

## Città Genova - Torrente Lavagna

Approfondimento idraulico del Piano di Bacino del torrente Lavagna



Città Metropolitana di Genova

Relazione Tecnica

Dicembre 2015

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



## Città Genova - Torrente Lavagna

Approfondimento idraulico del Piano di Bacino del  
torrente Lavagna

Relazione Tecnica

Committente Città Metropolitana di Genova  
Referente del Committente Dott.ssa Maria Traverso



Project manager	Davide Persi
Quality supervisor	Andrea Crosta
Author	Dario Rebagliati
Codice elaborato	22801176-01-00100
Data di approvazione	23 dicembre 2015
Revisione	1.0
Classificazione	Open



## INDICE

<b>1</b>	<b>Premessa</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Schema degli assetti geometrici e dei dati pregressi</b> .....	<b>2</b>
2.1	Studi e dati pregressi .....	2
2.2	Dati geometrici .....	2
<b>3</b>	<b>Analisi idrologica</b> .....	<b>3</b>
3.1	Premessa .....	3
3.2	Inquadramento dei bacini idrografici .....	4
3.3	Caratterizzazione idrologica dei bacini idrografici .....	5
3.4	Idrogrammi per assegnato tempo di ritorno .....	6
<b>4</b>	<b>Analisi idraulica</b> .....	<b>9</b>
4.1	Premessa .....	9
4.2	Approccio modellistico generale .....	10
4.3	Schematizzazione dell'alveo .....	10
4.3.1	Geometria delle sezioni trasversali .....	11
4.3.2	Scabrezza idraulica .....	14
4.3.3	Condizioni al contorno .....	15
4.4	Messa a punto del setup bidimensionale .....	17
4.4.1	Costruzione della griglia di calcolo .....	18
4.4.2	Condizioni iniziali e al contorno .....	20
4.4.3	Scabrezza .....	21
4.5	Accoppiamento modelli 1D+2D .....	21
4.6	Risultati della modellazione per eventi ad assegnato tempo di ritorno .....	22
4.7	Analisi evento 2014 .....	25
<b>5</b>	<b>Proposta di fasce di pericolosità idraulica</b> .....	<b>29</b>
5.1	Premessa .....	29
5.2	Criteri per la definizione delle fasce di pericolosità idraulica .....	30
5.3	Risultati .....	32
<b>6</b>	<b>Proposta di fascia di riassetto fluviale</b> .....	<b>37</b>
6.1	Premessa .....	37
6.2	Criteri per la definizione della fascia di riassetto fluviale .....	37
6.3	Risultati .....	38
<b>7</b>	<b>Scenari di intervento – Comune di S. Colombano Certenoli</b> .....	<b>39</b>
7.1	Premessa .....	39
7.2	Ipotesi di intervento .....	41
7.3	Risultati .....	42
<b>8</b>	<b>Sopralluogo</b> .....	<b>44</b>
<b>9</b>	<b>Conclusioni</b> .....	<b>47</b>

## ALLEGATI

**ALLEGATO A – Tabelle delle grandezze idrodinamiche in alveo**

**ALLEGATO B – MIKE 11 RR UHM**

Descrizione tecnica

**ALLEGATO C – MIKE 11 HD**

Descrizione tecnica

**ALLEGATO D – MIKE 21 HD**

Descrizione tecnica

## 1 Premessa

Con Determinazione Dirigenziale n°2724 del 29/06/2015, la Città Metropolitana di Genova, Direzione Pianificazione Generale e di Bacino, ha incaricato DHI Srl dell'esecuzione di un approfondimento idraulico del Piano di Bacino del torrente Lavagna, nel tratto compreso tra il ponte della SP58 in località Pian dei Manzi, in Comune di Coreglia Ligure, e la confluenza con il torrente Graveglia. Finalità generale dello studio è l'individuazione con maggiore accuratezza delle aree inondabili del torrente Lavagna mediante l'utilizzo di un modello idraulico bidimensionale, nella prospettiva organica e unitaria propria del Piano di Bacino.

In dettaglio, le attività previste dall'incarico sono così esplicitate:

- verifica ed eventuale integrazione delle informazioni topografiche messe a disposizione dall'Amministrazione al fine di ottenere un modello digitale del terreno aggiornato ed adeguato agli scopi previsti dallo studio;
- implementazione di un modello idraulico bidimensionale, volto all'individuazione delle aree inondabili con tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni, dei relativi tiranti massimi e velocità di scorrimento;
- analisi e comparazione degli interventi idraulici e urbanistici già previsti lungo il tratto in esame al fine di concretizzare un quadro unitario di intervento a scala di bacino che individui gli interventi di mitigazione del rischio idraulico a tutela delle aree già insediate, senza trascurare la salvaguardia dell'assetto ecologico del corso d'acqua e lo sviluppo delle potenzialità turistico-ricettive dello stesso.

Risulta inoltre opportuno citare che, in una precedente Determinazione Dirigenziale della Città Metropolitana di Genova, n°1842 del 07/05/2015, avente per oggetto l'integrazione di una pregressa Determinazione (n°1622 del 20/04/2015) in erente il presente approfondimento idraulico, viene specificato come parte delle attività previste sia anche la definizione della fascia di riassetto fluviale e la valutazione della fattibilità degli interventi strutturali di messa in sicurezza, al fine di consentire, nella successiva fase di progettazione preliminare, una corretta definizione dell'assetto progettuale del tratto di corso d'acqua nel Comune di San Colombano Certenoli.

Il presente elaborato descrive le attività, svolte nel presente incarico, inerenti all'approfondimento idraulico del torrente Lavagna. Il Cap. 2 descrive le informazioni di base, in termini di assetti geometrici e dati pregressi, utilizzate per la costruzione dei modelli numerici, mentre i Cap. 3 e 4 descrivono rispettivamente l'analisi idrologica e idraulica svolte per eventi ad assegnato tempo di ritorno. I successivi Cap. 5 e 6 illustrano la metodologia, e i conseguenti esiti, con cui sono state elaborate una proposta rispettivamente di fasce di pericolosità idraulica e di fascia di riassetto fluviale, mentre nel successivo Cap. 7 sono proposti alcuni scenari di intervento di messa in sicurezza di una porzione di territorio nel Comune di San Colombano Certenoli. A conclusione nel Cap. 8 viene svolto un resoconto dei riscontri ottenuti in fase di sopralluogo rispetto alle valutazioni svolte, a seguito del quale nel Cap. 9 viene tracciato un quadro conclusivo degli esiti dell'approfondimento idraulico oggetto di incarico.

## 2 Schema degli assetti geometrici e dei dati pregressi

### 2.1 Studi e dati pregressi

Lo svolgimento del presente approfondimento idraulico ha richiesto in via preliminare l'analisi di una serie di precedenti studi e documenti inerenti il corso d'acqua oggetto di studio. A tal proposito si specifica come i bacini idrografici afferenti al tratto in esame, risultino oggetto di due distinti Piani di Bacino Stralcio sul Rischio Idrogeologico, sulla base della perimetrazione del territorio in essi adottata dalla competente Autorità di Bacino. In particolare, procedendo a partire da monte nel tratto di indagine, il corso d'acqua risulta denominato torrente Lavagna fino alla confluenza dello stesso con il torrente Sturla, in cui è localizzata la sezione di chiusura del bacino idrografico del Lavagna, oggetto del relativo Piano di Bacino Stralcio. A valle di tale confluenza, il corso d'acqua prende il nome di Fiume Entella, che nel presente incarico risulta analizzato fino alla confluenza con il torrente Graveglia: i relativi bacini idrografici del torrente Sturla, del torrente Graveglia e del bacino recapitante nel tratto intercorrente alle due confluenze, risultano oggetto del Piano di Bacino Stralcio dell'Ambito Regionale di Bacino n° 16.

Di seguito vengono citati gli studi propedeutici consultati per lo svolgimento del presente approfondimento idraulico:

- Piano di Bacino Stralcio per la tutela del rischio idrogeologico del torrente Lavagna (ai sensi dell'art. 1, comma 1, del D.L. 180/1998 convertito in L. 267/1998) adottato con D.C.M. n. 27 del 25/06/2015, ricordando che fino alla sua approvazione è necessario consultare anche il piano Approvato con DCP n. 29 del 09/04/2002 e successive modifiche;
- Piano di Bacino Stralcio sul rischio idrogeologico dell'Ambito Regionale di Bacino n° 16, Approvato con DCP n. 3 del 29.01.2003 e successive modifiche (in particolare nella versione modificata con DGP n. 121 del 18.11.2013)
- Relazione tecnica, redatta dallo Studio Tecnico Associato Ing. Brizzolara & Ing. Sturla nel 2013, ad aggiornamento e integrazione di precedente relazione presentata nel dicembre 2012 e costituente parte integrante dell'aggiornamento del progetto preliminare inerente l'intervento denominato "lavori di riprofilatura del torrente Sturla nel tratto compreso tra la località Terrarossa e la confluenza con il torrente Lavagna – comune di Carasco – ambito 16 torrente Sturla - Piano Bacino Stralcio D.L. 180/98 e ss.mm.ii.”.

### 2.2 Dati geometrici

I dati geometrici considerati per l'implementazione dei modelli idraulici attengono sostanzialmente alla corretta rappresentazione da un lato del corso d'acqua e relativi manufatti di sponda e di attraversamento, dall'altro alla definizione dell'altimetria del terreno nelle aree potenzialmente oggetto di allagamento. Come verrà illustrato in dettaglio nel successivo Cap. 4, le due tipologie di dati citati vengono impiegati per l'implementazione di due distinti modelli idraulici, uno monodimensionale per l'alveo inciso del corso d'acqua e uno bidimensionale per le aree golenali circostanti. Tali due modelli, pur se distinti, risultano però dinamicamente collegati tra loro, e conseguentemente in fase di definizione degli assetti geometrici, in aggiunta all'implementazione singola dei due modelli, occorre anche verificare la congruenza tra le rispettive informazioni geometriche.

Per quanto riguarda la componente geometrica monodimensionale, attinente all'alveo inciso del corso d'acqua, i dati geometrici acquisiti provengono dalle seguenti fonti informative:



- modello implementato in codice HEC-RAS denominato “lavagna2014”, fornito dal Committente del presente studio, che rappresenta le sezioni ufficiali del PdB del t. Lavagna, per le quali fornisce l’informazione geometrica più recente ed accurata disponibile;
- modello implementato in codice HEC-RAS denominato “Entella\_PP2004”, fornito dal Committente, che rappresenta le sezioni ufficiali dell’Entella riportate nel PdB dell’Ambito 16, a partire originariamente dallo studio idraulico di dettaglio eseguito nel 2003 dall’Associazione temporanea di imprese Enel.Hydro-STI-MEDINGEGNERIA ed approvato con DCP n. 54 del 19/11/2003.
- modello implementato in codice HEC-RAS all’interno del sopracitato studio sul torrente Sturla, redatto dallo Studio Tecnico Ingg. Sturla e Brizzolara, che rappresenta un aggiornamento rispetto al precedente modello “Entella\_PP2004” anche per tutto il tratto di fiume Entella compreso tra le confluenze del t. Sturla e del t. Graveglia; in particolare l’aggiornamento è dovuto al recepimento, nel modello idraulico, delle geometrie restituite da recenti rilievi topografici di dettaglio.

In riferimento al dominio bidimensionale, la caratterizzazione altimetrica del territorio è stata fornita dal Committente sotto forma di DTM (modello digitale del terreno) ricavato da rilievo LIDAR, reperito dal Ministero dell’Ambiente, caratterizzato da una risoluzione di cella di 1m su tutto il bacino di studio.

Ulteriori dati forniti dal Committente consistono nei diversi tematismi del Piano di Bacino di utilità per l’elaborazione del presente studio, alcuni disponibili per tutto il tratto di studio mentre altri per il solo tratto afferente al torrente Lavagna oppure al solo fiume Entella, in termini di traccia planimetrica delle sezioni ufficiali del Piano, perimetrazione dei bacini idrografici, traccia planimetrica del reticolo idrografico, fasce attualmente vigenti di pericolosità idraulica e di riassetto fluviale, oltre ad alcuni tematismi cartografici di base (tavole CTR e Ortofoto).

## 3 Analisi idrologica

### 3.1 Premessa

Nel presente capitolo sono riportate le analisi svolte per la determinazione degli idrogrammi di portata, attività propedeutiche alla simulazione idrodinamica della propagazione delle acque di piena in alveo e la loro successiva esondazione sul territorio circostante (attività descritte nel Cap.4).

Nei successivi paragrafi del presente capitolo sono descritte, con particolare riferimento ai dati di input utilizzati, alle ipotesi assunte ed ai risultati ottenuti, le seguenti attività:

- l’inquadramento dei bacini idrografici oggetto di studio e della schematizzazione adottata per la rappresentazione dei diversi contributi idrologici nel corso d’acqua principale;
- la caratterizzazione idrologica dei bacini idrografici, propedeutica all’implementazione dei modelli numerici con i quali determinare gli idrogrammi di portata nel rispetto dei valori di riferimento e dei criteri del Piano di Bacino;
- la ricostruzione degli idrogrammi di piena per differente tempo di ritorno (TR50, 200 e 500 anni) sui tratti oggetto di studio del torrente Lavagna e del fiume Entella: l’analisi ha come scopo la sola ricostruzione degli idrogrammi di piena, mentre il valore di portata al colmo è assunto così come definito nell’attuale Piano di Bacino; non sono infatti oggetto dell’incarico elaborazioni di dati pluviometrici e aggiornamento delle portate di progetto.

