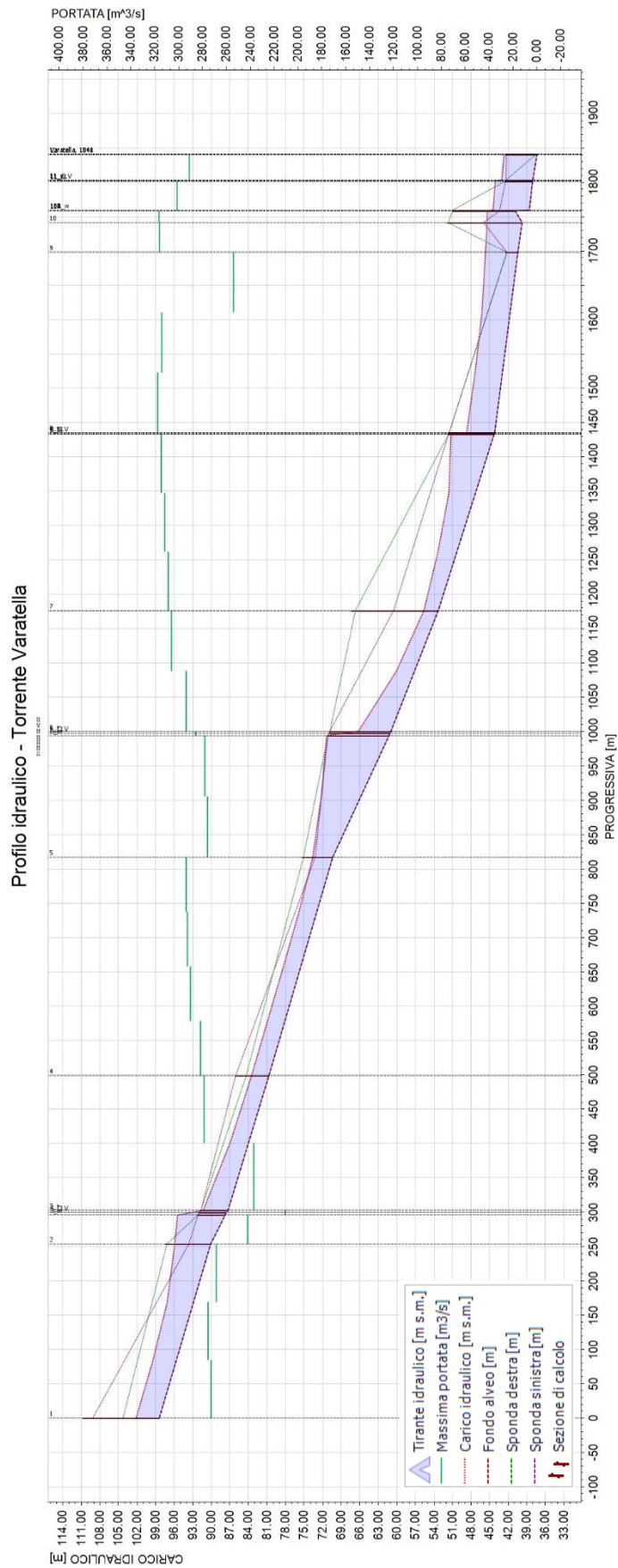


Figura 84 - Profilo di involucro dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR200). Da progressiva 0,00 m a progressiva 1.840,06 m. Scenario 1 di sensitività.

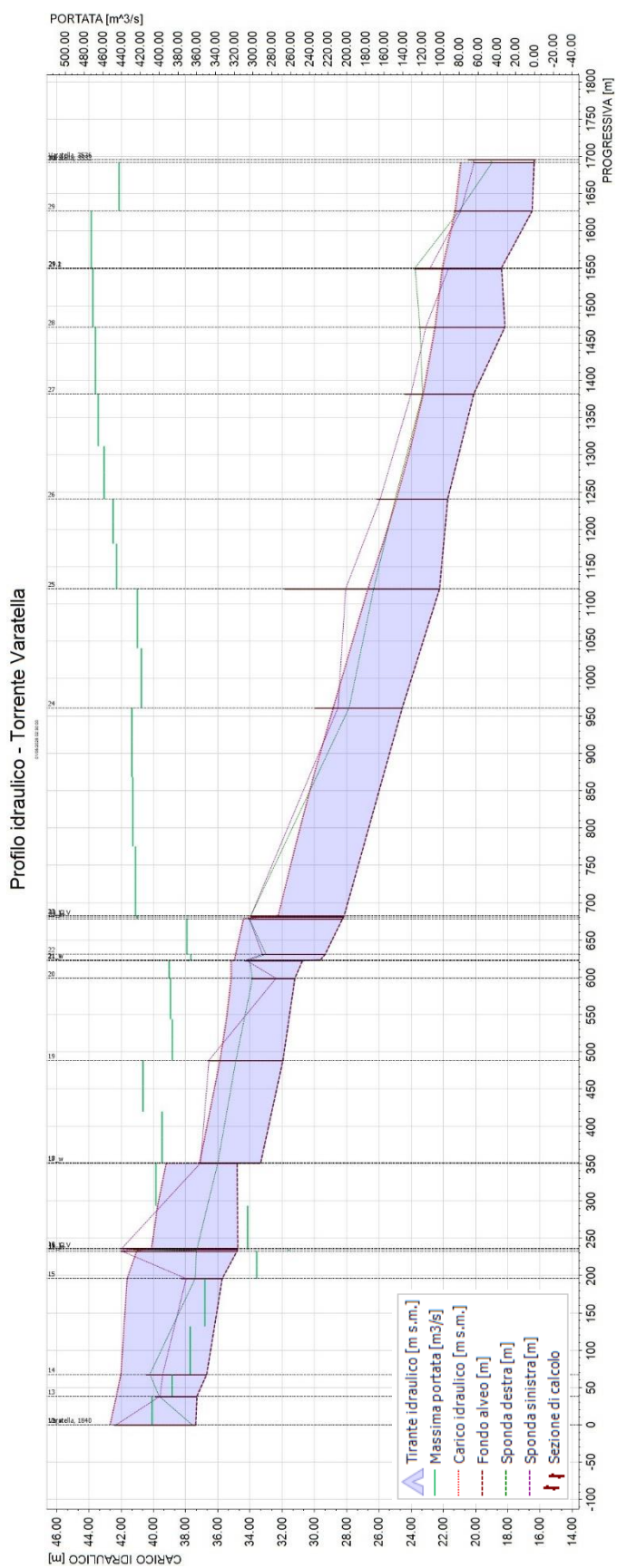


Figura 85 - Profilo di involucro dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR200). Da progressiva 1.840,06 m a progressiva 3.531,79 m. Scenario 1 di sensitività.

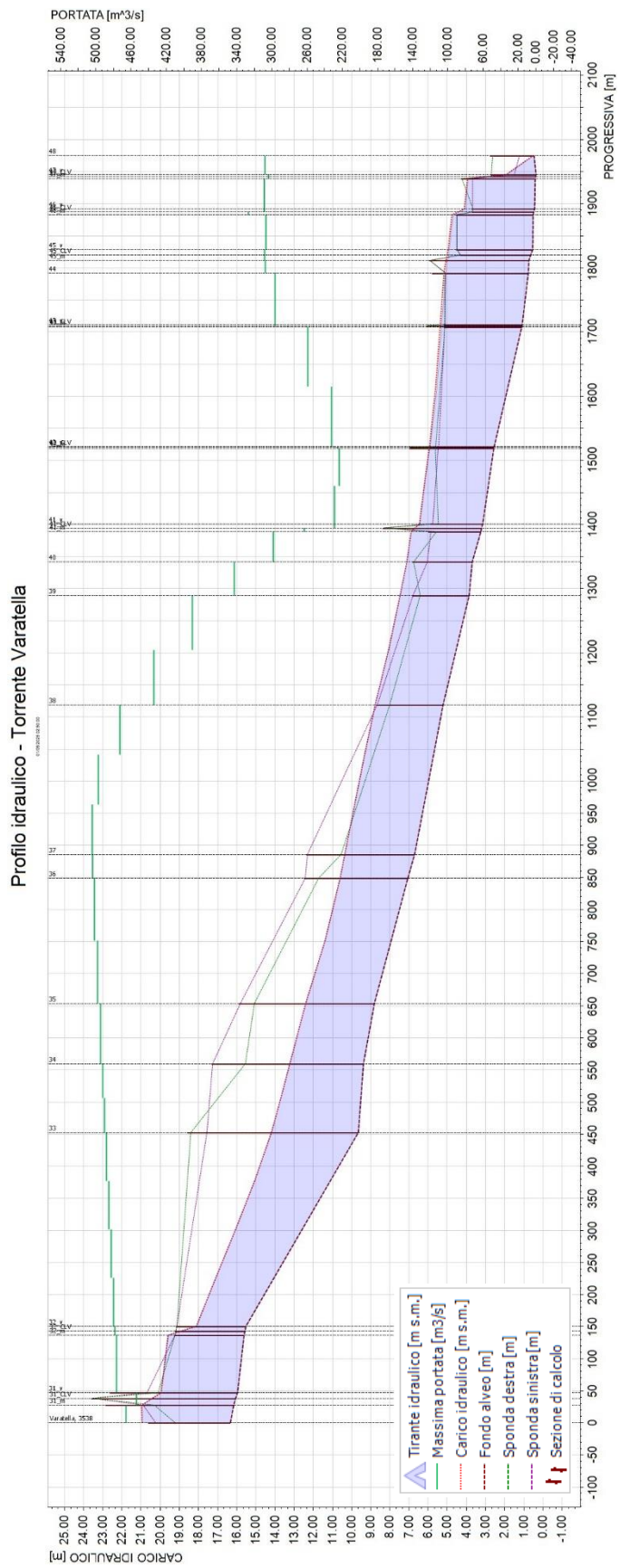


Figura 86 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR200). Da progressiva 3.531,79 m a progressiva 5.513,00 m. Scenario 1 di sensitività.

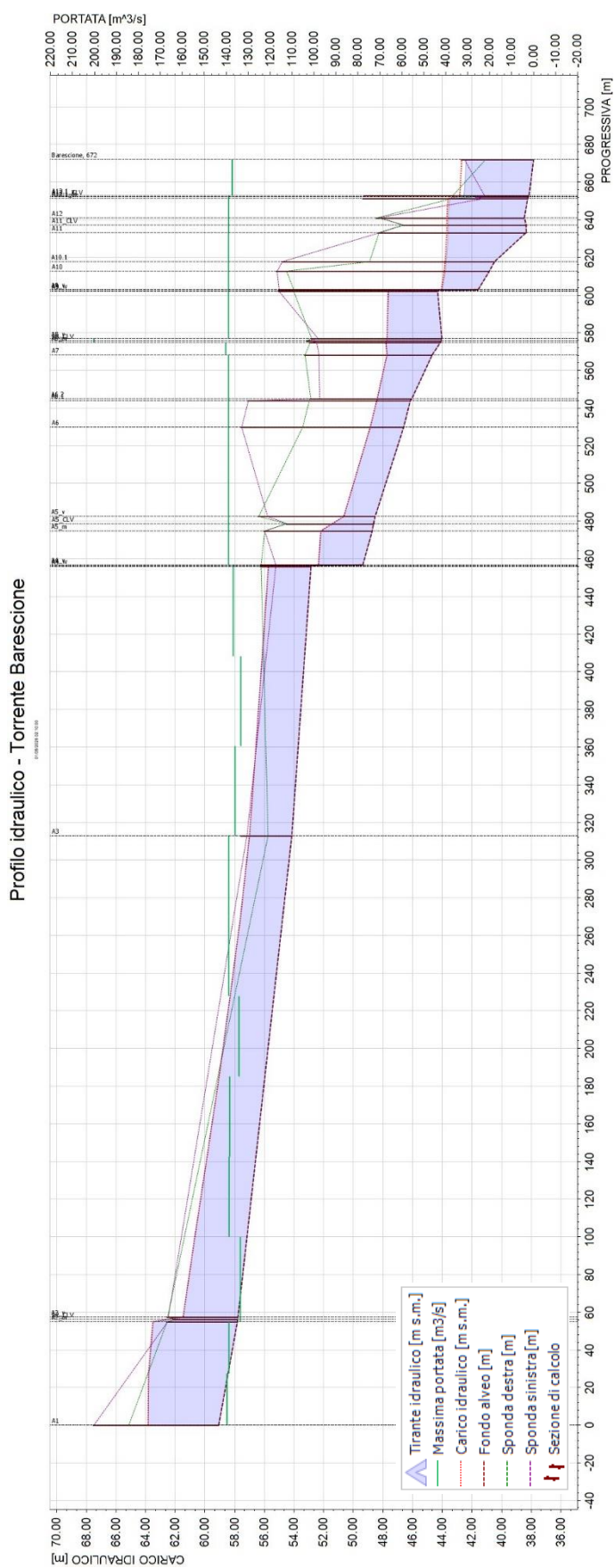


Figura 87 - Profilo di involuppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Barescione (TR200). Scenario 1 di sensitività.

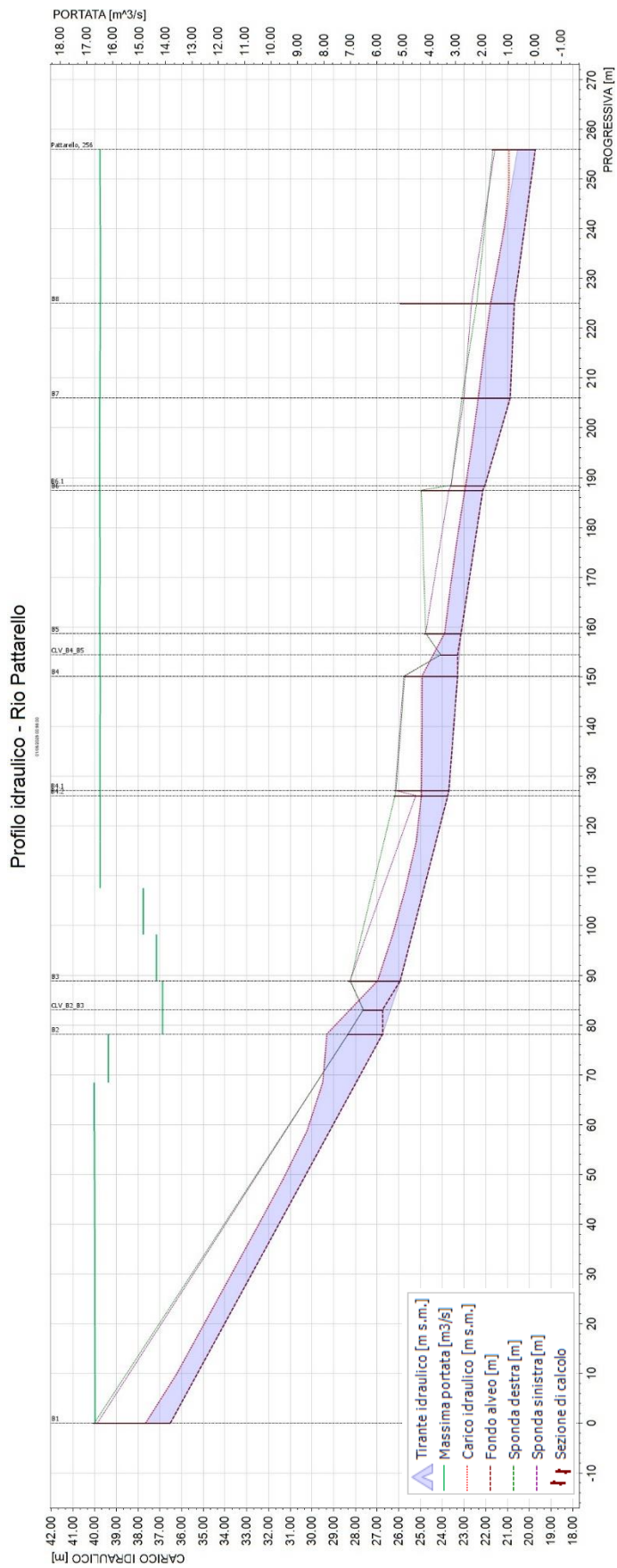


Figura 88 - Profilo di involuppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Rio Pattarello (TR200). Scenario 1 di sensitività.

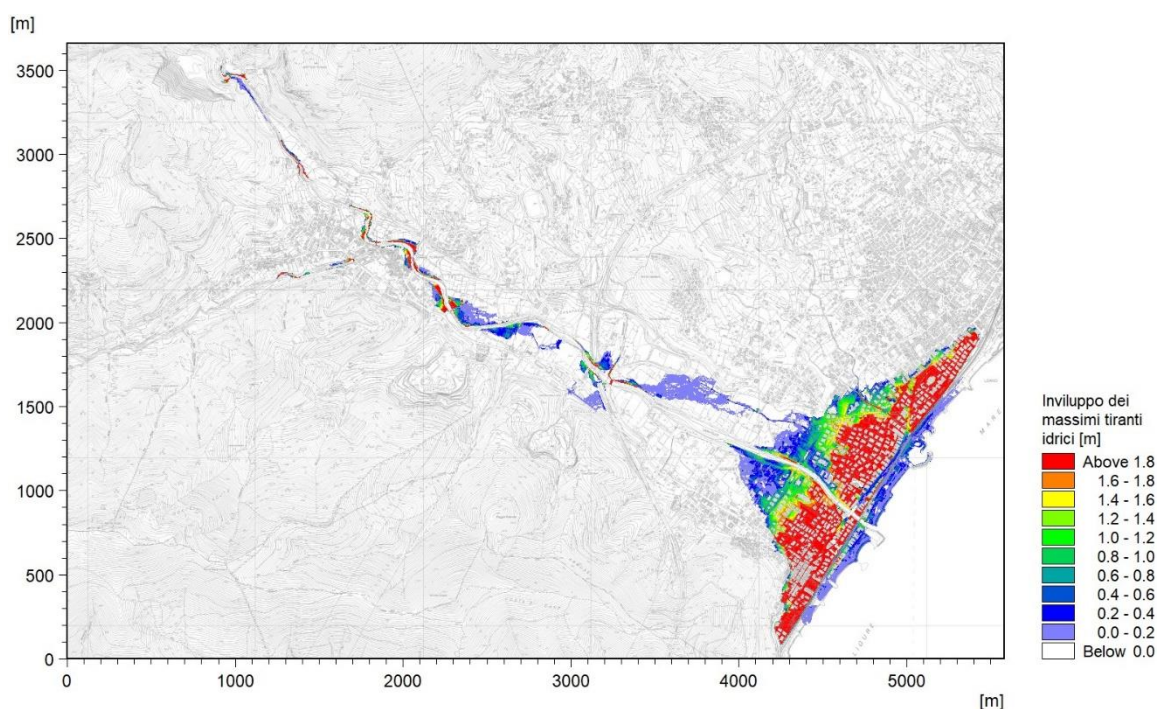


Figura 89 - Inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 200 anni. Scenario 1 di sensitività.

### 6.1.3 Evento di piena cinquecentennale (TR500)

Nel caso dell'evento con tempo di ritorno TR500, l'analisi di sensitività conferma e amplifica quanto già osservato per i tempi di ritorno inferiori.

Le condizioni idrauliche più severe, combinate con le ipotesi penalizzanti di fondo rialzato e attraversamenti parzializzati, determinano un incremento diffuso delle aree soggette a esondazione, con livelli idrici in alveo generalmente più elevati e sormonti spondali più marcati lungo l'intero tratto indagato.

Pur trattandosi di un evento estremo, la differenza rispetto allo scenario base del TR500 non risulta particolarmente drastica, ma si traduce in un ulteriore ampliamento delle superfici allagate e in tiranti idrici leggermente superiori nelle aree già precedentemente interessate da esondazione.

In sostanza, lo scenario conferma che, al crescere dell'intensità dell'evento, le condizioni di vulnerabilità locale si accentuano, specialmente laddove la sezione idraulica è già critica in condizioni normali.

Il quadro complessivo rafforza l'utilità dell'analisi di sensitività come strumento di supporto alla valutazione del rischio residuo, evidenziando come anche modesti peggioramenti delle condizioni al contorno possano influenzare la dinamica dell'esondazione rispetto alle stime basate su uno stato ottimale del reticolo.

Nel seguito sono riportati i profili idraulici (da Figura 90 a Figura 94) e la mappa di inviluppo dei massimi tiranti idrici (Figura 95).