## 3.2 Inquadramento dei bacini idrografici

Il bacino del torrente Lavagna, valutato alla sezione di chiusura della confluenza con il torrente Sturla, ha un'asta principale della lunghezza di circa 31 km e un bacino idrografico complessivo di circa 160 Km<sup>2</sup>. Per la caratterizzazione dello stesso si è fatto in primo luogo riferimento a quanto descritto nel Piano di Bacino, in particolare nella Relazione Generale e nelle tavole allegate.

Il tratto di torrente Lavagna oggetto di studio inizia dal ponte della SP 58 in località Pian dei Manzi nel Comune di Coreglia Ligure, in corrispondenza della sezione LAV56; tuttavia nella presente analisi si è ritenuto opportuno definire quale sezione iniziale la LAV62, posta circa 1km a monte della LAV56 e in prossimità della sezione di chiusura 22A, localizzata a valle della confluenza del torrente Isolona, affluente in sponda sinistra del Lavagna. Il bacino contribuente alla sezione di chiusura 22A, che rappresenta il contributo di testata al tratto oggetto di studio, è caratterizzato da una superficie sottesa di 128,8 km<sup>2</sup>. Nel tratto successivo del torrente Lavagna non sono presenti contributi laterali di particolare rilievo, in termini di contributi puntuali significativamente maggiori del complesso degli altri affluenti, per cui è stato ritenuto sufficiente caratterizzare il bacino con una sola sezione di chiusura intermedia tra quella del bacino di testata e quella terminale, ipotizzando tra di esse contributi idrologici complessivi equivalenti. Sono state pertanto identificate la sezione di controllo 12A, localizzata a valle della confluenza del Fossato Vallefredda, affluente in sponda destra, corrispondente alla sezione idraulica LAV36; e quella terminale del Lavagna, denominata 1A, corrispondente alla sezione idraulica LAV01 e posizionata a monte della confluenza del torrente Sturla. I bacini sottesi alle due sezioni di chiusura citate hanno superficie rispettivamente pari a 145.8 e 162.6 Km<sup>2</sup>, quest'ultima pari all'intero bacino del Lavagna.

Nel successivo tratto di studio, in cui il corso d'acqua prende il nome di fiume Entella, sono state identificate le seguenti sezioni di chiusura di riferimento, le cui informazioni in termini di anagrafica e caratterizzazione idrologica sono state ricavate dal Piano di Bacino dell'Ambito n°16 precedentemente citato:

- a valle della confluenza del torrente Sturla, sezione di chiusura denominata EE7, in cui il bacino contribuente comprende quelli di entrambi i corsi d'acqua affluenti (torrenti Lavagna e Sturla), per una superficie complessiva di 292.3 Km<sup>2</sup>;
- a monte della confluenza del torrente Graveglia, sezione di chiusura denominata EE6, in cui il bacino contribuente ha una superficie di 296,8 Km<sup>2</sup>, di poco superiore a quella della precedente sezione EE7 in quanto la superficie contribuente addizionale è limitata al bacino residuo recapitante in circa 4 Km di corso d'acqua caratterizzato da affluenti laterali di modesta entità;
- a valle della confluenza del torrente Graveglia, sezione di chiusura denominata EE5, in cui il bacino contribuente ha una superficie di 358,8 Km<sup>2</sup>, comprendente anche il bacino del torrente Graveglia.

In considerazione della ridotta entità del contributo idrologico nel tratto intercorrente alle due confluenze con i torrenti Sturla e Graveglia, nell'ambito della modellazione idraulica si è ritenuto appropriato applicare alla sezione EE7 l'idrogramma di piena relativo alla sezione EE6, osservando che tale scelta risulta a favore di cautela e che il contributo che le differenzia risulta generalmente dell'ordine dei margini di approssimazione della schematizzazione idrologica complessiva e pari indicativamente al 1% delle portate in oggetto.

### 3.3 Caratterizzazione idrologica dei bacini idrografici

La caratterizzazione idrologica dei bacini oggetto di studio è stata ricavata a partire dalle informazioni contenute nelle Relazioni Generali, e relative Appendici, dei due Piani di Bacino oggetto di analisi (torrente Lavagna e Ambito n°16).

In dettaglio, nel Piano la caratterizzazione è stata effettuata mediante l'implementazione di un modello probabilistico geomorfoclimatico, nel quale è stato necessario definire i valori dei parametri climatici e geomorfologici in corrispondenza di una serie di sezioni di interesse. In particolare, per quanto riguarda i parametri geomorfologici si è fatto riferimento al metodo SCS-CN, andando a caratterizzare i bacini essenzialmente mediante un parametro di assorbimento quale il valore di CN e un parametro cinetico quale il tempo di lag.

La stima del parametro di infiltrazione, cioè dell'indice CN, ha richiesto l'individuazione, a partire dalle carte geolitologiche, pedologiche e di uso del suolo, delle caratteristiche di assorbimento secondo la chiave fornita dalla classificazione idrologica dei suoli e del loro uso proposta dal metodo SCS-CN, mentre per la determinazione del tempo di ritardo del bacino, si è fatto uso della procedura proposta dal SCS, per omogeneità con la scelta del metodo CN, per la quale il tempo di lag  $t_L$  è legato al tempo di corrivazione  $t_C$  secondo la relazione:

$$t_C = 1.67t_L$$

essendo stimato il tempo di corrivazione tramite l'equazione:

$$t_C = \frac{100 L^{0.8} \left[ \left( \frac{1000}{CN} \right) - 9 \right]^{0.7}}{1900 j^{0.5}}$$

in cui L rappresenta la lunghezza massima, espressa in piedi, del percorso canalizzato e j la pendenza media del bacino, espressa in per cento.

La seguente tabella sintetizza le caratteristiche principali dei bacini idrografici recapitanti nelle sezioni di chiusura prese a riferimento per l'implementazione del presente studio. Al riguardo si specifica che i valori di CN e S riportati rappresentano il valore mediato sull'area sottesa dalla rispettiva sezione e che, secondo il metodo del Curve Number (CN) sviluppato dal Soil Conservation Service (SCS) del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, il parametro S rappresenta il massimo volume specifico che può essere invasato nel terreno, con valore determinato in base a quello del parametro CN secondo la relazione:

$$S = S_0 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right)$$

in cui si ha  $S_0=254$  qualora si esprima S in mm.

Nella tabella sono inoltre indicati altri parametri che permettono di rappresentare un quadro complessivo della caratterizzazione idrologica effettuata, con la relativa stima dei parametri del modello geomorfoclimatico definito, oltre ai valori di portata al colmo con esso determinati per i tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni.

Tabella 3.1 Sintesi dei principali parametri della caratterizzazione idrologica dei bacini idrografici oggetto di studio ricavata dai Piani di Bacino.

Sezione di chiusura	Sez. PdB	Area [km <sup>2</sup> ]	CN [-]	S [mm]	t <sub>L</sub> [h]	t <sub>c</sub> [h]	k <sup>2</sup> [-]	Q50 [m <sup>3</sup> /s]	Q200 [m <sup>3</sup> /s]	Q500 [m <sup>3</sup> /s]
Lavagna testata modello (LAV62)	22A	128.8	67	125.1	2.49	4.2	0.645	797	1403	2037
Lavagna confl. V.Fredda (LAV36)	12A	145.8	67	125.1	2.64	4.4	0.64	856	1507	2188
Lavagna monte confl. T. Sturla (LAV01)	1A	162.6	67	125.1	2.78	4.6	0.64	916	1614	2360
Entella valle confl. T. Sturla	EE7	292.3	68	119.5	3.78	6.3	0.63	1293	2275	3299
Entella monte confl. T. Graveglia	EE6	296.8	68	119.5	3.80	6.3	0.63	1307	2300	3337
Entella valle confl. T. Graveglia	EE5	358.8	68	119.5	4.05	6.8	0.63	1496	2632	3817

In dettaglio le grandezze riportate in tabella sono:

- Sez. PdB: identificativo della sezione di chiusura nel Piano di Bacino;
- Area: area sottesa del bacino;
- CN e S: parametri del metodo SCS-CN;
- t<sub>L</sub>: tempo di lag;
- t<sub>c</sub>: tempo di corrivazione;
- k<sup>2</sup>: coefficiente di ragguaglio all'area delle precipitazioni;
- Q50-Q200-Q500: portate al colmo per assegnato tempo di ritorno.

In conclusione risulta utile evidenziare, come accennato in precedenza, la marginalità della differenza tra i valori riferiti alle sezioni EE7 e EE6, sia in termini di caratteristiche dei bacini (superficie, tempo di corrivazione), che di contributi di portata (valori dell'ordine dell'1% della portata complessiva).

### 3.4 Idrogrammi per assegnato tempo di ritorno

A partire dalla caratterizzazione idrologica dei bacini, integralmente ricavata dei Piani di Bacino del torrente Lavagna e dell'Ambito n°16, si è successivamente proceduto con la definizione degli idrogrammi di piena per differente tempo di ritorno (TR50, 200 e 500 anni), da utilizzare in seguito come condizioni al contorno in ingresso ai modelli idrodinamici.

Operativamente è stato messo a punto un modello idrologico afflussi-deflussi che implementa il metodo dell'idrogramma unitario, mediante il codice di calcolo MIKE 11 – UHM del DHI (di cui è disponibile una descrizione tecnica nell'Allegato B).

Le ipotesi di base per la definizione del modello idrologico sono riassunte in seguito:

- sono stati utilizzati differenti idrogrammi unitari, in particolare quelli adimensionale e triangolare del metodo SCS, al fine di una più approfondita valutazione dei volumi di piena a parità di portata al colmo;
- è stata ipotizzata una portata iniziale di base nulla;

- le perdite idrologiche iniziali sono state calcolate con il metodo SCS a partire dai valori di CN e AMC di seguito specificati; in particolare i valori di CN sono stati ricavati dalla caratterizzazione idrologica dei Piani di Bacino (Tabella 3.1), mantenendo tali valori costanti nella fase di taratura del modello, mentre il valore di AMC è stato assunto pari a 2 per tutti i bacini;
- il “lag time” è stato assegnato pari al valore indicato per ogni bacino in Tabella 3.1, così come determinato nei Piani di Bacino, mantenendolo costante nella fase di taratura del modello;
- la precipitazione è stata definita secondo idrogrammi rettangolari, con durata pari ai rispettivi tempi di concentrazione dei bacini (così come predeterminati in Tabella 3.1) e altezza di pioggia determinata in modo tale da ottenere le portate al colmo ufficiali del Piano di Bacino.

In sintesi, obiettivo del modello idrologico è stata la definizione di idrogrammi di piena coerenti con la caratterizzazione idrologica del Piano di Bacino in termini di portate al colmo per assegnato tempo di ritorno e caratteristiche dei bacini (in particolare CN e Lag Time).

Una valutazione più approfondita è stata invece svolta in riferimento alla forma degli idrogrammi e i conseguenti volumi di piena, per i quali il Piano di Bacino non forniva specifiche di dettaglio, con la consapevolezza che un'errata definizione degli stessi, in un modello idraulico di tipo bidimensionale quale quello impiegato, comporterebbe un altrettanto errata definizione delle aree soggette ad allagamento.

Sono stati quindi ricostruiti e confrontati, con il codice di calcolo MIKE 11 – UHM, idrogrammi di piena ottenuti con due differenti idrogrammi unitari, quello adimensionale e quello triangolare del metodo SCS, in modo da valutare la differente evoluzione dei volumi di piena. Inoltre, poiché nello studio bidimensionale di dettaglio citato nel Piano dell'Ambito n°16 (studio eseguito dall'Associazione temporanea di imprese Enel.Hydro-STI-MEDINGEGNERIA ed approvato con DCP n. 54 del 19/11/2003), venivano definiti gli idrogrammi di piena da applicare quali condizioni al contorno al modello idraulico, è stata svolta una valutazione anche in merito ad essi. Da questa analisi comparativa emerge che gli idrogrammi ottenuti con idrogramma unitario adimensionale hanno forma più simile a quelli dello studio bidimensionale, in particolare con una fase ascendente e discendente più prolungata; tuttavia quelli ottenuti con idrogramma unitario triangolare, rapportati a quelli dell'adimensionale, pur presentando effettivamente fasi ascendenti e discendenti meno prolungate, mostrano però maggiori volumi di piena per gli elevati valori di portate. Da questa osservazione, se ne deduce che la scelta dell'utilizzo degli idrogrammi triangolari è da ritenersi a favore di sicurezza, perché a parità di volume complessivo di piena presenta maggiori volumi di deflusso in corrispondenza di quei valori di portata che effettivamente generano gli allagamenti nelle aree circostanti il corso d'acqua. La seguente figura presenta un confronto tra due idrogrammi di piena omologhi (stesso bacino, tempo di ritorno e portata al colmo) ottenuti con idrogramma unitario rispettivamente triangolare e adimensionale.