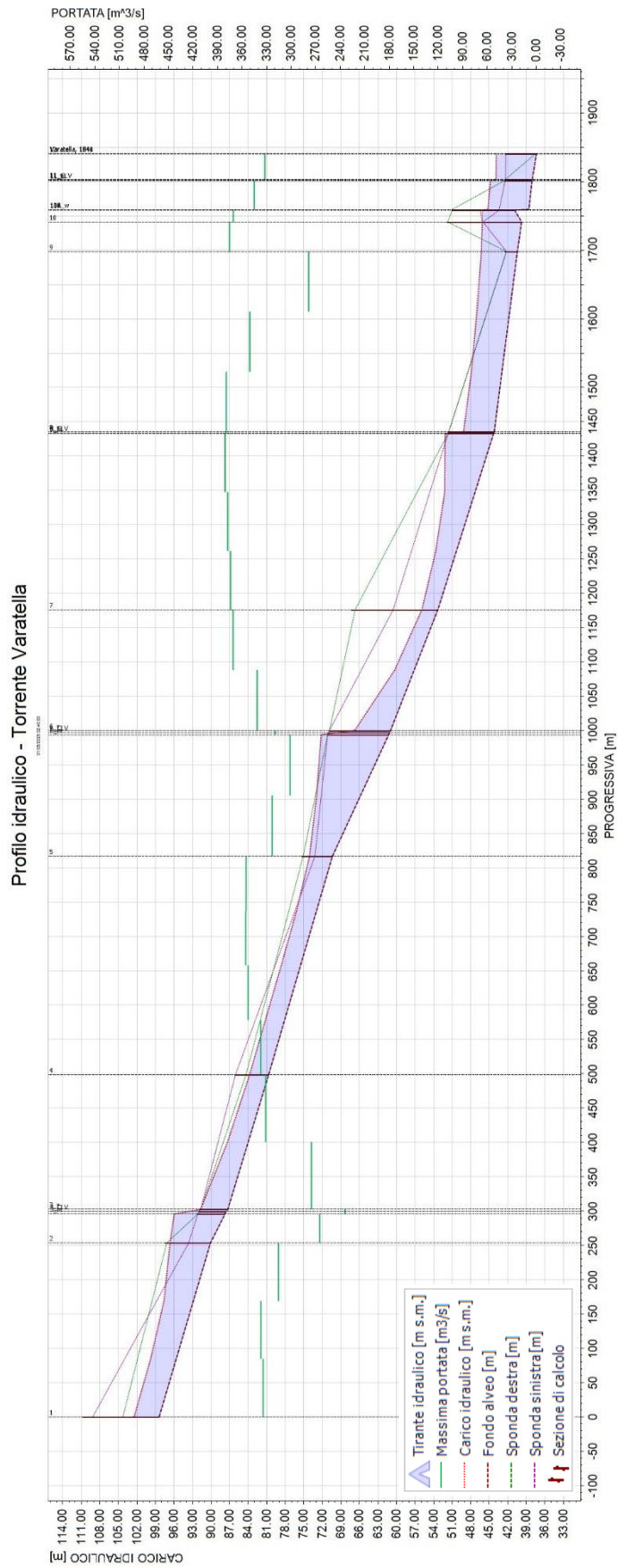


Figura 90 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR500). Da progressiva 0,00 m a progressiva 1.840,06 m. Scenario 1 di sensitività.



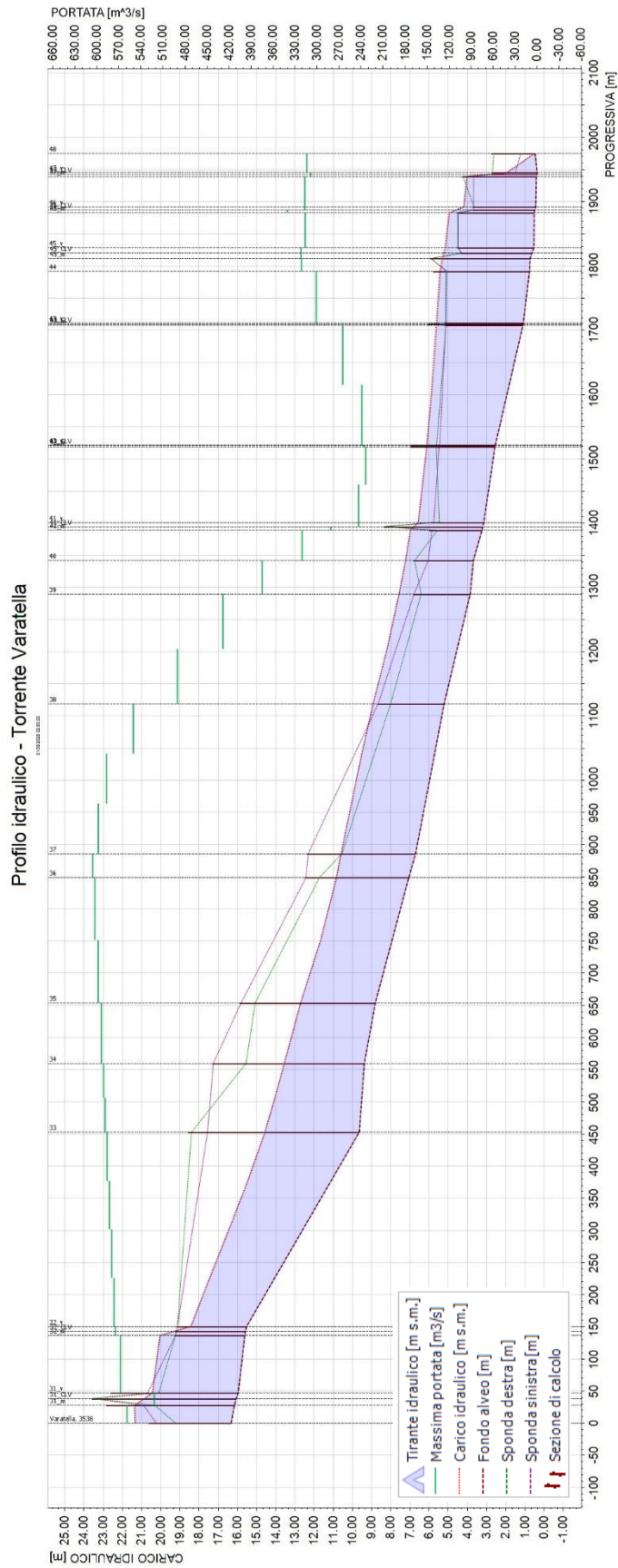


Figura 92 - Profilo di involucro dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Varatella (TR500). Da progressiva 3.531,79 m a progressiva 5.513,00 m. Scenario 1 di sensibilità.

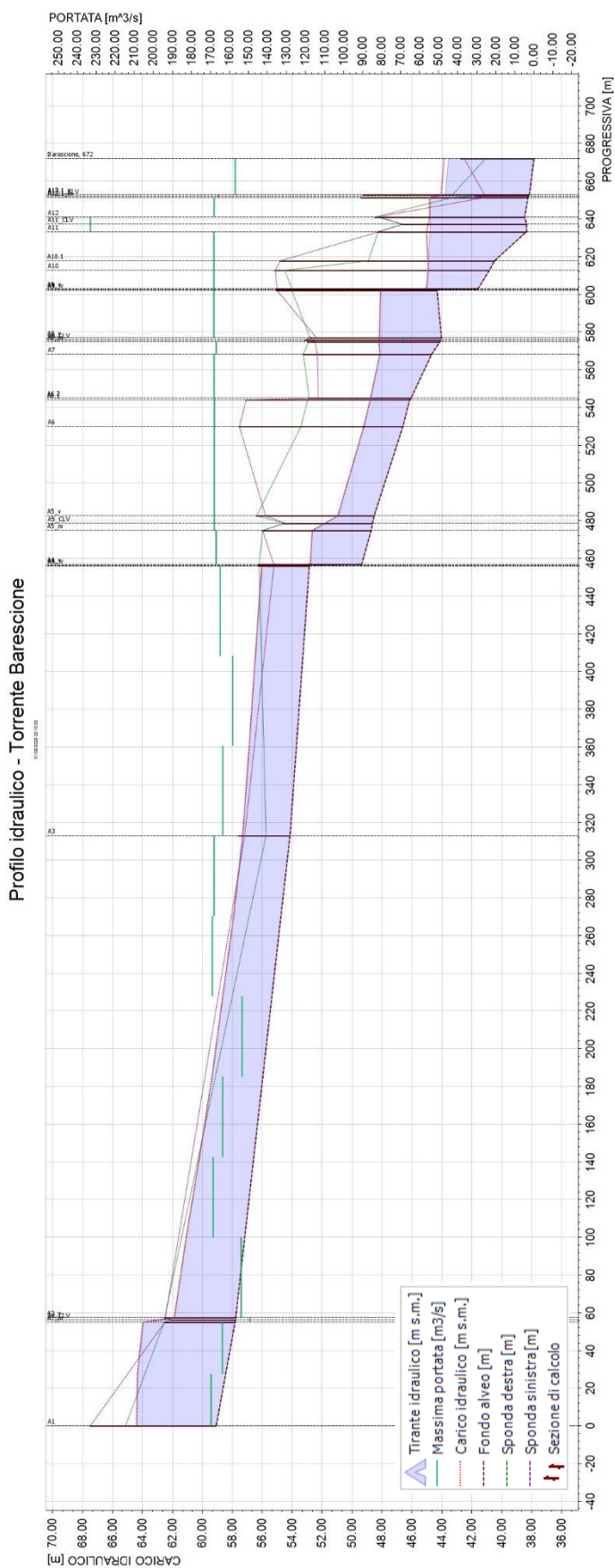


Figura 93 - Profilo di inviluppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Torrente Barescione (TR500). Scenario 1 di sensitività.

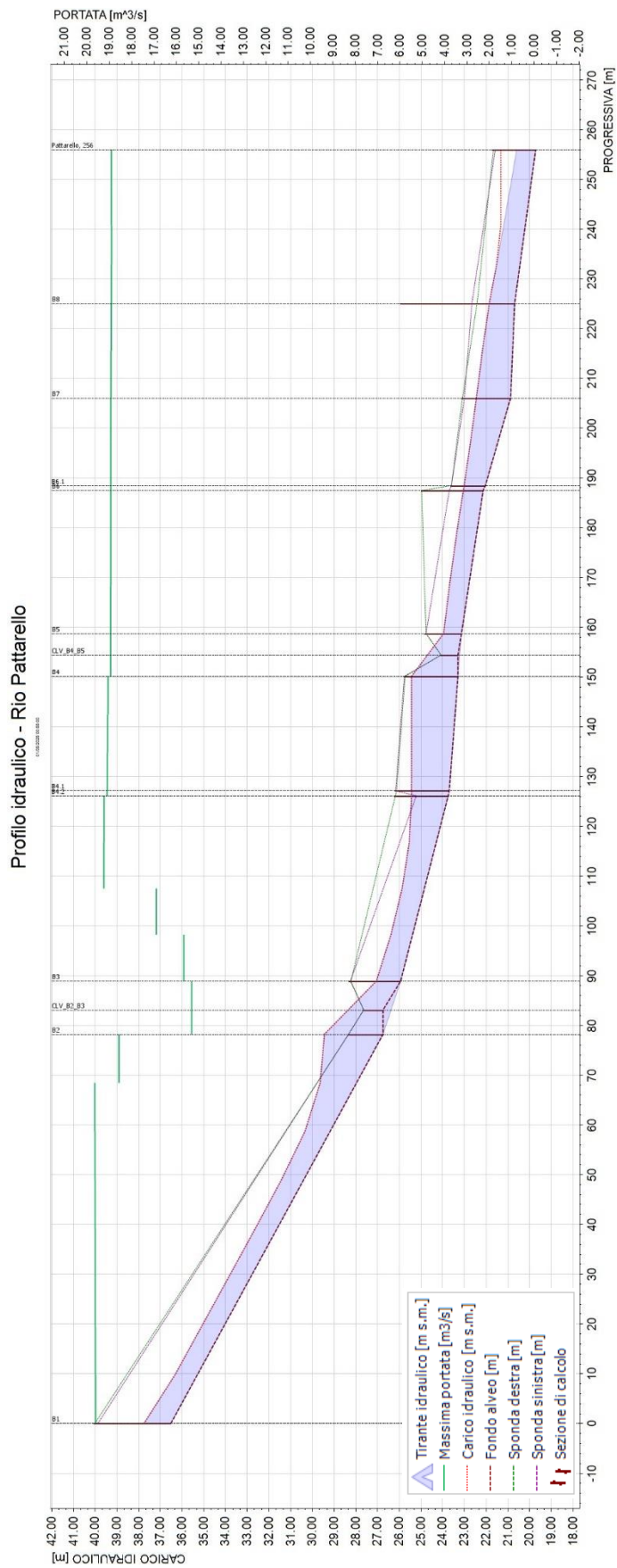


Figura 94 - Profilo di involuppo dei massimi livelli idrici e delle massime portate nell'alveo del Rio Pattarello (TR500). Scenario 1 di sensitività.

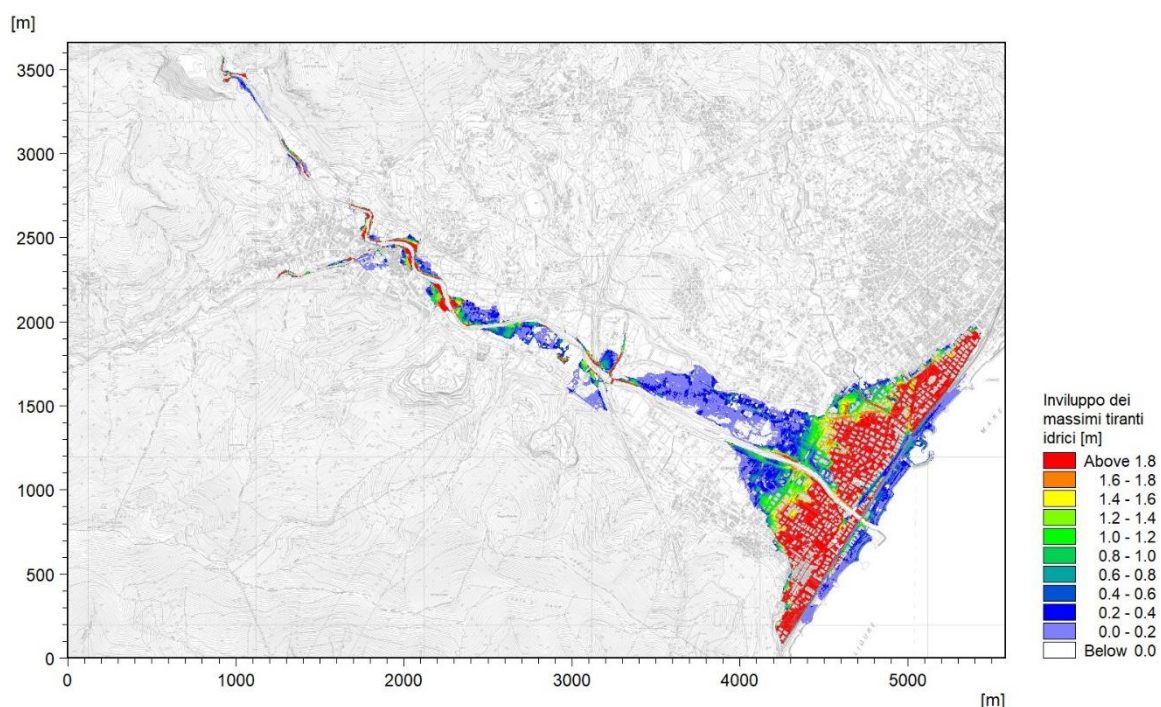


Figura 95 - Inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 500 anni. Scenario 1 di sensibilità.

## 6.2 Analisi di sensibilità rispetto alla scabrezza areale

Nel rispetto di quanto previsto dal contratto e in coerenza con la normativa di riferimento, è stata condotta un'analisi di sensibilità rispetto ai coefficienti di scabrezza assegnati alle celle del modello bidimensionale, intesi come rappresentazione della macroscabrezza areale dei diversi contesti territoriali.

Tale approfondimento mira a valutare l'influenza che variazioni ragionevoli dei parametri di resistenza al deflusso possono avere sulla distribuzione dei tiranti idrici e, più in generale, sull'estensione e la dinamica delle esondazioni simulate.

L'analisi si è basata su un nuovo set di simulazioni, nel quale è stata mantenuta inalterata la geometria del modello monodimensionale, già definita nel precedente scenario di sensibilità, mentre è stata modificata la distribuzione spaziale dei coefficienti di scabrezza nel modulo bidimensionale.

In particolare, si è proceduto a una riduzione dei valori di scabrezza, passando:

- da 40 a 30  $m^{1/3}s^{-1}$  nelle aree urbanizzate,
- da 30 a 20  $m^{1/3}s^{-1}$  nelle restanti zone.

Queste modifiche sono state applicate sulla mappa di scabrezza originaria, già descritta nella fase di allestimento del modello, così da rappresentare una condizione di maggiore resistenza al deflusso compatibile con una gestione idraulica meno efficiente del territorio, ad esempio per effetto di una maggiore presenza di ostacoli diffusi.

Dal momento che la componente monodimensionale del modello non è stata modificata, nei paragrafi successivi si è scelto di non riproporre i profili idraulici già analizzati nel primo scenario di sensibilità. L'attenzione sarà quindi rivolta esclusivamente alle mappe di allagamento,

mostrando per ciascun tempo di ritorno (TR50, TR200, TR500) i risultati ottenuti con questa nuova configurazione di scabrezze.

Questa analisi consente di esplorare la sensibilità del sistema idraulico alle condizioni di deflusso superficiale, valutando quanto e in che modo la rappresentazione della scabrezza influenzi la propagazione e l'estensione delle piene simulate, anche in termini di variazione dei tiranti idrici nei settori più sensibili.

Dai risultati ottenuti emerge chiaramente l'assenza di differenze significative tra il primo e il secondo scenario di sensibilità.

In particolare, la variazione dei coefficienti di macroscabrezza assegnati alle celle del modello bidimensionale non ha prodotto effetti apprezzabili sull'estensione delle aree allagate o sui tiranti idrici. Questo comportamento conferma che, nel contesto specifico della presente modellazione, il parametro di scabrezza ha un'influenza marginale sulla risposta idraulica del sistema.

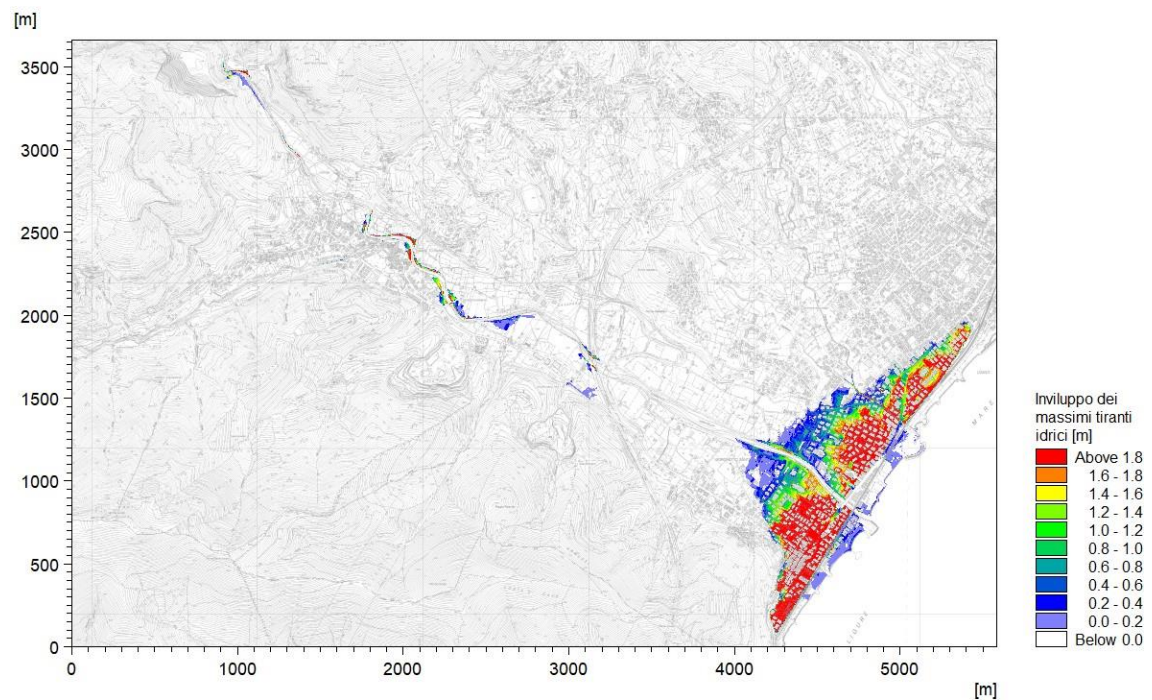


Figura 96 - Inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 50 anni. Scenario 2 di sensibilità.

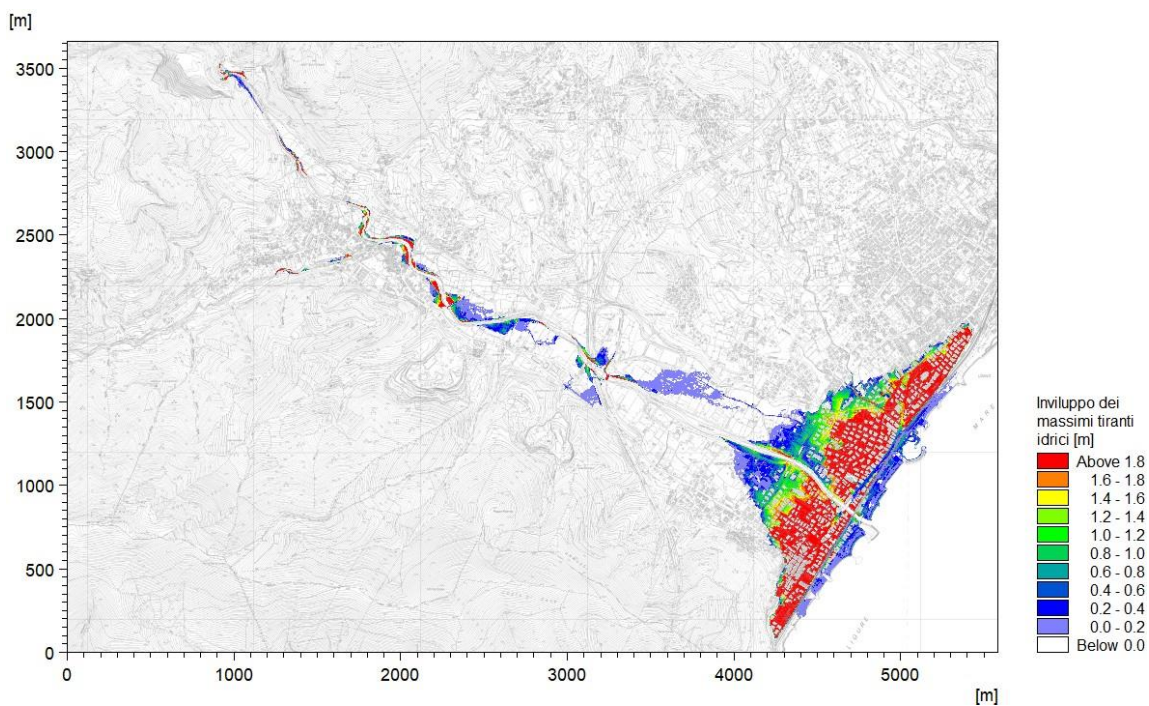


Figura 97 - Inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 200 anni. Scenario 2 di sensitività.