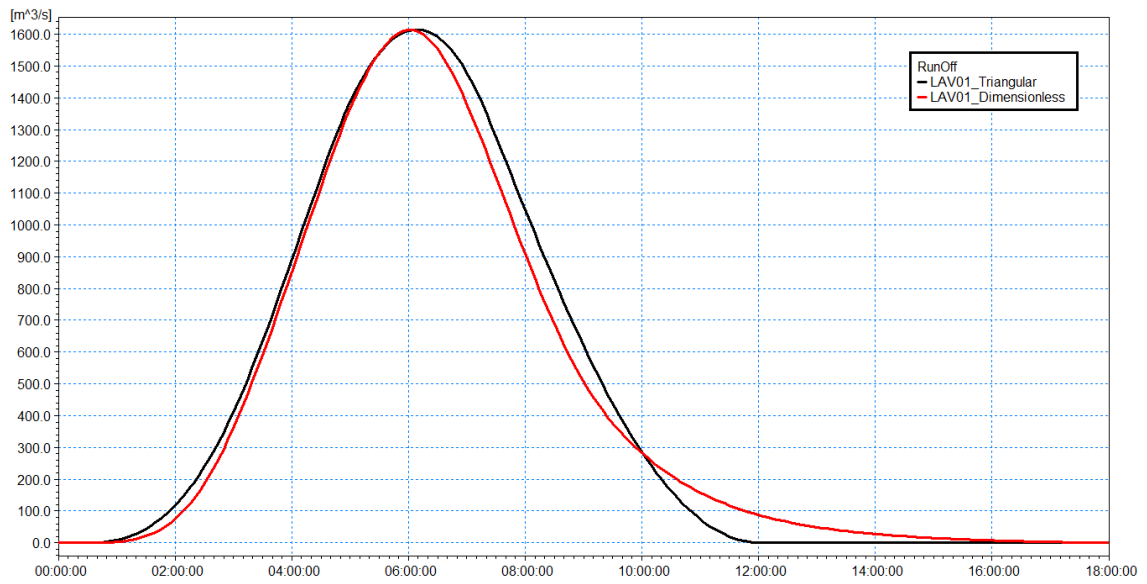


Figura 3.1 Idrogrammi di piena per tempo di ritorno 200 anni alla sezione di chiusura del bacino del torrente Lavagna (LAV01) determinati con idrogramma unitario triangolare e adimensionale del metodo SCS.

Le seguenti figure rappresentano graficamente gli idrogrammi di piena ottenuti per tutte le sezioni di chiusura dei bacini selezionati, rispettivamente per i tre tempi di ritorno di 50-200-500 anni, i cui valori di portata al colmo sono riportati nella precedente Tabella 3.1.

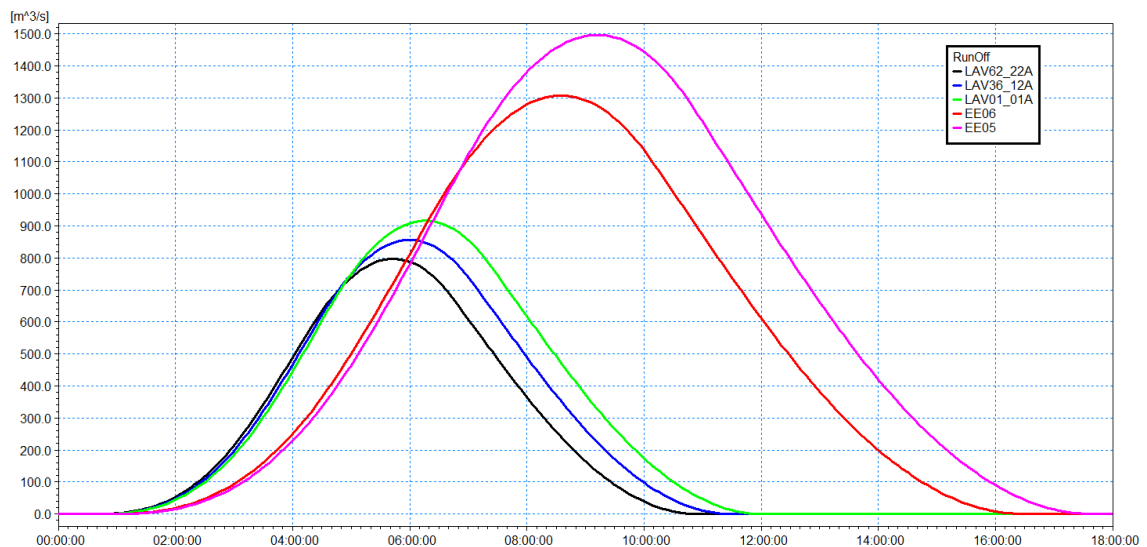


Figura 3.2 Idrogrammi di piena per tempo di ritorno 50 anni per i bacini oggetto di studio, identificati con la relativa sezione di chiusura.

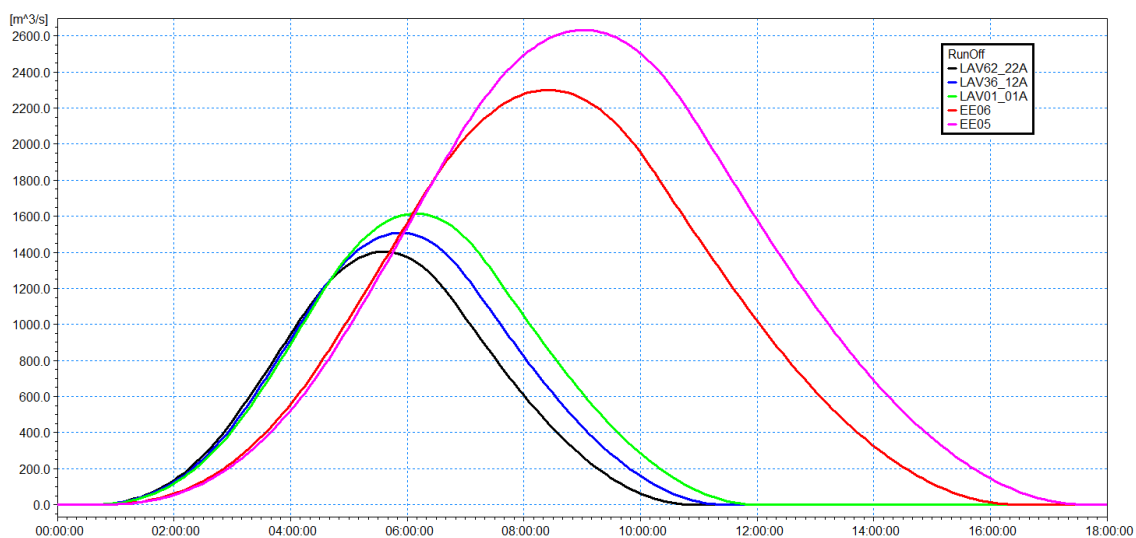


Figura 3.3 Idrogrammi di piena per tempo di ritorno 200 anni per i bacini oggetto di studio, identificati con la relativa sezione di chiusura.

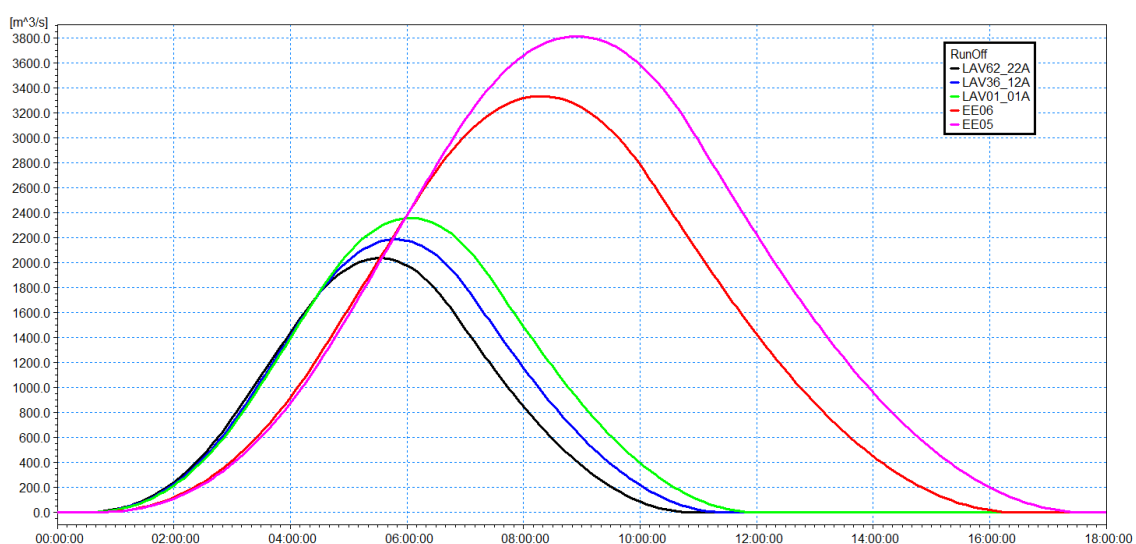


Figura 3.4 Idrogrammi di piena per tempo di ritorno 500 anni per i bacini oggetto di studio, identificati con la relativa sezione di chiusura.

## 4 Analisi idraulica

### 4.1 Premessa

Nel presente capitolo sono descritte le attività relative alla simulazione idrodinamica della propagazione delle acque di piena in alveo e la loro successiva esondazione nel territorio circostante, in riferimento al dominio di studio oggetto dell'incarico.

Le analisi hanno utilizzato, quali informazioni di base, i dati pregressi citati nel precedente Cap. 2, a partire dai quali è stato implementato un modello idraulico basato su uno schema integrato monodimensionale e bidimensionale. Definiti i limiti di interfaccia tra i due domini di calcolo, si è schematizzato in MIKE 11 il modello idraulico dell'alveo inciso del corso d'acqua oggetto di studio, torrente Lavagna e fiume Entella, in termini di definizione delle sezioni trasversali, degli attraversamenti, della scabrezza idraulica, delle condizioni al contorno e degli altri parametri

idrodinamici della modellazione monodimensionale (Par. 4.3); analogamente, per la parte di dominio di studio schematizzata nel modello bidimensionale implementato in MIKE 21, è stata definita la griglia di calcolo e altri parametri idrodinamici quali le condizioni al contorno, il timestep di simulazione, ecc. (Par. 4.4). Infine, sono state definite in MIKE FLOOD le strutture di collegamento tra i due modelli 1D e 2D. (Par. 4.5).

Al termine del Capitolo, nel Par. 4.6, vengono illustrati i risultati ottenuti per eventi di piena con tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni dei corsi d'acqua Lavagna ed Entella.

## 4.2 Approccio modellistico generale

Sull'area del dominio di studio è stato messo a punto un modello idrodinamico basato sul codice di calcolo MIKE FLOOD del DHI.

Il codice di calcolo MIKE FLOOD è uno strumento modellistico integrato che permette di accoppiare in maniera dinamica, attraverso un'interfaccia utente grafica, il codice monodimensionale MIKE 11 e quello bidimensionale MIKE 21 (per una descrizione sintetica dei quali si rimanda agli allegati C e D).

Il modulo consente di sfruttare al massimo le potenzialità di MIKE 11 e di MIKE 21, facendo intervenire nell'ambito di uno stesso modello l'uno o l'altro codice in funzione delle specifiche esigenze di rappresentazione geometrica e di simulazione necessarie: MIKE 11 per la simulazione monodimensionale di tratti di alveo incisi e per il deflusso idrodinamico attraverso ponti, tombini, salti di fondo ecc., MIKE 21 per il deflusso nelle aree golenali o di esondazione e di invaso.

MIKE FLOOD presenta le seguenti caratteristiche principali:

- MIKE 11 e MIKE 21 rimangono singoli codici indipendenti l'un l'altro nella messa a punto, nell'interfaccia grafica e nell'input-output;
- una specifica interfaccia grafica consente di definire i collegamenti reciproci e biunivoci di MIKE 11 e MIKE 21 per gli scambi di flusso e la congruenza dei livelli idrici di calcolo.

L'alveo del corso d'acqua è stato modellato con approccio monodimensionale attraverso l'inserimento delle sezioni trasversali disponibili, comprensive delle geometrie dei ponti interferenti con il deflusso di piena.

L'alveo è stato poi collegato dinamicamente alle aree laterali inondabili, sia in sponda destra che in sponda sinistra, mediante speciali funzioni di MIKE FLOOD, nel rispetto delle reali quote di sponda. La modellazione accurata della dinamica di piena, effettuata con approccio bidimensionale, è stata estesa all'intera zona in esame, sia in sponda destra che in sponda sinistra, rappresentata mediante un modello del terreno a celle quadrate, contenente tutte le strutture in grado di avere effetto nella propagazione della piena stessa sul territorio.

Per quanto concerne le modellazioni in alveo, i risultati delle simulazioni condotte sono forniti sotto forma di tabelle contenenti i principali parametri idraulici sezione per sezione. Relativamente alle aree inondate, invece, i risultati ottenuti sono forniti sotto forma di mappe di tiranti idrici e velocità di scorrimento riferite ai loro valori massimi.

## 4.3 Schematizzazione dell'alveo

Di seguito si illustra in dettaglio la schematizzazione monodimensionale del tratto di alveo dei corsi d'acqua Lavagna ed Entella analizzati. In aggiunta alla descrizione del setup modellistico, si specificano le scelte e le assunzioni che hanno portato a definire alcune caratteristiche



specifiche del modello, oltre alle fonti da cui sono state tratte le informazioni associate ai vari aspetti dello stesso. La modellazione è stata effettuata con il codice di calcolo MIKE 11 HD del DHI, descritto nell'Allegato C.

### 4.3.1 Geometria delle sezioni trasversali

Il tratto di corso d'acqua schematizzato con approccio monodimensionale ripercorre quanto previsto dal presente incarico, con opportune estensioni valutate per la corretta rappresentazione delle condizioni idrodinamiche. Il tratto ufficialmente oggetto di approfondimento idraulico si estende dal ponte della SP58 sul torrente Lavagna, in località Pian dei Manzi nel Comune di Coreglia Ligure, fino alla confluenza del fiume Entella con il torrente Graveglia.

Anche in considerazione di quanto riportato nell'analisi idrologica (Cap. 3), la sezione iniziale del modello in MIKE 11 è stata posta in corrispondenza della sezione LAV62, localizzata a valle della confluenza del torrente Isolona e circa 1km a monte del ponte della SP58, presso cui è posizionata la sezione LAV56. A partire da esso il torrente Lavagna scorre all'interno della Val Fontanabuona per circa 9.5km fino alla confluenza del torrente Sturla, a monte della quale è posizionata l'ultima sezione ufficiale del PdB del Lavagna denominata LAV01.

Per quanto riguarda invece la sezione terminale del modello sul fiume Entella, essa è stata posta immediatamente a valle della passerella Rivarola, situata a sua volta circa 300m a valle della confluenza del torrente Graveglia. A partire dalla confluenza tra i torrenti Lavagna e Sturla, da cui ha origine il fiume Entella, la passerella citata è situata dopo circa 4.3 km di sviluppo longitudinale del corso d'acqua; complessivamente pertanto il modello in MIKE 11 si estende per circa 14.8 km, essendo più esteso per circa 1km a monte e 0.4km a valle rispetto al tratto contrattualmente definito.

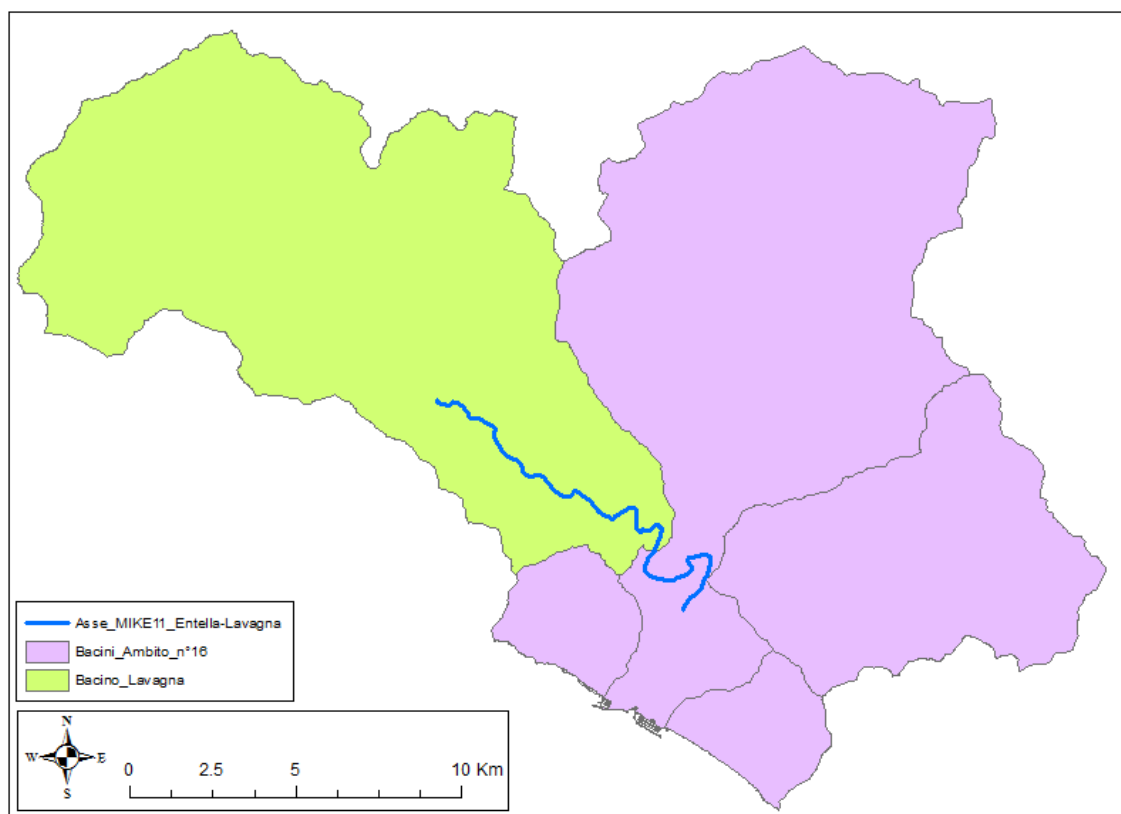


Figura 4.1 Estensione del tratto di corso d'acqua oggetto di studio rapportato ai bacini idrografici di torrente Lavagna e Ambito n°16.

In Figura 4.1 si riporta l'estensione del tratto analizzato nel presente studio rapportato all'estensione dei bacini idrografici dei rispettivi corsi d'acqua.

La geometria delle sezioni trasversali è stata ricavata a partire da preesistenti modelli HEC RAS, citati nel precedente Cap. 2; in particolare quello denominato "Lavagna2014" per il tratto afferente al torrente Lavagna e quello "Sturla-Brizzolara" per il tratto afferente al fiume Entella. Analogamente dai citati modelli HEC RAS sono state ricavate anche le geometrie degli attraversamenti del corso d'acqua, caratterizzati dalle pile e dagli impalcati dei ponti. Per quanto riguarda le progressive assegnate alle sezioni, si è proceduto in modo di poco differenziato tra i due modelli in input: per il Lavagna, non essendo il modello HECRAS georiferito, si è fatto riferimento alla posizione della traccia planimetrica delle sezioni ufficiali del Piano di Bacino, disponibile da specifico tematismo fornito dal Committente; per l'Entella, invece, il modello HECRAS risultava georiferito. A partire dalla localizzazione planimetrica delle sezioni, sono state determinate le rispettive progressive in base all'intersezione con l'asse del corso d'acqua. Tale aspetto risulta di particolare importanza nel caso in cui, quale lo studio in oggetto, si debba collegare dinamicamente il modello monodimensionale con quello bidimensionale, per cui una non corretta localizzazione planimetrica delle sezioni comporterebbe uno sfasamento e conseguente errato collegamento tra di essi.

Il numero di sezioni inserite nel modello risulta complessivamente pari a 134, di cui 69 per il torrente Lavagna e 65 per il fiume Entella. In considerazione dell'accoppiamento tra i modelli monodimensionale del corso d'acqua e bidimensionale del territorio circostante, è stata condotta una verifica comparativa tra i valori di altimetria delle sezioni e del DTM fornito dal Committente, risultando del tutto congruenti.

La Tabella 4.1 elenca tutte le sezioni inserite nel modello, mentre la Tabella 4.2 riassume gli attraversamenti schematizzati nel tratto di studio.

Tabella 4.1 Tabella delle sezioni trasversali del tratto oggetto di modellazione in MIKE 11, con indicazione della nomenclatura della sezione e relativa progressiva idraulica.

Progr. [m]	SEZ [-]	Progr. [m]	SEZ [-]	Progr. [m]	SEZ [-]
0.0	LAV62	7067.2	LAV22	12018.5	140
96.5	LAV61	7317.6	LAV21	12095.1	139.5
322.9	LAV60	7645.2	LAV20	12117.3	139_m_P.SP
493.2	LAV59	7801.0	LAV19	12138.0	137_v_P.SP
709.5	LAV58	7959.0	LAV18	12172.1	136
962.2	LAV57	8122.4	LAV17	12225.8	135
1014.6	LAV56_m_PT08	8301.6	LAV16_m_PT02	12277.5	134
1024.1	LAV56_v_PT08	8307.6	LAV16_v_PT02	12329.8	133
1066.4	LAV55	8457.5	LAV15	12381.7	132
1264.5	LAV54	8597.5	LAV14	12433.3	131
1500.2	LAV53_m_PT07	8852.8	LAV13	12483.9	130
1503.2	LAV53_v_PT07	9133.3	LAV12	12533.8	129
1659.0	LAV52	9313.5	LAV11	12588.7	128
1842.0	LAV51a	9467.1	LAV10	12636.8	127
2125.7	LAV51	9551.0	LAV09	12678.8	126
2306.1	LAV50_m_PT06	9617.3	LAV08	12723.3	125
2311.1	LAV50_v_PT06	9693.7	LAV07	12768.0	124
2590.9	LAV47	9765.3	LAV06	12815.1	123
2825.1	LAV46	9909.1	LAV05	12854.2	122
2918.6	LAV45	10050.2	LAV04	12900.7	121

Progr. [m]	SEZ [-]	Progr. [m]	SEZ [-]	Progr. [m]	SEZ [-]
3073.8	LAV44	10196.8	LAV03	12936.4	120
3220.3	LAV43	10343.8	LAV02_m_PT01	12971.9	119
3384.7	LAV42	10349.8	LAV02_v_PT01	13023.0	118
3444.1	LAV41_m_PT05	10446.1	LAV01	13075.5	117
3451.1	LAV41_v_PT05	10512.3	160	13151.3	116
3597.6	LAV40	10559.6	159	13222.8	115
3827.9	LAV39_m_briglia	10602.7	158	13273.9	114
3828.9	LAV39_v_briglia	10653.3	157	13324.1	113
3928.7	LAV37	10684.9	156	13376.5	112
4111.4	LAV36	10724.9	155	13428.1	111
4369.1	LAV35	10796.2	154	13478.3	110
4568.8	LAV34	10861.0	153	13597.5	108
4757.1	LAV33_m_PT04	10928.1	152	13689.4	107
4759.1	LAV33_v_PT04	11021.5	151	13874.1	106_m_P.Birago
4970.9	LAV32	11142.1	150	13889.4	104_v_P.Birago
5106.6	LAV31	11217.6	149	14039.9	103
5392.2	LAV30	11337.1	148	14172.8	102
5655.5	LAV29	11444.5	147	14299.3	101
5898.6	LAV28	11550.3	146_m_P.Vecchio	14400.0	confl.Grav.
6026.7	LAV27	11561.5	144_v_P.Vecchio	14564.0	89
6251.7	LAV26_m_PT03	11569.5	143.8	14648.9	88
6260.7	LAV26_v_PT03	11578.0	143.3	14704.7	87_m_Pass.Rivar.
6400.8	LAV25	11673.8	143	14709.4	85_v_Pass.Rivar.
6601.7	LAV24	11786.2	142	14769.9	84
6803.1	LAV23	11901.3	141		

Tabella 4.2 Tabella degli attraversamenti schematizzati nel modello MIKE 11, con indicazione di: corso d'acqua di interesse, nomenclatura della sezione a cui è associato l'attraversamento, relativa progressiva idraulica, estensione longitudinale del manufatto e breve descrizione utile all'identificazione dell'opera.

Corso d'acqua	SEZ	Progr. [-]	L impalcato [m]	Descrizione
T. Lavagna	LAV_56	1024.1	8.5	PT08
T. Lavagna	LAV_53	1500.2	2.0	PT07
T. Lavagna	LAV_50	2308.6	4.0	PT06
T. Lavagna	LAV_41	3451.1	6.0	PT05
T. Lavagna	LAV_33	4757.1	1.0	PT04
T. Lavagna	LAV_26	6260.7	8.0	PT03
T. Lavagna	LAV_16	8307.6	5.0	PT02
T. Lavagna	LAV_02	10349.8	3.0	PT01
F. Entella	145	11558.3	4.5	Ponte Vecchio
F. Entella	138	12126.9	7.0	Ponte Strada Provinciale
F. Entella	105	13881.1	10.0	Ponte di Birago
F. Entella	86	14708.7	2.0	Passerella pedonale di Rivarola

### 4.3.2 Scabrezza idraulica

Di seguito si riportano i coefficienti di scabrezza idraulica utilizzati nel setup 1D. Per la stima del parametro si è fatto riferimento alle seguenti fonti informative:

- modelli HEC RAS citati nel precedente paragrafo (“Lavagna2014” e “Sturla-Brizzolara”);
- piani di Bacino di torrente Lavagna e Ambito n°16, nelle versioni citate nel Cap. 2;
- sopralluogo in situ e documentazione fotografica;
- tracce di piena di eventi pregressi.