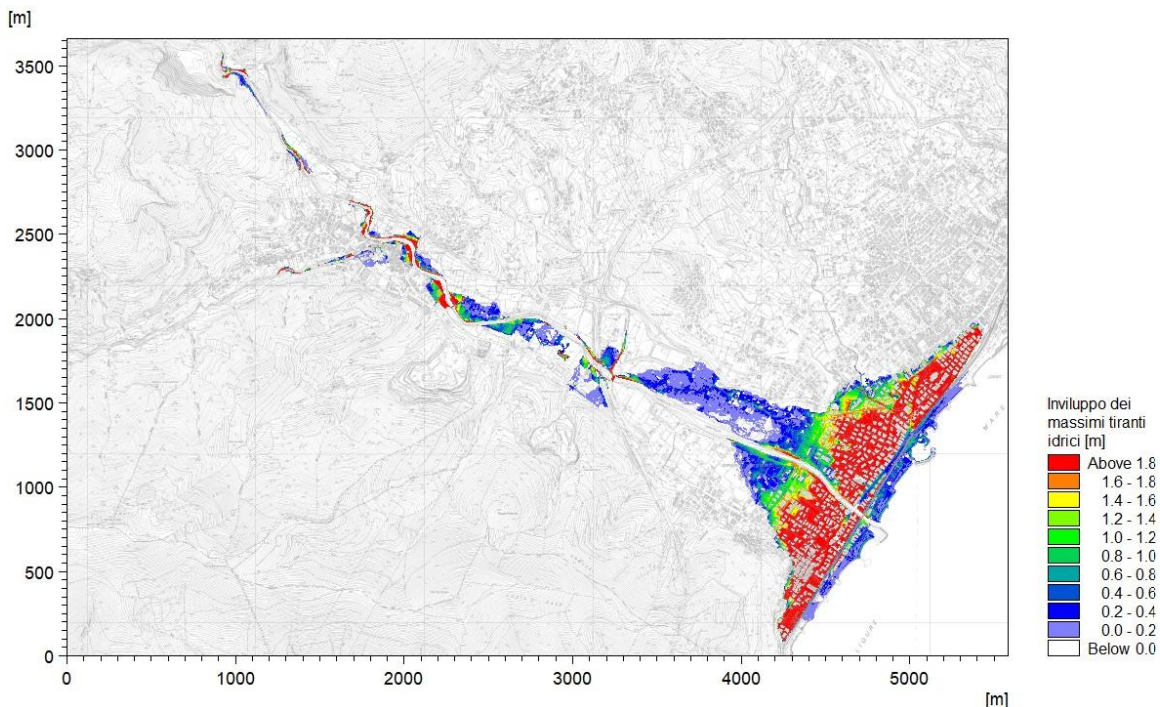


Figura 98 - Inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per l'evento di piena con Tempo di Ritorno 500 anni. Scenario 2 di sensitività.

## 6.3 Conclusioni sull'analisi di sensitività

L'analisi di sensitività condotta su differenti scenari di piena (TR50, TR200 e TR500) ha consentito di approfondire il comportamento del sistema idraulico in condizioni più critiche rispetto allo scenario base, secondo quanto previsto dal contratto e dalle direttive tecniche di riferimento.

In particolare, il primo scenario ha simulato una condizione di maggiore severità dovuta alla riduzione del franco idraulico, mediante un innalzamento rigido del fondo alveo di 30 cm e una parzializzazione degli attraversamenti del 10%.

I risultati hanno evidenziato un incremento diffuso dei livelli idrici e, in alcuni casi, un'estensione maggiore delle aree allagate. Tali risultati confermano la sensibilità del sistema alle interferenze fisiche nel deflusso, che possono aggravare il rischio residuo anche in aree che, nello scenario base, non risultavano soggette a esondazione.

Il secondo scenario, volto a valutare l'effetto della modifica dei coefficienti di macroscabrezza nel modello bidimensionale, ha invece mostrato un comportamento pressoché invariato rispetto al primo scenario. La riduzione delle scabrezze da 40 a 30  $m^{1/3}s^{-1}$  nelle aree urbanizzate e da 30 a 20  $m^{1/3}s^{-1}$  nelle aree meno antropizzate non ha generato variazioni significative né nei tiranti idrici né nell'estensione delle esondazioni.

Questo evidenzia come, nel contesto specifico del bacino del Varatella, la scabrezza distribuita abbia un ruolo secondario rispetto alla geometria e alle condizioni di deflusso imposte dalle infrastrutture e dalla morfologia dell'alveo.

A completamento dell'analisi, si segnala che non è stato approfondito un terzo scenario basato sull'applicazione dell'idrogramma con massimo volume, in alternativa a quello con massimo colmo, poiché numerose esperienze modellistiche condotte in contesti simili hanno evidenziato che tale configurazione non determina condizioni più gravose in termini di estensione delle aree allagate o di livelli idrici raggiunti.

Pertanto, in un'ottica di razionalizzazione del lavoro e focalizzazione sui parametri realmente influenti, si è ritenuto non necessario includere ulteriori simulazioni che non avrebbero apportato elementi significativi ai fini della valutazione del rischio di esondazione nel bacino del Varatella.

## 7 Proposta di perimetrazione delle aree di pericolosità

La proposta di perimetrazione delle aree a pericolosità da alluvione fluviale è stata elaborata sulla base dei risultati ottenuti dalla modellazione idraulica accoppiata 1D–2D, sviluppata con il software MIKE+ a partire dal rilievo topografico di dettaglio eseguito lungo il torrente Varatella e i suoi affluenti Barescione e Pattarello.

Le simulazioni hanno considerato eventi di piena con tempi di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni (TR50, TR200, TR500), in conformità alle indicazioni della disciplina di Piano del PGRA, e sono state integrate da una serie di scenari di sensibilità idraulica, volti a valutare le potenziali estensioni massime delle aree inondabili in condizioni critiche aggiuntive (es. riduzione del franco idraulico disponibile, variazioni nei coefficienti di macro scabrezza, restringimenti del deflusso).

L'inviluppo delle aree inondate è stato definito in modo differenziato in funzione della localizzazione:

- **a monte dell'abitato di Borghetto Santo Spirito**, è stato assunto il tirante massimo risultante tra tutti gli scenari simulati, comprensivi delle condizioni di sensibilità, al fine di cogliere il potenziale massimo sviluppo delle esondazioni in aree a morfologia più libera;
- **all'interno dell'abitato di Borghetto Santo Spirito**, dove già in condizioni di stato attuale si evidenziano criticità significative, si è ritenuto opportuno limitare la perimetrazione all'estensione dell'inondazione risultante dallo scenario di stato attuale, escludendo gli inviluppi derivanti dagli scenari di sensibilità, in quanto rappresentativi di condizioni limite non realisticamente perseguibili.

In ogni caso, sono stati esclusi dalla perimetrazione tutti i settori soggetti a esondazione con **tiranti inferiori a 10 cm**, in quanto non significativi ai fini della valutazione della pericolosità ai sensi delle linee guida PGRA.

Sulla base di tale inviluppo, sono state individuate le fasce di pericolosità:

- **P3** – pericolosità elevata ( $TR \leq 50$  anni),
- **P2** – pericolosità media ( $50 < TR \leq 200$  anni),
- **P1** – pericolosità bassa ( $200 < TR \leq 500$  anni),

assegnando priorità, nei casi di sovrapposizione, al livello di pericolosità più elevato.

La figura seguente riporta la mappa conclusiva delle fasce di pericolosità ottenute lungo il torrente Varatella e i suoi affluenti. La perimetrazione è stata predisposta secondo gli standard informativi richiesti dal PGRA e rappresenta il riferimento aggiornato per la gestione del rischio idraulico e la pianificazione territoriale a scala di bacino.

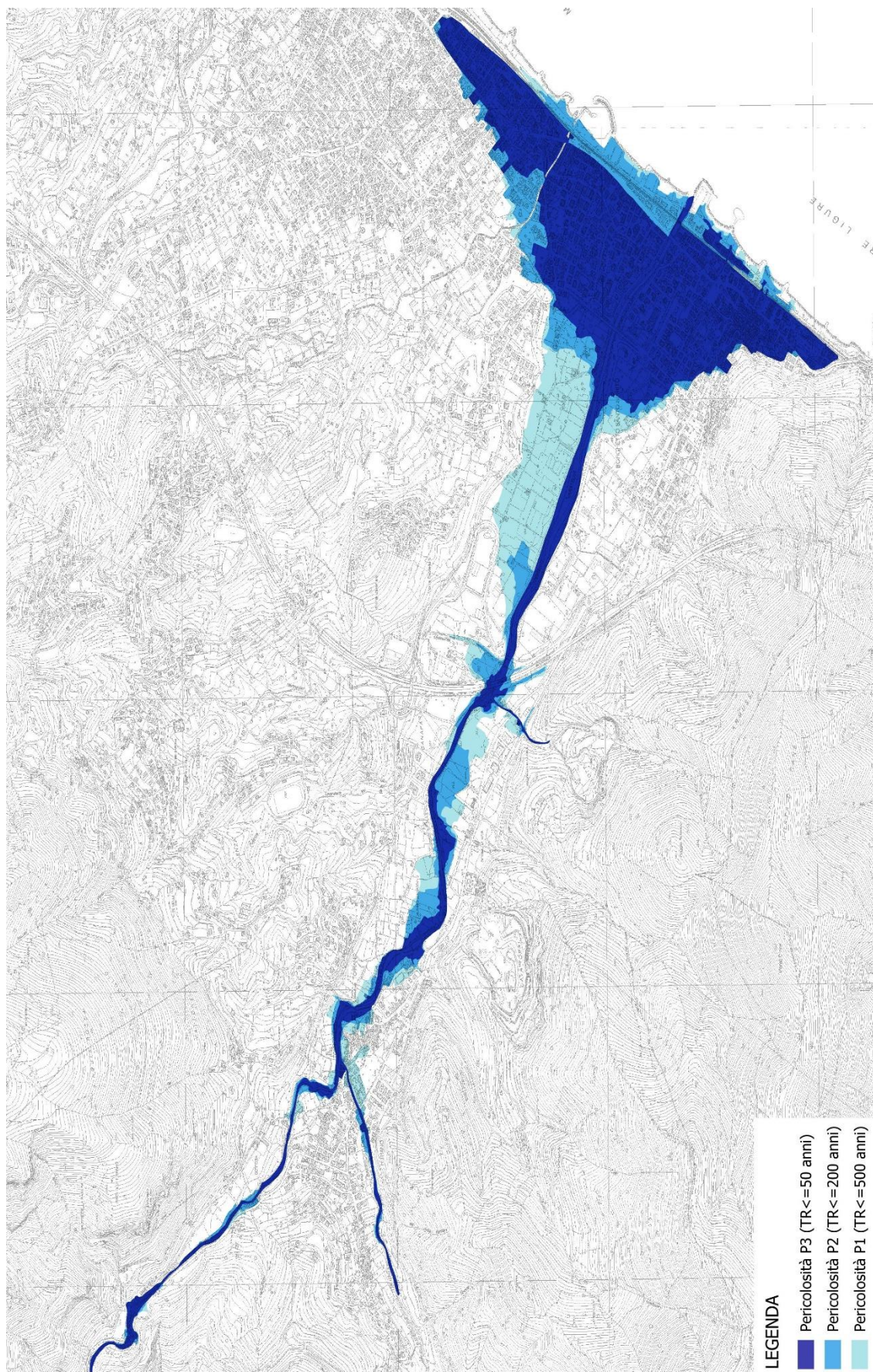


Figura 99 - Perimetrazione delle fasce di pericolosità secondo la disciplina di Piano del PGRA.