Secondo le indicazioni del Piano di Bacino, in particolare quanto specificato nell’Allegato 3 “Indirizzi tecnici per la redazione di studi idraulici” delle Norme di Attuazione del Piano, i valori da adottare per il coefficiente di scabrezza devono far riferimento a quanto definito nella seguente Tabella 4.3. Come specificato nel documento, tali valori devono rappresentare dei limiti superiori, da ridurre opportunamente in presenza ad esempio di forte apporto di sedimenti dai versanti oppure di macroresistenze al deflusso delle piene.

Tabella 4.3 Valori di riferimento del parametro di scabrezza forniti dal Piano di Bacino.

Descrizione corso d’acqua	Coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler Ks ( $m^{1/3}s^{-1}$ )
Tratti di corsi d’acqua naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva-arborea in alveo	25-30
Corsi d’acqua naturali con vegetazione e movimento di materiale sul fondo	30-35
Tratti urbanizzati di corsi d’acqua naturali con argini cementati (e/o platee) in buono stato	35-40
Corsi d’acqua con fondo ed argini totalmente cementati in ottimo stato ed assenza di manufatti (tubi, cavi, ecc.) o discontinuità interferenti con le acque	40-45

Sulla base della documentazione fotografica esaminata e dei sopralluoghi eseguiti, si ritiene che sia appropriato attribuire a tutto il tratto di corso d’acqua oggetto di studio la definizione riportata nella seconda riga della Tabella 4.3, “Corsi d’acqua naturali con vegetazione e movimento di materiale sul fondo”, con intervallo di riferimento del valore del parametro di scabrezza di 30-35  $m^{1/3}s^{-1}$ . A conferma di ciò il modello HEC RAS “Lavagna2014”, fornito dal Committente, presenta un valore del parametro costante e pari a 33  $m^{1/3}s^{-1}$  per il tratto di torrente Lavagna oggetto di studio, valore intermedio rispetto all’intervallo citato.

Il modello HEC RAS “Sturla-Brizzolara”, invece, rappresentativo delle sezioni del tratto di fiume Entella oggetto di studio, presenta un valore del parametro di scabrezza costante e pari a 35  $m^{1/3}s^{-1}$ , quindi all’estremo superiore dell’intervallo, assunto come tale nel modello anche per il tratto terminale del Lavagna. Poiché anche il tratto di fiume Entella oggetto di studio rientra a pieno titolo nella categoria descrittiva sopra riportata, si ritiene opportuno adottare un approccio conservativo, secondo il quale risulta più appropriato adottare un valore intermedio e non quello all’estremo superiore rispetto all’intervallo di scabrezza suggerito; in considerazione di ciò si è definito per l’intero tratto oggetto di studio un valore del parametro di scabrezza costante e pari a 33  $m^{1/3}s^{-1}$ . Tale scelta risulta inoltre supportata dalle evidenze del sopralluogo, che confermano sostanzialmente per l’intero sviluppo longitudinale del tratto di corso d’acqua la citata descrizione del Piano di Bacino.

In conclusione, in aggiunta a quanto sopra descritto, quale ulteriore sommaria validazione da non considerare tuttavia come una reale calibrazione del valore del parametro, risulta anche dal confronto tra i risultati del presente modello idraulico con le tracce di piena degli eventi pregressi, sul quale si tratterà più diffusamente nel successivo Par. 4.7.

### 4.3.3 Condizioni al contorno

Un modello idraulico ha necessità che siano specificate le condizioni al contorno per la definizione della forzante (tipicamente portata liquida) e del comportamento del deflusso al termine del tratto in esame.

La forzante deve essere obbligatoriamente fornita in corrispondenza della prima sezione del tratto (condizione di monte) e opzionalmente lungo segmenti longitudinali (condizione distribuita). La condizione di valle, invece, è costituita generalmente da un livello di pelo libero (costante o tempo-variante) o da una tabella di corrispondenza livello-portata (scala di deflusso). Di seguito si riportano le condizioni al contorno applicate al tratto di corso d'acqua analizzato.

#### Condizione di monte

La condizione di monte del Torrente Lavagna è stata fornita dall'analisi idrologica descritta in Cap. 3; in particolare presso la prima sezione del modello idraulico, corrispondente alla sezione LAV62, viene applicato l'idrogramma di piena per assegnato tempo di ritorno che integra tutti i contributi a monte del tratto oggetto di studio.

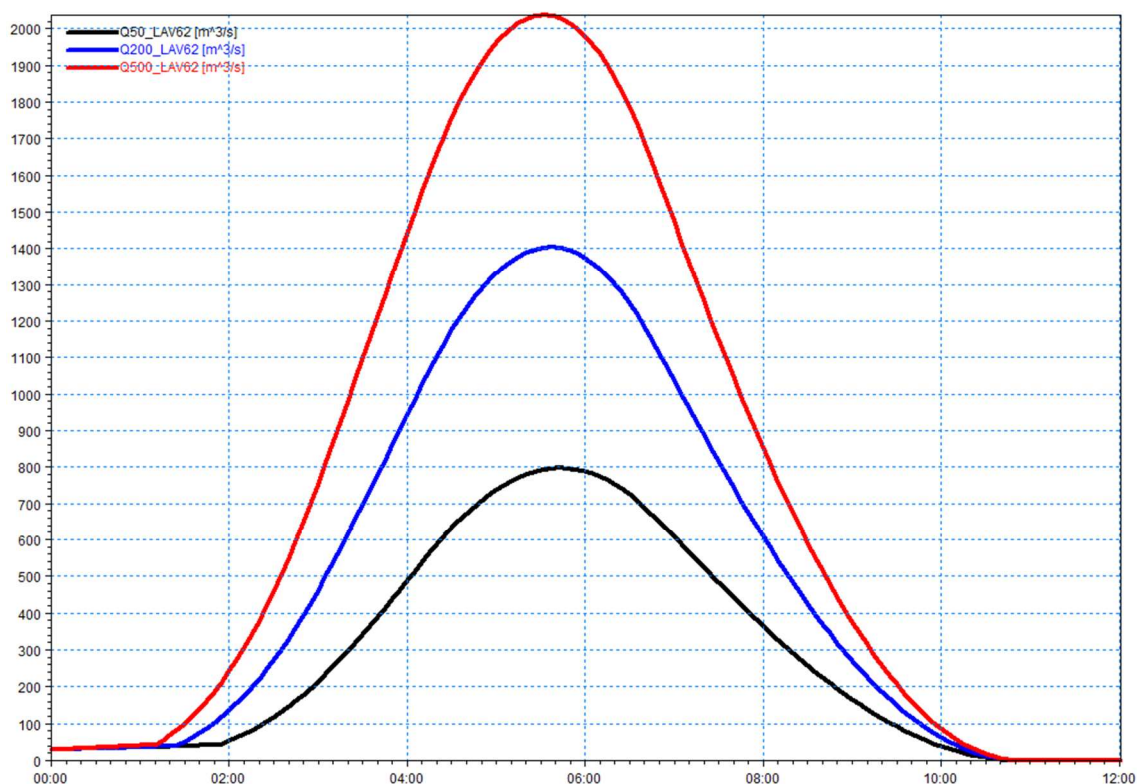


Figura 4.2 T. Lavagna, condizione di monte applicata alla prima sezione del modello idraulico e rappresentante il contributo di tutto il bacino del T. Lavagna precedente alla sezione LAV62 per eventi con tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni.

Nei successivi tratti del torrente Lavagna, fino alla confluenza con il torrente Sturla, sono stati assegnati i contributi relativi alle porzioni di bacino localizzate a valle della sezione iniziale del tratto modellato, in particolare quello con sezione di chiusura LAV36 e quello fino alla sezione di chiusura terminale LAV01. Questi contributi sono stati inseriti in modo distribuito lungo la progressione longitudinale del corso d'acqua intercorrente tra le rispettive sezioni di chiusura,

determinando specifici idrogrammi di piena ottenuti per differenza a partire da quelli elaborati nell'analisi idrologica. La scelta progettuale di inserire in modo distribuito i contributi intercorrenti tra le sezioni di chiusura dei bacini deriva dalle considerazioni effettuate nello svolgimento dell'analisi idrologica.

Per la definizione di tali idrogrammi, assegnati in modo distribuito, si è inoltre dovuto tenere in conto un adeguato sfasamento temporale tra gli stessi, al fine di considerare i tempi di traslazione della piena lungo il corso d'acqua. Per determinare tali sfasamenti temporali si è utilizzato il modello idraulico completo implementato nel corso della presente analisi idraulica, al fine di valutare correttamente ogni possibile accelerazione o ritardo della progressione della piena, dovuto a fenomeni quali ad esempio la laminazione dell'onda di piena oppure dal transito della stessa attraverso i manufatti dei ponti. La seguente Figura 4.3 raffigura, per i tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni, gli idrogrammi di portata assegnati in modo distribuito rispettivamente negli intervalli tra le sezioni LAV62-LAV36 e LAV36-LAV01.

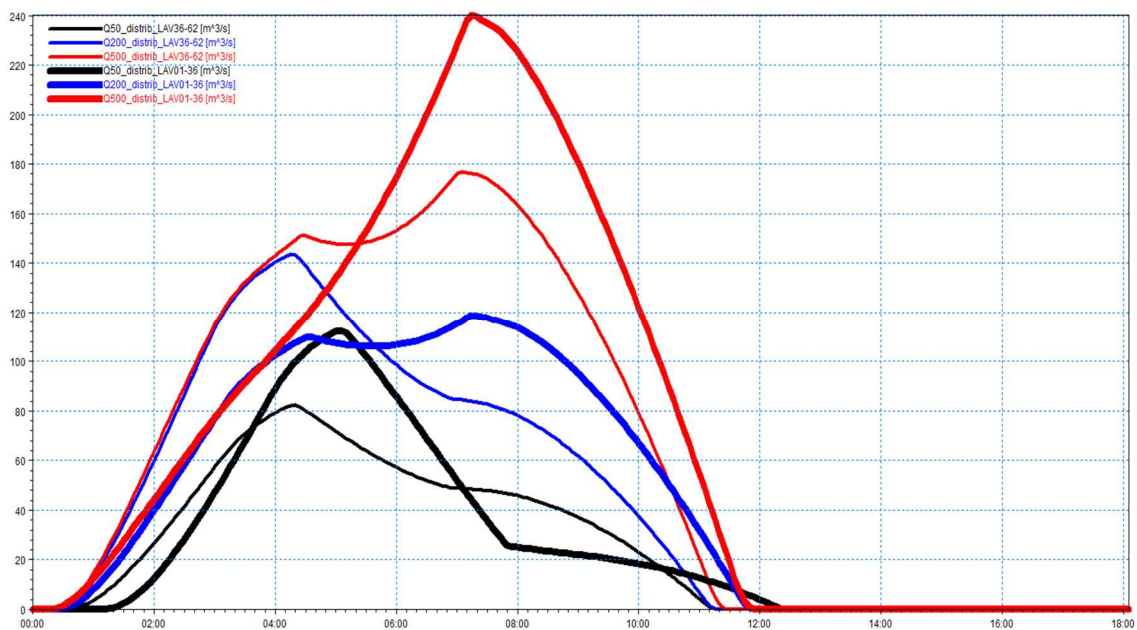


Figura 4.3 T. Lavagna, condizione distribuite, rappresentanti i contributi delle porzioni di bacino comprese rispettivamente tra le sezioni di chiusura LAV62-LAV36 e LAV36-LAV01, per eventi con tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni.

Al termine del tratto di studio riferito al torrente Lavagna, è stato inserito per ognuno dei tempi di ritorno presi in esame un idrogramma concentrato rappresentativo del contributo del torrente Sturla, in corrispondenza della confluenza, per la determinazione del quale si è operato in maniera analoga a quanto precedentemente descritto, in termini sia di valutazione dei tempi di propagazione dell'onda di piena sia di differenza tra gli idrogrammi determinati alla sezione di chiusura di monte e di valle della confluenza stessa. Come descritto nell'analisi idrologica (Cap. 3), tale idrogramma concentrato include anche il minimo contributo di portata relativo al bacino intercorrente alla due confluenze con i torrenti Sturla e Graveglia.

In conclusione, nuovamente per ognuno dei tre tempi di ritorno considerati, si è definito un ulteriore idrogramma concentrato, applicato in corrispondenza della confluenza con il torrente Graveglia, definito con analogo criterio dei precedenti. La seguente Figura 4.4 rappresenta i contributi concentrati applicati in corrispondenza delle confluenze rispettivamente con i torrenti Sturla e Graveglia.