## 8 Proposta di aggiornamento Misure di Gestione del Rischio Alluvioni

A valle della ridefinizione delle fasce di pericolosità idraulica lungo il torrente Varatella e i suoi affluenti Barescione e Pattarello, si è proceduto all'elaborazione di una proposta di aggiornamento delle misure di gestione del rischio alluvioni, in coerenza con quanto previsto dalla disciplina tecnica del Piano di Gestione del Rischio Alluvione (PGRA) 2021–2027 dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale.

Le misure proposte fanno riferimento alle tipologie definite nel PGRA (prevenzione, protezione, preparazione, risposta, ripristino) e sono localizzate in corrispondenza dei tratti di maggiore criticità idraulica individuati attraverso le analisi di modellazione.

In linea con i principi della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE e dell'art. 17 della Disciplina di Piano, è stata data priorità, ove possibile, a misure di protezione integrata a carattere “win-win”, ovvero interventi che contribuiscono alla riduzione del rischio alluvionale in sinergia con obiettivi ambientali, territoriali e di resilienza climatica.

Ogni misura è descritta attraverso gli elementi minimi richiesti dal PGRA: denominazione, tipologia e codice, descrizione articolata per fasi, tempi di attuazione stimati, costi indicativi, localizzazione testuale e, ove previsto, rappresentazione geometrica vettoriale (puntuale, lineare o areale).

La Tabella 19 riepiloga le misure individuate, mentre la planimetria di sintesi in Figura 100 ne rappresenta la distribuzione spaziale sul territorio indagato.

Codice	Intervento	Tipologia	Sotto-tipologia (codice)	Descrizione tecnica	Tempo di attuazione [mesi]	Stima del costo [M€]
01	Vasca di laminazione da circa 600.000 m <sup>3</sup>	Protezione	M22	Realizzazione di una vasca di laminazione a monte dell'abitato per la riduzione del colmo di piena, con capacità utile di circa 600.000 m <sup>3</sup> e scarico regolato.	36	16,0 – 18,0
02	Demolizione e rifacimento attraversamento ferroviario	Protezione	M31	Demolizione dell'attuale attraversamento ferroviario e ricostruzione come passaggio pedonale o ciclabile, in previsione della dismissione del tratto costiero della linea ferroviaria ligure e del suo arretramento più interno.	12	1,5 – 2,0
03	Demolizione e rifacimento attraversamento carrabile	Protezione	M31	Adeguamento idraulico dell'attraversamento mediante innalzamento dell'intradosso del ponte, mantenendo l'ampiezza della sezione attuale.	12	2,0 – 2,5
04	Rimodellazione della sezione d'alveo	Protezione	M31	Adeguamento morfologico del tratto fluviale mediante ampliamento della sezione d'alveo, scavo di materiale e risagomatura spondale, per incremento della capacità di deflusso.	12	2,5 – 3,0
05	Innalzamento muro arginale	Protezione	M31	Realizzazione di un innalzamento del muro spondale, con funzione di contenimento locale per miglioramento del franco idraulico in condizioni di piena.	12	5,0 – 5,5
06	Adeguamento della sezione di deflusso nel ponte della SP (rio Pattarello)	Protezione	M31	Miglioramento della sezione di deflusso in corrispondenza del ponte esistente mediante allargamento localizzato dell'alveo e possibile realizzazione di una struttura a sbalzo sotto la carreggiata stradale.	6	0,5 – 0,7

Tabella 19 – Proposta di aggiornamento delle misure di intervento secondo le linee guida del PGRA.

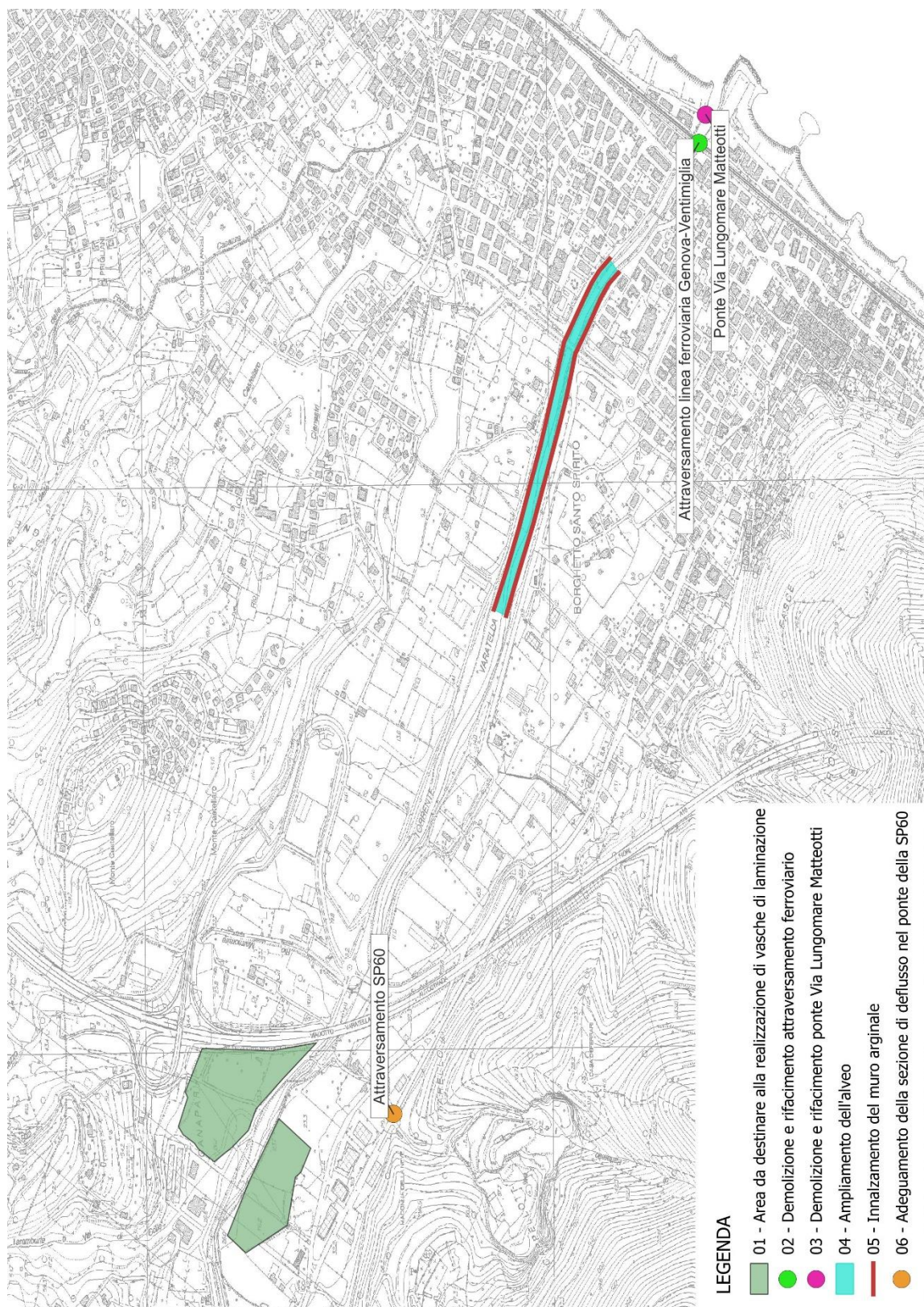


Figura 100 - Indicazione planimetrica delle misure di intervento proposte.

Tra le misure di intervento proposte si segnala che due interventi, identificati nella tabella con i codici 04 (ampliamento della sezione d'alveo) e 05 (innalzamento di muri arginali), risultano già previsti tra le opere programmate a breve termine dal Comune di Borghetto Santo Spirito.

Tali interventi sono stati progettati con l'obiettivo di contenere la piena con tempo di ritorno 50 anni (TR50) garantendo un franco idraulico di circa 50 cm e di contenere la piena TR200 con franco nullo. La progettazione di tali opere si basa su analisi idrauliche effettuate in coerenza con il vigente Piano di Bacino, antecedente alle revisioni introdotte con il presente studio.

Al fine di valutare la coerenza e l'efficacia degli interventi previsti con il nuovo quadro di pericolosità definito nella presente relazione, è stata condotta una specifica simulazione idraulica dell'evento TR200, applicando al modello aggiornato le condizioni geometriche previste in progetto (nuova sezione d'alveo e muri arginali).

La modellazione è stata eseguita in due scenari distinti:

- con demolizione degli attraversamenti a valle (interventi 02 e 03);
- senza demolizione, mantenendo gli attraversamenti esistenti.

L'analisi ha permesso di quantificare l'effetto combinato dell'ampliamento della sezione utile e dell'innalzamento delle sponde, fornendo una stima più realistica delle altezze minime richieste per i nuovi muri al fine di garantire il contenimento effettivo della piena TR200, alla luce delle condizioni idrauliche aggiornate.

Nella Figura 101 è riportata una planimetria di sintesi che rappresenta tutti gli elementi oggetto delle simulazioni idrauliche di intervento. In particolare, sono indicati i due attraversamenti principali nel tratto terminale del Varatella (in corrispondenza della SP60 e della linea ferroviaria dismessa), evidenziandone lo stato di conservazione o demolizione a seconda dello scenario considerato. Vengono inoltre rappresentati i muri di sponda, distinguendo tra quelli già esistenti e quelli aggiunti nel nostro progetto.

Si precisa che, al fine di valutare efficacemente il contenimento della piena TR200 in alveo, è stato ipotizzato che tali muri abbiano altezza teoricamente infinita. Questo approccio consente di determinare il reale pelo libero che si sviluppa in alveo nelle condizioni simulate, e quindi di stimare con precisione l'altezza necessaria affinché i muri di sponda siano in grado di garantire il contenimento del deflusso con un franco idraulico di sicurezza. Ne deriva anche una valutazione indiretta sulla necessità di innalzamento dei muri esistenti, oltre che sull'altezza richiesta per quelli di nuova realizzazione.

Nella Figura 102 è invece riportato il profilo idraulico estratto dal modello, relativo al tratto compreso tra la sezione 36 e la foce. Il grafico mostra il confronto tra i due scenari di intervento: quello con mantenimento degli attraversamenti esistenti (linea rossa) e quello con demolizione di entrambi (linea blu). Sono inoltre visibili i muri di sponda modellati con altezza elevata, secondo l'approccio descritto, che consente una valutazione immediata dell'efficacia del contenimento e delle altezze minime necessarie per ciascuna sezione del tratto in esame.

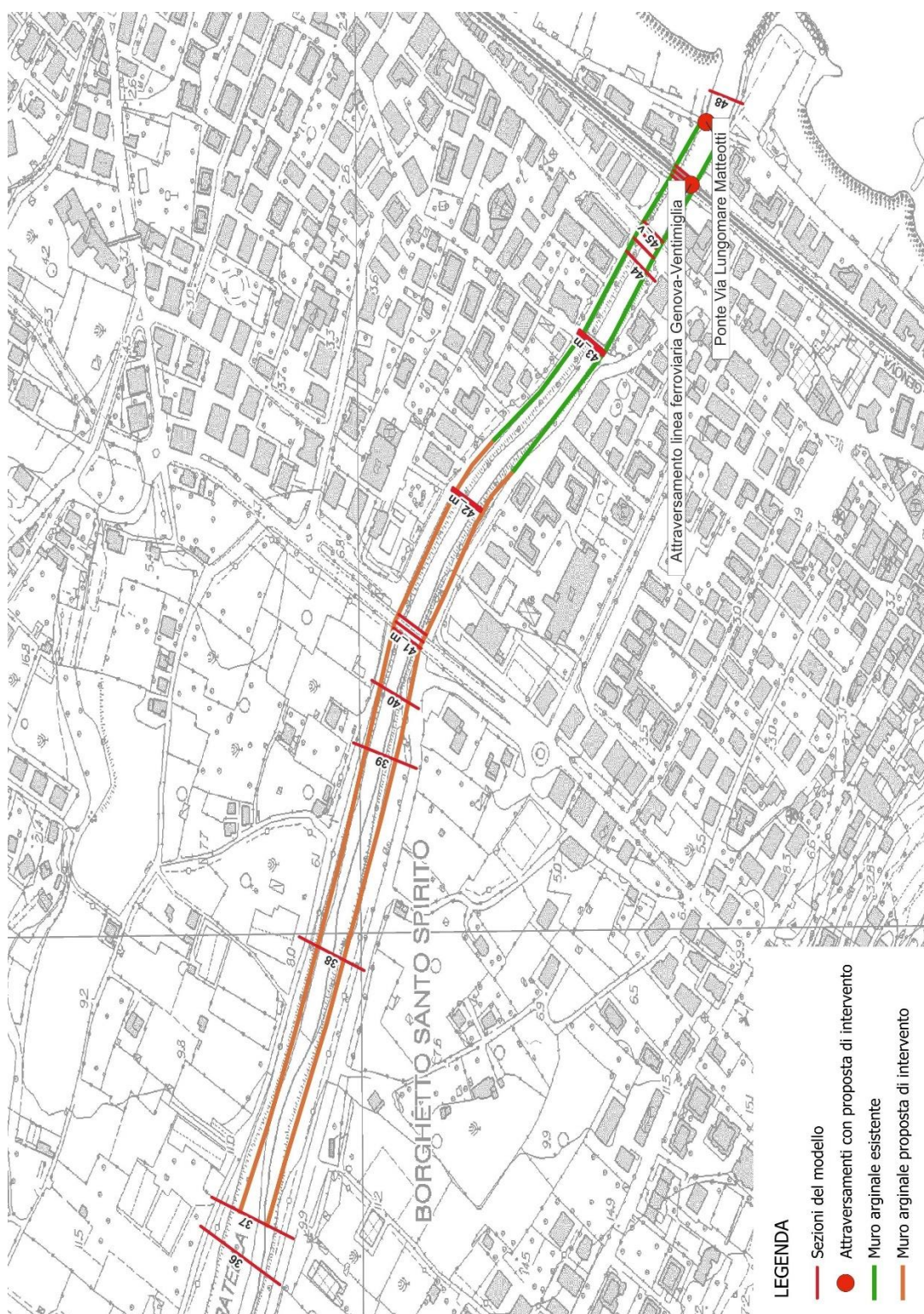


Figura 101 - Planimetria di inquadramento degli interventi modellati.



I risultati delle simulazioni svolte sul tratto terminale del Varatella, oggetto degli interventi di adeguamento, confermano che a partire dalla sezione 37 – punto dal quale, nello scenario attuale, iniziano le esondazioni per la piena TR200 – il contenimento delle portate risulta pienamente efficace grazie all’innalzamento dei muri di sponda e all’ampliamento della sezione d’alveo. Si precisa che il tratto interessato dai nuovi muri di sponda risulta più esteso rispetto a quanto precedentemente previsto dal progetto comunale, estendendosi più a monte proprio in virtù delle evidenze modellistiche.

Nel caso in cui non si proceda alla demolizione degli attraversamenti a valle (interventi 02 e 03), le simulazioni mostrano livelli idrici estremamente elevati, con sormonto generalizzato di tutti i manufatti presenti, compreso l’attraversamento dell’Aurelia, a causa di un incremento della portata in alveo che raggiunge i 540 m<sup>3</sup>/s.

Al contrario, lo scenario che prevede la demolizione e ricostruzione dei due ponti di valle, unitamente all’ampliamento dell’alveo e all’innalzamento dei muri di sponda, risulta il più efficace nel contenere la piena TR200.

In tale configurazione migliorativa, l’attraversamento dell’Aurelia risulta comunque in pressione, come nello scenario attuale, ma con livelli idrici superiori e una maggiore pressione esercitata sull’intradosso dell’impalcato. Il franco idraulico risulta nullo, e la maggiore portata contenuta in alveo determina una condizione più critica per l’opera, sebbene essa non venga sormontata. Tale criticità può essere ritenuta accettabile dal punto di vista idraulico, nell’ottica di una mitigazione efficace del rischio di esondazione per l’abitato di Borghetto Santo Spirito; tuttavia, è possibile che tale configurazione risulti non compatibile con le esigenze funzionali e strutturali del gestore dell’infrastruttura stradale, in considerazione della maggiore sollecitazione idraulica sull’opera.

L’unica misura realmente in grado di ridurre ulteriormente i livelli idraulici a valle, e alleggerire anche la pressione sull’attraversamento dell’Aurelia, è l’introduzione di una vasca di laminazione a monte, con capacità utile stimata pari a 600.000 m<sup>3</sup>. Tale opera, pur essendo stata giudicata potenzialmente fattibile in base alla disponibilità di aree idonee, presenta margini di incertezza legati alla complessità dell’opera di presa (che dovrebbe attivarsi per portate superiori a 200 m<sup>3</sup>/s) e ai sistemi di svuotamento successivi all’evento di piena. Ad oggi, l’intervento è ritenuto nel complesso fattibile, ma in fase progettuale sarà ovviamente necessario condurre tutte le opportune verifiche tecniche, idrauliche, ambientali e autorizzative al fine di confermarne la reale realizzabilità.

Dalla modellazione condotta nello scenario con demolizione dei ponti – unico effettivamente efficace – si è potuto stimare che l’altezza richiesta per i nuovi muri di sponda, al fine di contenere la piena TR200 con un franco di sicurezza pari a 1,0 m, raggiunge un valore massimo di circa 6,0 m rispetto al fondo alveo. Tale valore massimo si registra in prossimità del ponte dell’Aurelia, dove i livelli risultano più elevati a causa delle perdite di carico concentrate associate all’attraversamento. Questo dato implica non solo un’estensione a monte dei muri esistenti (fino alla sezione 37), ma anche un loro innalzamento rispetto alle quote attuali, che in alcuni tratti risultano al limite o leggermente insufficienti per contenere l’evento di riferimento.

Tuttavia, si evidenzia che, a causa della complessità idraulica e della naturale tendenza all’esondazione del torrente Varatella in corrispondenza dell’abitato di Borghetto Santo Spirito, tali misure, pur rappresentando azioni utili e coerenti con una strategia di mitigazione del rischio, non risultano risolutive se considerate singolarmente.

Per tale ragione, si sottolinea che le misure proposte non devono essere considerate alternative tra loro, ma piuttosto attuate congiuntamente, in quanto solo l’esecuzione simultanea di più interventi consente di ottenere una riduzione significativa delle criticità idrauliche evidenziate.

In sintesi, si possono individuare tre scenari progressivi di intervento:

- solo demolizione e ricostruzione dei due attraversamenti a valle, con riduzione parziale delle esondazioni ma permanenza di criticità a monte [02 + 03];

- demolizione degli attraversamenti, ampliamento dell'alveo e innalzamento dei muri di sponda, con contenimento complessivo della piena TR200 ma con pressione residua sull'attraversamento dell'Aurelia [02 + 03 + 04 + 05];
- integrazione di tutti gli interventi precedenti con la vasca di laminazione da 600.000 m<sup>3</sup>, unica configurazione in grado di garantire una gestione ottimale delle portate e una riduzione generalizzata dei livelli idrici anche nei tratti più critici [01 + 02 + 03 + 04 + 05].

ALLEGATI



ALLEGATO A  
Codice di calcolo MIKE by DHI  
MIKE+ RIVER 1D



## A.1 PREMESSA

MIKE+ River 1D è un software in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. MIKE+ River 1D, che si presenta come il diretto successore del conosciuto MIKE11, sviluppato a partire dagli anni '70 dal DHI (Danish Hydraulic Institute), rappresenta lo stato dell'arte nella modellistica matematica in ambito fluviale e riferimento nell'ambito della modellistica idrodinamica monodimensionale.

Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del robusto motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete del De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche ecc.) ed i molteplici strumenti di interpretazione e visualizzazione dei risultati, in grado di garantire un'ottima rappresentazione degli studi condotti (rappresentazione di sezioni, profili, piani quotati, anche in ambiente GIS).

La grande flessibilità del codice di calcolo permette di integrare, attraverso specifici moduli, le applicazioni idrodinamiche con fenomeni idrologici, trasporto solido, advezione-dispersione, qualità delle acque, ecologia, rendendo MIKE+ River 1D uno strumento indispensabile per affrontare e risolvere molteplici problemi d'ingegneria fluviale quali, ad esempio:

- studi di idraulica fluviale e di propagazione dell'onda di piena;
- studi di idrologia e idrogeologia;
- supporto alla progettazione e gestione di opere idrauliche;
- analisi della rottura dighe;
- analisi del trasporto solido e morfologia fluviale;
- modelli di previsione in tempo reale e di supporto decisionale;
- analisi dei fenomeni di intrusione del cuneo salino in fiumi ed estuari;
- studi di valutazione della qualità delle acque sia superficiali che sotterranee;
- analisi dello stato ecologico dei corsi d'acqua.