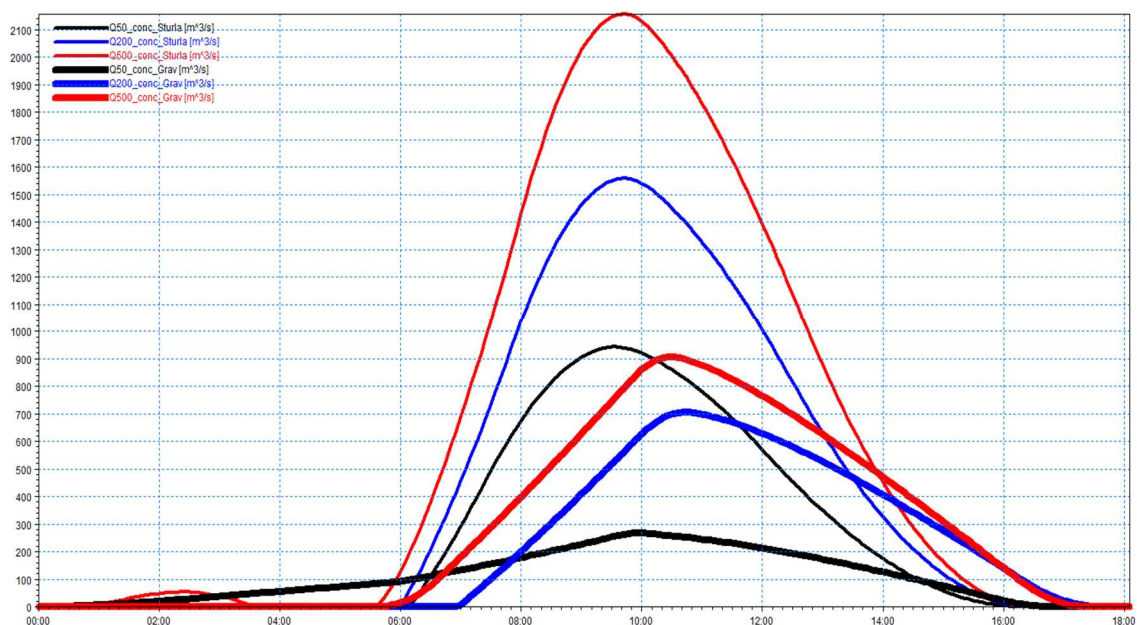


Figura 4.4 F. Entella, condizioni concentrate rappresentative dei contributi rispettivamente dei torrenti Sturla e Graveglia in corrispondenza delle confluenze con il fiume Entella, per eventi con tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni.

#### Condizione di valle

La condizione di valle consente di modellare il deflusso in corrispondenza dell'ultima sezione del modello idrodinamico monodimensionale. Nel caso specifico tale condizione risulta impostata presso una sezione fittizia posta 1km a valle della passerella pedonale di Rivarola, la cui geometria è stata estratta dal DTM, e consiste nell'assegnazione di una scala di deflusso determinata ipotizzando il passaggio per lo stato critico della corrente. Infatti, in assenza di una sezione di controllo chiaramente identificabile immediatamente a valle del dominio di studio, si è ipotizzata una condizione a una distanza sufficientemente ampia in considerazione della pendenza del tratto in oggetto, oltre 1.3 km dalla confluenza del torrente Graveglia (che rappresenta il limite del tratto oggetto di analisi), tale da non influenzare le condizioni idrodinamiche nel dominio di interesse; a tal fine è stata condotta una specifica verifica ipotizzando condizioni al contorno differenti, non riscontrando variazioni apprezzabili nelle sezioni terminali del tratto di studio.

## 4.4 Messa a punto del setup bidimensionale

Per la messa a punto del modello MIKE FLOOD, a seguito dell'implementazione del modello monodimensionale dell'alveo inciso con il codice MIKE 11 HD, si è proceduto alla costruzione del modello bidimensionale delle aree golenali in sponda destra e sinistra, utilizzando il codice di calcolo MIKE 21 HD del DHI descritto nell'Allegato D.

Successivamente, utilizzando il codice MIKE FLOOD, si è proceduto all'accoppiamento dei due modelli (monodimensionale e bidimensionale) mediante collegamenti laterali distribuiti lungo le sponde del torrente. Si precisa che, per entrambi i modelli, si è adottato il Sistema di Coordinate Gauss-Boaga Monte Mario 1, sistema di riferimento per il Committente.

Nei paragrafi successivi vengono descritte le caratteristiche principali del modello.

#### 4.4.1 Costruzione della griglia di calcolo

In un modello bidimensionale alle differenze finite, come MIKE 21, la descrizione geometrica del terreno è eseguita definendo la quota media in ogni cella di calcolo. Tale valore è usualmente calcolato, a partire dai dati rilevati, mediante tecniche di interpolazione. Nel presente caso applicativo, invece, il DTM è stato fornito direttamente dal Committente.

Il modello del terreno fornito è costituito dal rilievo Lidar predisposto dal Ministero dell'Ambiente, disponibile in tavole con dimensione di cella 1x1m. Tali tavole appartengono in generale a due gruppi, uno per la parte costiera e uno per la zona più interna del territorio; nel caso in esame l'intero dominio di studio risulta coperto da tavolette appartenenti al secondo gruppo, identificate dalla lettera iniziale "D", pertanto nella definizione del DTM di base si è proceduto a una semplice unione in un unico tematismo delle tavolette di interesse.

Tabella 4.4 Tavolette del DTM del Ministero dell'Ambiente impiegate a copertura dell'area di studio.

TAVOLE DTM LIDAR		
D44390926_0101	D44370929_0101	D44350934_0101
D44390927_0101	D44370930_0101	D44350935_0101
D44390928_0101	D44370931_0101	D44350936_0101
D44390929_0101	D44370932_0101	D44340933_0101
D44380926_0101	D44360929_0101	D44340934_0101
D44380927_0101	D44360930_0101	D44340935_0101
D44380928_0101	D44360931_0101	D44340936_0101
D44380929_0101	D44360932_0101	D44330934_0101
D44380930_0101	D44360933_0101	D44330935_0101
D44370927_0101	D44360934_0101	
D44370928_0101	D44350933_0101	

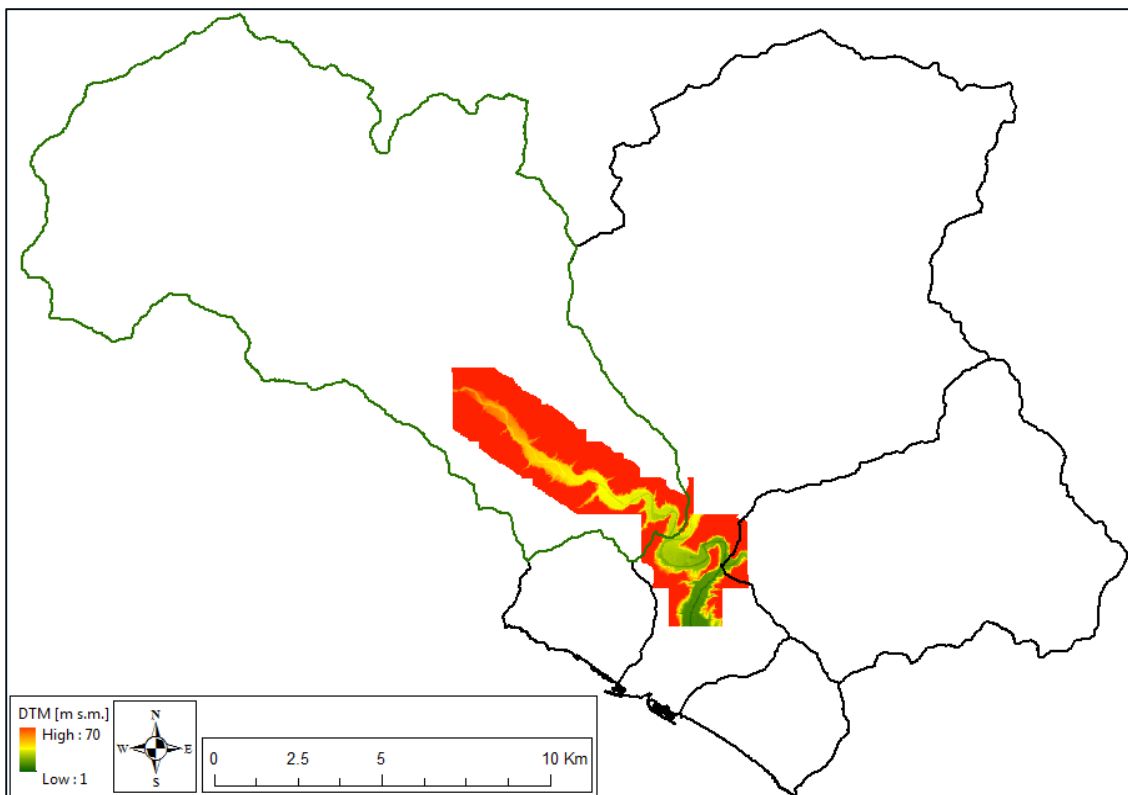


Figura 4.5 Estensione del DTM a copertura del dominio di studio ottenuto dall'unione delle tavole Lidar con risoluzione 1m; in verde è rappresentata la perimetrazione del bacino del torrente Lavagna mentre in nero quella dei bacini dell'Ambito n°16.



L'elenco delle tavole utilizzato è riportato in Tabella 4.4 (il nome contiene le coordinate in gradi sessadecimali del vertice in basso a sinistra), mentre la Figura 4.5 rappresenta il DTM complessivamente ottenuto dall'unione delle stesse.

In considerazione della significativa estensione dell'area di studio (7 x 9 km circa) si è ritenuto opportuno ricampionare la griglia di calcolo a risoluzione di 5m al fine di ottimizzare la performance del modello in termini di tempi di calcolo, pur mantenendo comunque un livello di dettaglio sufficientemente accurato per la tipologia di analisi condotta. Il ricampionamento è stato effettuato svolgendo un'operazione di media tra le celle di input, ad eccezione delle celle corrispondenti a specifici elementi geografici, detti genericamente "breaklines" o più in dettaglio elementi sovramontanti e sottomontanti, per i quali è stato considerato rispettivamente il valore massimo e minimo tra le celle.

Gli elementi sovramontanti identificati sono in primo luogo le zone spondali, poste a confine tra i modelli monodimensionale e bidimensionale, selezionate al fine di considerare le corrette quote delle sponde del corso d'acqua; in secondo luogo sono state considerate le strade, poiché elemento frequentemente realizzato in rilevato rispetto al territorio circostante. Quali elementi sottomontanti sono stati invece considerati i corsi d'acqua appartenenti al reticolo secondario, al fine di non sottostimarne la capacità di invaso e di propagazione degli allagamenti del corso d'acqua principale. Operativamente, la selezione delle celle appartenenti alle "breaklines" è stata effettuata in ambiente GIS, definendo elementi polilinea in corrispondenza dell'asse degli elementi, a partire dai quali creare dei poligoni di selezione con il comando di "buffer", impostando la distanza tra polilinea e perimetro del poligono.

A valle della costruzione e affinamento della griglia di calcolo con risoluzione di cella 5m, è stato necessario aggiungere l'ingombro degli edifici. Il DTM originale, infatti, contiene l'informazione della quota del suolo ma non degli elementi presenti al di sopra di esso quali edifici, vegetazione, etc. Nell'ambito di una modellazione bidimensionale, la considerazione degli edifici e più in generale di tutti quegli elementi che non possono venir sormontati dalle acque, risulta di fondamentale importanza per una corretta simulazione del deflusso, in particolare all'interno dei centri abitati.

L'aggiunta dell'impronta delle strutture antropiche nella griglia di calcolo è stata effettuata utilizzando le CTR in formato vettoriale fornite dal Committente. Oltre alla CTR, è stata svolta un'analisi comparativa con foto satellitari recenti e sopralluoghi al fine di identificare eventuali strutture non presenti nella CTR o variazioni rispetto a quest'ultima, apportando le opportune modifiche. Operativamente gli edifici sono stati inseriti nel DTM sopraelevando di un valore costante (20m) la quota del terreno nelle celle selezionate, valore per certo non raggiungibile dai tiranti idrici degli allagamenti.

L'ultima modifica apportata alla batimetria di calcolo è motivata dall'implementazione di un modello accoppiato 1D-2D, in cui l'alveo attivo risulta schematizzato nel modello monodimensionale e le aree circostanti in quello bidimensionale: per tale motivazione occorre escludere dal dominio di calcolo 2D la porzione di corso d'acqua già schematizzato nel modello 1D, altrimenti l'alveo risulterebbe erroneamente rappresentato due volte. Per evitare ciò, le celle dell'alveo sono state opportunamente selezionate e impostate come inattive.

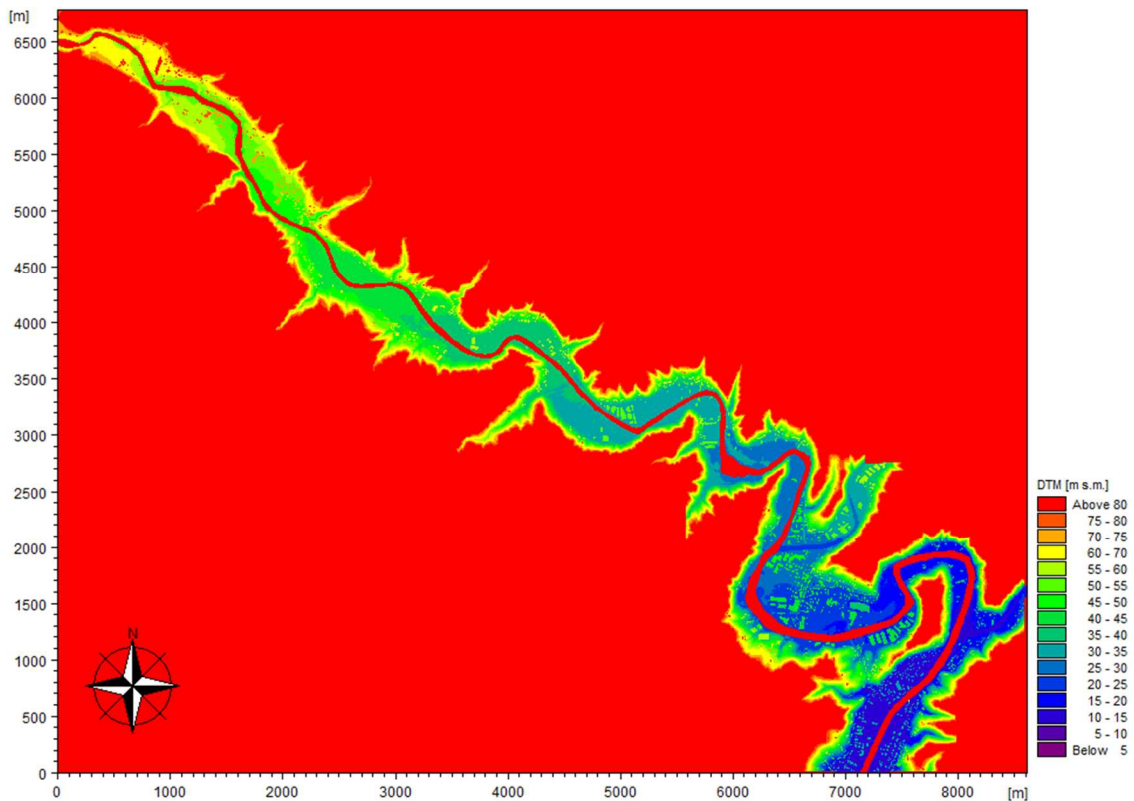


Figura 4.6 Batimetria di calcolo completa dell'intero dominio di studio del modello bidimensionale; in rosso sono evidenziate le celle poste come inattive.

#### 4.4.2 Condizioni iniziali e al contorno

Analogamente al modello monodimensionale, anche quello bidimensionale ha necessità di impostare delle condizioni al contorno del dominio di calcolo. Nel caso del modello in esame, la forzante deriva esclusivamente dalle portate non contenute nell'alveo del corso d'acqua durante eventi di piena; di conseguenza non sono state inserite condizioni di monte nel modello 2D.

Relativamente alle condizioni di valle, non esistendo una vera condizione fisica in quanto l'estensione del dominio non raggiunge un corpo idrico recettore, si è provveduto esclusivamente a consentire la fuoriuscita dal modello bidimensionale dei volumi di allagamento eventualmente defluenti fino al perimetro dell'area di studio definita, in particolare nelle aree golenali dell'Entella e dello Sturla.

In merito alle condizioni iniziali, si è ritenuto opportuno assegnare un livello d'acqua dal primo istante di calcolo all'interno degli alvei dei torrenti Sturla e Graveglia, al fine di evitare che una cospicua quantità dei volumi di esondazione del fiume Entella andasse ad occupare gli alvei dei citati affluenti, con una conseguente evidente sottostima degli allagamenti nei dintorni degli stessi. Nel presente studio, infatti, si è investigata solo la propagazione degli allagamenti originati dai corsi d'acqua Lavagna ed Entella e non dai rispettivi affluenti, anche se nel caso dei citati Sturla e Graveglia gli stessi presentano dimensioni d'alveo e contributi di portata comparabili, come ordine di grandezza, a quelli del Lavagna, mentre per il resto del reticolo secondario la tematica non riveste carattere di significatività. In prossimità delle confluenze dei due torrenti citati, per non alterare la reale geometria ma contemporaneamente non sottostimare gli allagamenti del corso d'acqua principale, si è provveduto, come sopra descritto, all'inserimento di volumi d'acqua quali condizione iniziale all'interno degli alvei degli affluenti, assegnando livelli prossimi alle quote di sponda al fine di minimizzare ogni possibile effetto di invaso e laminazione degli allagamenti.

### 4.4.3 Scabrezza

Il modello MIKE 21 consente di inserire il parametro di scabrezza sia come valore unitario su tutto il dominio, sia attraverso una mappa di valori distribuiti. Nel caso in esame, in considerazione dell'ampia scala dell'estensione del dominio di studio e a seguito di una valutazione preliminare delle tipologie di uso suolo prevalenti, caratteristica più direttamente correlabile con la scabrezza, si è ritenuto adeguato associare all'intero dominio di studio un unico valore di Gauckler-Strickler assunto pari a  $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , ritenuto rappresentativo del territorio in esame nel suo complesso, senza tuttavia comportare approssimazioni eccessive delle variabili idrodinamiche di maggior rilievo ai fini del presente studio. Peraltro non risultano disponibili dati relativi ad eventi di piena da utilizzare per una specifica calibrazione dei valori di scabrezza in area golenale.

## 4.5 Accoppiamento modelli 1D+2D

Come descritto in precedenza, i modelli mono e bidimensionale, costruiti originariamente in modo indipendente, sono stati accoppiati all'interno dell'interfaccia MIKE FLOOD. L'accoppiamento richiede la scelta di punti o tratti dove i due modelli si interfaccino, consentendo il trasferimento di volume liquido. Il codice prevede diverse tipologie di interfacciamento, a seconda delle caratteristiche specifiche del collegamento. Nella presente schematizzazione si sono inseriti dei collegamenti longitudinali (denominati "lateral link") lungo tutto il tratto dei corsi d'acqua oggetto di studio, posizionati in corrispondenza delle due sponde, in modo che l'intero alveo attivo, schematizzato all'interno del modello monodimensionale, fosse compreso al loro interno. In dettaglio, il criterio generale con cui è stata definita la localizzazione delle sponde, cioè del confine tra parte di alveo schematizzata in MIKE 11 e in MIKE 21, è risultato il seguente:

- poiché all'interno dei tematismi geografici forniti dal Committente era presente anche la perimetrazione di quanto definito come "alveo" nel Piano di Bacino, a seguito di specifico aggiornamento all'interno del presente approfondimento idraulico, esso è stato preso a riferimento quale posizione di primo tentativo delle sponde;
- in secondo luogo, verificando in ogni sezione del modello l'intersezione del tematismo sopracitato con la geometria in essa definita, si è proceduto con le opportune modifiche, in modo tale da inserire la porzione di sezione effettivamente rappresentante l'alveo inciso all'interno del dominio monodimensionale, e le aree golenali in quello bidimensionale;
- nelle sezioni con limite non chiaramente definito tra alveo attivo e aree golenali, a causa dell'assenza di manufatti arginali o di punti evidenti di discontinuità della pendenza trasversale delle sponde, si è proceduto in primo luogo mantenendo una coerenza complessiva in termini di larghezza dell'alveo inciso, ad esempio evitando bruschi allargamenti e restringimenti tra sezioni conseguenti, e al contempo evitando di inserire nel dominio del modello 1D porzioni di territorio con manufatti antropici;
- a validazione delle scelte effettuate, sono state consultate anche mappe aeree con le quali confermare o eventualmente modificare la localizzazione delle sponde.

Oltre alla localizzazione delle strutture di collegamento, il codice MIKE FLOOD prevede la definizione della tipologia di connessione tra i due modelli, necessaria al fine di individuare la quota di sormonto spondale da utilizzare nell'interfaccia tra i due domini di calcolo. Nel caso specifico, pur comunque risultando le quote dei due modelli tra loro rispettivamente coerenti, si è preferito dare priorità alle informazioni del modello MIKE 11, perché più accurate nel rappresentare le quote di sommità di manufatti spondali, non sempre rilevati con la migliore accuratezza dal rilievo LIDAR, in particolare nei casi in cui presentano una dimensione inferiore alla risoluzione del rilievo stesso, pari a 1m.

## 4.6 Risultati della modellazione per eventi ad assegnato tempo di ritorno

Sulla base degli schemi geometrici e delle condizioni al contorno illustrate nei precedenti paragrafi, sono state condotte le simulazioni degli eventi associati ai tre tempi di ritorno considerati di 50, 200 e 500 anni, per i tratti di torrente Lavagna e fiume Entella oggetto di studio. Gli obiettivi perseguiti con le citate simulazioni sono di seguito sinteticamente elencati:

- verificare la coerenza dei risultati delle simulazioni con le direttive del Piano, in termini di conformità con gli input progettuali precedentemente descritti;
- determinare i valori delle principali variabili idrodinamiche, della corrente in alveo e degli allagamenti nelle aree golenali, quali ad esempio tiranti idrici e velocità di scorrimento;
- fornire le informazioni di natura idrodinamica per la definizione di una proposta di aggiornamento delle fasce di pericolosità idraulica attualmente vigenti, in particolare in termini di estensione degli allagamenti e di comparazione dei livelli della corrente in alveo rispetto alle quote spondali e a quelle degli impalcati degli attraversamenti;
- fornire le informazioni di natura idrodinamica per la definizione di una proposta di perimetrazione della fascia di riassetto fluviale.

In merito al primo obiettivo elencato, il principale requisito da verificare è la congruità delle massime portate di piena con i valori assegnati dal Piano e sintetizzati nella precedente Tabella 3.1, per i diversi tempi di ritorno e sezioni di chiusura considerati. Il rispetto di tali valori è stato perseguito nell'assegnazione delle condizioni al contorno del modello monodimensionale, in particolare per quanto riguarda le forzanti inserite in input in modo concentrato e distribuito lungo lo sviluppo longitudinale del corso d'acqua; occorre tuttavia accertare che effetti di laminazione dovuti alla propagazione bidimensionale degli allagamenti non ne alterino in modo significativo i valori. Tale requisito risulta soddisfatto per tutti gli eventi considerati, in quanto, come descritto in precedenza nel Par. 4.3.3, a seguito di prime simulazioni di test sono stati successivamente adeguati i contributi di portata per tener opportunamente in conto di tutti i fenomeni che concorrono alla definizione della dinamica di traslazione dell'onda di piena.

A seguito dell'accertamento della corretta definizione dei setup modellistici e conseguentemente della congruità dei risultati, gli stessi sono stati valutati nel dettaglio al fine di comprendere le dinamiche di deflusso e di propagazione degli allagamenti. Il dominio territoriale oggetto di studio è caratterizzabile sostanzialmente come una valle con al centro una piana alluvionale di estensione mediamente pari ad alcune volte la larghezza dell'alveo inciso. Tale larghezza media risulta dell'ordine di alcune centinaia di metri, indicativamente inferiore a 0.5 km nel tratto appartenente al bacino del Lavagna e maggiormente estesa nella porzione di territorio afferente all'Entella, con un'ulteriore espansione in prossimità del centro urbano di Carasco.

All'interno di questa fascia alluvionale il corso d'acqua scorre con frequenti e discretamente pronunciati cambi di direzione, per cui si osserva una sostanziale alternanza delle aree golenali tra i due lati delle sponde. Gli allagamenti dell'evento con tempo di ritorno minore, 50 anni, già coinvolgono in misura importante una elevata percentuale di tali aree, a conferma del fatto che si tratta di effettive aree golenali del corso d'acqua che partecipano alla complessiva sezione di deflusso quando si è in presenza di eventi di piena con tempo di ritorno anche non eccessivamente elevato. Analogo comportamento si osserva con i tempi di ritorno più elevati, osservando ovviamente, al crescere di tale parametro, un incremento sia delle aree coinvolte dagli allagamenti che dei rispettivi tiranti; tuttavia, concentrando in particolare l'attenzione sull'estensione delle stesse, è opportuno evidenziare come mentre vi è un evidente incremento tra gli eventi con tempo di ritorno 50 e 200 anni, molto più marginale è quello tra 200 e 500 anni, a conferma quindi del fatto che una larga parte della piana alluvionale risulta interessata dagli allagamenti già della piena duecentennale. La seguente Figura 4.7 raffigura, con una visione a larga scala, la sovrapposizione dei tematismi dei tre eventi considerati.