MIKE+ River 1D è costituito dai seguenti moduli:

- HD (idrodinamico): simulazione del flusso in canali a pelo libero, costituisce la base per ulteriori moduli aggiuntivi;
- RR (afflussi-deflussi): modulo che consente, partendo dai dati meteorologici (pioggia, temperature, evapotraspirazione, ecc...), su bacini naturali o artificiali, di ricostruire attraverso l'utilizzo di modelli idrologici (NAM, UHM, Drift, ecc...) le portate idriche in assegnate sezioni di calcolo;
- AD (advezione-dispersione): simulazione del processo di advezione e dispersione di una sostanza in soluzione o in sospensione di qualsiasi natura nel corpo idrico, eventualmente caratterizzata da una cinetica di decadimento lineare;
- ECOLab (ecologico): simulazione di una serie di processi qualitativi, tra i quali il ciclo BOD-DO con nitrificazione-denitrificazione, il ciclo del fosforo, l'eutrofizzazione, il trasporto di metalli pesanti ecc.;
- ST (trasporto sedimenti): simulazione del trasporto solido di materiale non coesivo, in modalità disaccoppiata (senza variazione della geometria del fondo alveo) o accoppiata (calcolo delle trasformazioni morfologiche). Questo modulo è attivabile utilizzando l'interfaccia di MIKE11 classic.

- DA (previsioni in tempo reale): il modulo consente, assimilando i dati misurati in tempo reale su un bacino e/o corso d'acqua, di correggere la simulazione idrodinamica al fine di garantire una affidabilità massima sulla previsione di un evento di piena.

Particolarmente efficace risulta la possibilità di poter integrare il codice MIKE+ River 1D, con altri codici di calcolo della famiglia MIKE quali: MIKE 21 (MIKE FLOOD), per simulare in maniera combinata fenomeni 1D e 2D; MIKE SHE, per la modellazione di corpi idrici superficiali e sotterranei; WEST, per simulare in dettaglio i processi nell'impianto di trattamento ed il relativo impatto sul corso d'acqua recettore; MOUSE (MIKE URBAN FLOOD), simula le interferenze tra il corso d'acqua e la rete di drenaggio.

Di seguito si descrive il codice MIKE+ River 1D HD.

## A.2 MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico HD rappresenta il "cuore" del codice di calcolo MIKE+ River 1D ed è in grado di simulare il flusso idrico monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Attraverso l'utilizzo di HD è possibile simulare:

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

L'adozione del programma di simulazione MIKE+ River 1D consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

## A.3 DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

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

- Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.
- Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle e quindi simulare i fenomeni di rigurgito.
- Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

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

## A.4 EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE+ River 1D risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- la pendenza del fondo è piccola;
- le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

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

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

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

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

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

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

dove:

- A = area della sezione bagnata (m<sup>2</sup>);
- C = coefficiente di attrito di Chezy (m<sup>1/2</sup> s<sup>-1</sup>);
- g = accelerazione di gravità (m s<sup>-2</sup>);
- h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);
- Q = portata (m<sup>3</sup>/s);
- R = raggio idraulico (m);
- α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;
- q = portata laterale addotta (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>).

## A.5 SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

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

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

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

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

## A.6 APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

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

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

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

## A.7 DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. Sono diversi i tipi di strutture che possono essere simulate, di seguito elencate.

### **Stramazzo a larga soglia (weir)**

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

### **Tombino (culvert)**

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

### **Ponte (bridge)**

In MIKE+ River 1D possono essere utilizzate diverse formulazioni da letteratura per il calcolo del deflusso attraverso i ponti e del conseguente effetto di rigurgito. In particolare, sono implementati i modelli della FHWA (Federal Highway Administration USA, WSPRO method) e della USBPR (US Bureau of Public Roads), modelli per la simulazione della presenza delle pile (Nagler e Yarnell), modelli per il libero deflusso attraverso ponti ad arco (Biery & Delour, HR method). Tutti i precedenti metodi di calcolo possono essere integrati con il calcolo del moto in pressione e con il calcolo del sormonto della struttura (tombini e stramazzi).

### Pompa (pump)

In MIKE+ River 1D una pompa viene descritta specificandone le modalità operative, ossia se lavora a portata costante o seguendo una propria curva caratteristica.

### Relazione $Q = A(Zj1). Zj2$ (control)

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

### Struttura mobile (gate)

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

## A.8 RESISTENZA D'ATTRITO

MIKE+ River 1D consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{C^2AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{M^2AR^{4/3}}$$

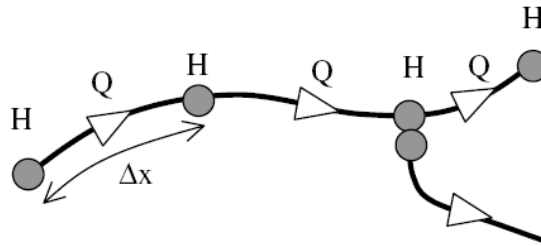
dove M è il coefficiente di Strickler, pari a  $1/n$ , essendo n il coefficiente di Manning.

## A.9 CONDIZIONI INIZIALI

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

## A.10 METODO DI SOLUZIONE

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



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

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

## A.11 CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE+ River 1D le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

## A.12 DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

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

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

### 1) Criterio di Courant

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

dove:

Cr = numero di Courant;

d = altezza d'acqua media;

V = velocità media della corrente;

g = accelerazione di gravità;

Dt, Dx = passi di calcolo.

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

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

### 2) Criterio della velocità.

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

$$V \cdot \Delta t < \Delta x$$

dove  $V$  è velocità media della corrente.

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

Il modello MIKE+ River 1D genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la distanza tra due sezioni sia maggiore di  $\Delta x$ , vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro  $\Delta x$  o meno.



**ALLEGATO B**  
**Codice di calcolo MIKE by DHI**  
**MIKE+ 2D Overland**



## B.1 PREMESSA

Il MIKE+ 2D OVERLAND è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per la simulazione delle correnti a pelo libero e dei fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi, così come in ambito costiero e offshore. I principali campi di applicazione sono:

- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi;
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE+ 2D OVERLAND offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE+ 2D OVERLAND è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- CLASSIC GRID (Griglia classica singola): le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- MULTIPLE GRID (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- FLEXIBLE MESH (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- CURVILINEAR (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.

In campo fluviale MIKE+ 2D OVERLAND può essere utilizzato in modo integrato con altri codici di calcolo del DHI, in particolare:

- MIKE+ River 1D, grazie all'interfaccia coupling compresa nel MIKE+ 2D OVERLAND, che consente di condurre simulazioni idrodinamiche accoppiando gli approcci 1d e 2d in modo totalmente integrato;
- MIKE+ CS per la simulazione di allagamenti in ambito urbano dalla rete di drenaggio.

## B.2 MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE+ 2D OVERLAND, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE+ 2D OVERLAND permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/Evaporazioni;
- radiation stresses;
- pozzi e sorgenti.

Come menzionato in precedenza, i risultati di una simulazione MIKE+ 2D OVERLAND HD possono essere usati come input per la simulazione di fenomeni fisici strettamente dipendenti dagli aspetti idrodinamici:

- trasporto di sostanze disciolte/sospese in acqua, modulo AD e modulo "Mud Transport";
- trasporto solido di materiale non coesivo, modulo ST;
- qualità delle acque ed idroecologia, modulo ECO Lab.

Infine, per quanto riguarda le analisi dei fenomeni di esondazione, MIKE+ 2D OVERLAND può essere accoppiato in modo dinamico attraverso l'interfaccia integrata di Coupling al codice monodimensionale MIKE+ River 1D, per la simulazione degli alvei e dei canali, ed al codice MIKE+ CS, per la simulazione delle reti di drenaggio e collettamento urbano, schematizzando il dominio di calcolo in modo integrato 1D/2D.

Il modulo idrodinamico HD del MIKE+ 2D Overland risolve le equazioni complete del moto di De St. Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema delle equazioni di De St. Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega q - fV_x$$

$$+ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial \mathcal{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial y} \right) = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fV_y$$

$$+ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial \mathcal{S}_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial x} \right) = 0$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$  = profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$  = quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$  = portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$  = coefficiente di scabrezza di Chezy;

$G$  = accelerazione di gravità;

$f(V)$  = fattore d'attrito del vento;

$V,V_x,V_y(x,y,t)$  = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

$\Omega(x,y)$  = parametro di Coriolis;

$p_a(x,y,t)$  = pressione atmosferica;

$\rho_w$  = densità dell'acqua;

$x,y$  = coordinate spaziali;

$t$  = tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$  = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

$S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}$  = componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

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

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E \frac{\partial p}{\partial y} \right)$$

(nella direzione x);

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

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

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

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

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

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

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

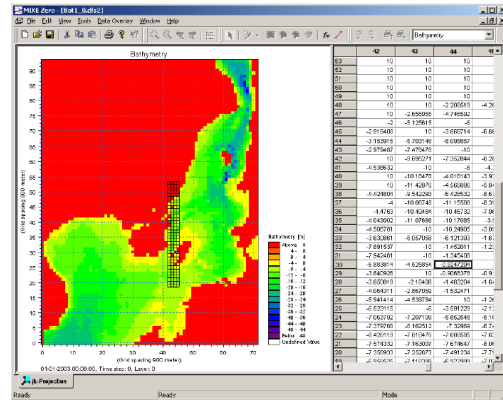
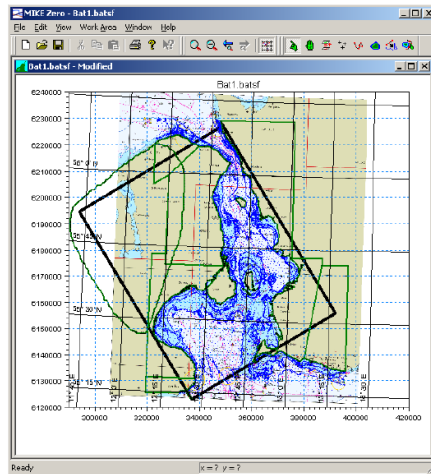
La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria (m<sup>3</sup>/s/m) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m<sup>3</sup>/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

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

Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni plano-altimetriche della batimetria.

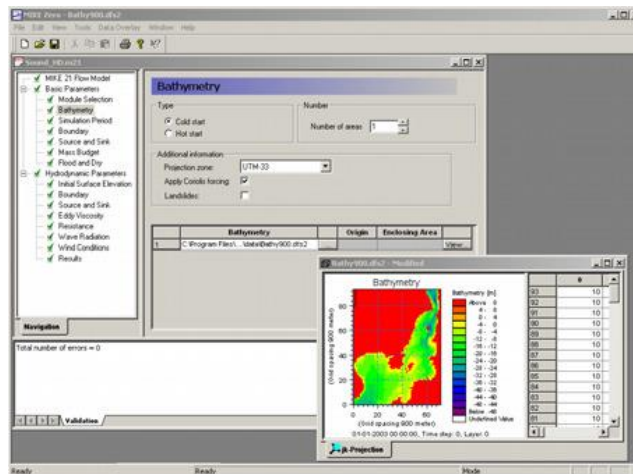
Il medesimo approccio della griglia singola viene utilizzato anche nella versione "griglia multipl-nested grid", che permette di innestare nel dominio di calcolo griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio.

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



Il modello MIKE+ 2D OVERLAND HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);
- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).



I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Ad esempio, per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;

- velocità di corrente e direzione.