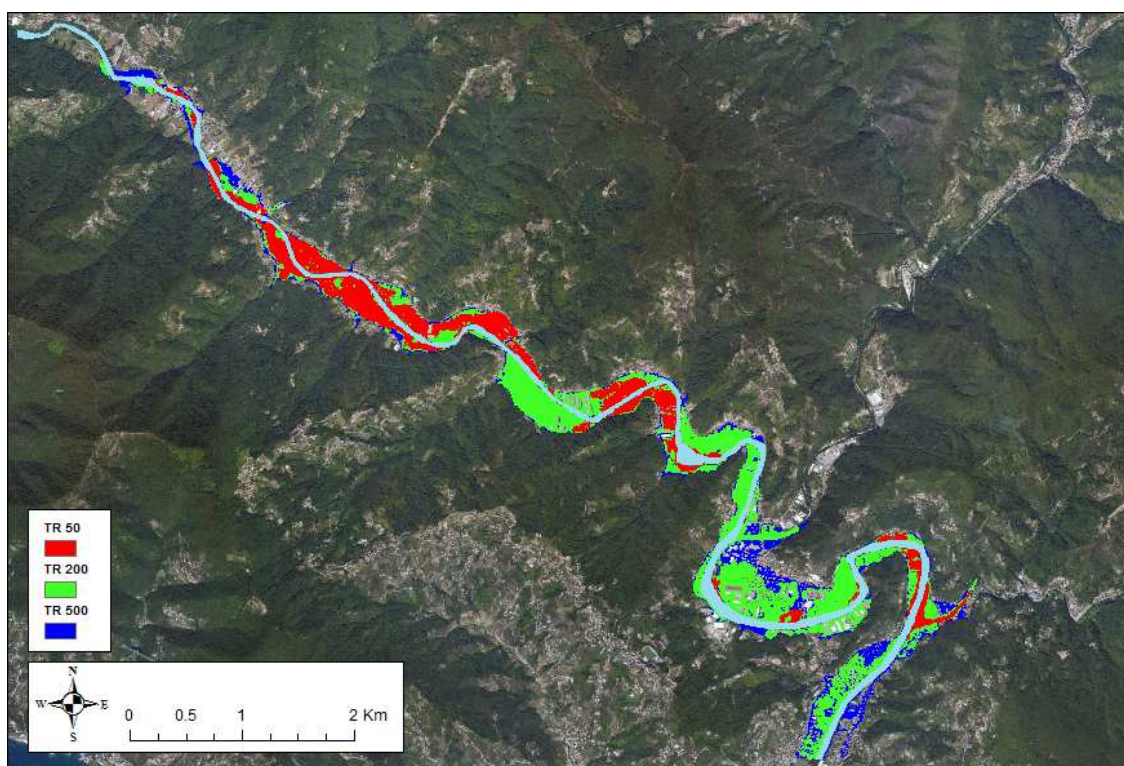


Figura 4.7 Torrente Lavagna e fiume Entella – Sovrapposizione del tematismo della massima estensione degli allagamenti per eventi con tempo di ritorno rispettivamente pari a 50 anni in rosso, 200 anni in verde, 500 anni in blu.

Per quanto riguarda invece la restituzione dei risultati in alveo, nell'Allegato A sono fornite alcune tabelle sintetiche contenenti i valori dei principali parametri idrodinamici in corrispondenza di tutte le sezioni del corso d'acqua schematizzate in MIKE 11, per ognuno degli eventi di piena considerati con differente tempi di ritorno. La Figura 4.8 rappresenta per l'intero tratto oggetto di studio il profilo del massimo livello in alveo per i tre eventi considerati.

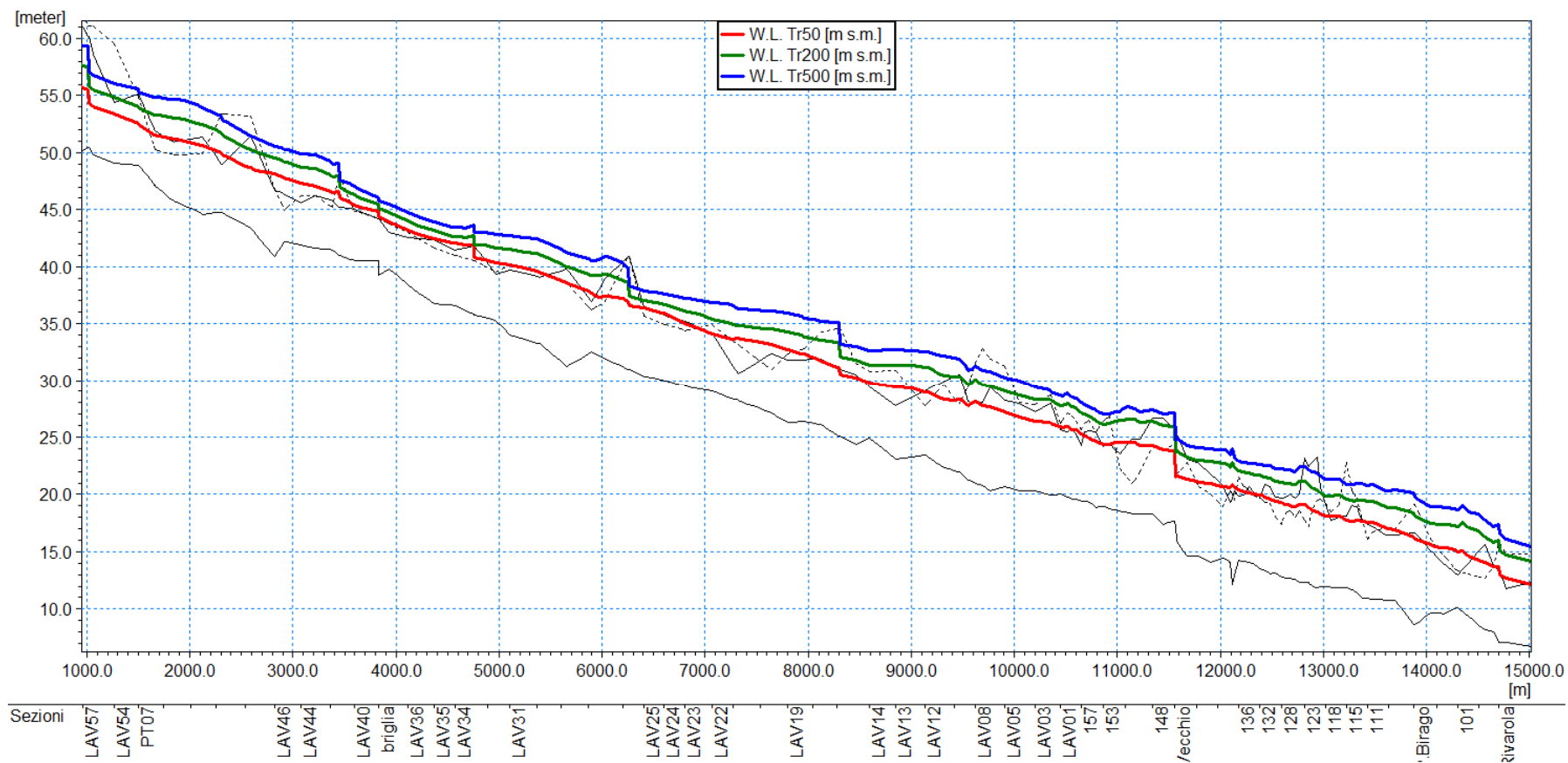


Figura 4.8 Torrente Lavagna e fiume Entella – Sovrapposizione dei profili del massimo livello della corrente in alveo per eventi con tempo di ritorno rispettivamente pari a 50 anni in rosso, 200 anni in verde, 500 anni in blu. Nel grafico sono rappresentati anche il profilo di fondo, con linea nera continua in basso; il profilo di sponda sinistra con linea nera tratteggiata e quello di sponda destra con linea nera continua.

In questa fase di analisi dei risultati, particolare enfasi è stata data al confronto tra i massimi livelli di piena in alveo e le quote di sponde e attraversamenti. Per quanto riguarda gli attraversamenti, tale confronto risulta utile al fine di comprendere se le quote di intradosso dell'impalcato degli stessi risultano raggiunti dalla corrente e, in caso negativo, con quale margine di sicurezza; in sintesi è stato determinato il franco idraulico, evidenziando le situazioni di maggiore criticità. A titolo di esempio a fronte di un evento di piena con tempo di ritorno 200 anni il franco idraulico risulta, su un totale di 12 attraversamenti, negativo per 6 (PT05 – PT04 – PT02 – PT01 – Ponte Vecchio – Passerella di Rivarola), positivo ma inferiore al 1m per altri 4 (PT08 – PT06 – PT03 – Ponte di Birago) e solo per i restanti 2 superiore al metro (PT07 – Ponte Strada Provinciale). I valori in dettaglio sono consultabili nelle tabelle allegate.

In riferimento al margine di sicurezza rispetto alle quote spondali, invece, la valutazione ha assunto un duplice significato: oltre alla sua stessa quantificazione, di per sé rilevante, è stato utile evidenziare tutti quei tratti di corso d'acqua in cui, pur non verificandosi sormonti spondali, la differenza tra livello di piena e quota di sponda risultasse comunque di ridotta entità, al fine della successiva perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica. In presenza di aree golenali adiacenti a sponde con ridotto franco idraulico, è infatti necessario condurre un approfondimento ulteriore, volto a valutare se le stesse continuano a risultare non coinvolte da allagamenti anche introducendo un fattore di sicurezza che possa includere tutte le possibili incertezze legate a questa tipologia di analisi idrauliche, esplicitato in termini di parzializzazione della sezione defluente. Tale attività di approfondimento finalizzata alla perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica, compresi i criteri di valutazione adottati e i relativi esiti, è descritta nel successivo Cap.5.

## 4.7 Analisi evento 2014

Quale ulteriore elemento per lo svolgimento del presente approfondimento idraulico sono state considerate le informazioni fornite dal Committente in merito agli eventi di piena pregressi interessanti il corso d'acqua oggetto di studio. Tali informazioni possono essere relative a uno specifico evento o più complessivamente alla globalità degli eventi storici.

Da una preliminare analisi dei dati forniti, emerge che non sono disponibili dati concomitanti di precipitazioni, tracce di piena e livelli e portate in alveo, pertanto l'analisi condotta si è dovuta limitare a una verifica speditiva e qualitativa, senza poter svolgere una più accurata validazione.

In particolare l'attenzione è stata rivolta all'evento intenso del 10-11 Novembre 2014, evento rilevante per i bacini di studio e per il quale risultano disponibili le osservazioni di alcune stazioni idrometriche all'interno o in prossimità del tratto analizzato. Si precisa che l'analisi di tale evento non è finalizzata ad un'accurata riproduzione dello stesso, in termini di analisi idrologica ed idraulica, ma a una generale validazione di quanto implementato nei modelli per gli eventi ad assegnato tempo di ritorno.

Tra le stazioni idrometriche appartenenti ai bacini di studio, nessuna risulta installata sul torrente Lavagna, mentre per i corsi d'acqua circostanti risultano disponibili quelle di seguito elencate, la cui localizzazione spaziale è mostrata in Figura 4.9:

- stazione di Caminata, situata sul torrente Graveglia;
- stazione di Vignolo, situata sul torrente Sturla;
- stazione di Carasco: situata sul fiume Entella all'interno del tratto di studio, presso il ponte della S.P. 225 (in corrispondenza della sezione 137 del modello idraulico);
- stazione di Panesi: situata sul fiume Entella immediatamente a valle del tratto di studio, a circa 0.5 km dalla confluenza con il torrente Graveglia.



Figura 4.9 Mappa delle stazioni idrometriche della rete OMIRL per i bacini di Lavagna e Ambito n°16.

Tra le stazioni citate risultano di maggior interesse quelle di Carasco e Panesi, in quanto situate sullo stesso corso d'acqua oggetto di studio e all'interno o in prossimità del tratto investigato; si evidenzia invece che le altre due, installate sui torrenti Graveglia e Sturla, risultano distanti diversi chilometri a monte delle rispettive confluenze con il fiume Entella e pertanto non sono rappresentative dell'esatto contributo che tali affluenti recapitano nel corso d'acqua principale, a meno di stime la cui elaborazione esula dagli obiettivi del seguente approfondimento idraulico.

Relativamente alla stazione di Panesi, per essa è disponibile la corrispondente scala di deflusso, riportata negli Annali Idrologici, che consente pertanto una stima della portata defluente a partire dal livello idrometrico osservato: il valore di massima piena stimato per l'evento del 10-11 Novembre 2014 è pari a  $1357 \text{ m}^3/\text{s}$ , a cui si può associare un tempo di ritorno di poco inferiore a 40 anni, ricavabile dalla curva frequenza-portata disponibile nel Piano di Bacino. Tale tempo di ritorno non è tuttavia direttamente associabile alle massime portate defluenti nei tratti precedenti del corso d'acqua, poiché tale stazione è situata a valle della confluenza dei tre principali affluenti del fiume Entella, i torrenti Lavagna, Sturla e Graveglia, e pertanto, trattandosi di un evento reale con la relativa disomogeneità spaziale delle precipitazioni, senza un'accurata quantificazione dei singoli contributi diventa complesso estrapolare la stima del tempo di ritorno procedendo verso monte, a partire dai dati osservati alla stazione di Panesi.

In merito invece alla stazione di Carasco, per essa non risulta disponibile la scala di deflusso e nemmeno l'esatta quota del relativo zero idrometrico, pertanto l'unica informazione direttamente utilizzabile è l'andamento del livello durante la piena: ad esempio per l'evento citato del 10-11 Novembre 2014 si osserva un valore massimo del livello di circa 8.25 m, con un valore pre evento di circa 1.35 m, pertanto l'incremento dovuto all'evento di piena è quantificabile in circa 6.90m. Nell'ipotesi di simulare analogo evento in MIKE FLOOD sarebbe possibile condurre una calibrazione del modello in termini di livelli alla sezione della stazione di misura; nel caso specifico l'analisi si è invece limitata a una sommaria comparazione con i risultati degli eventi ad assegnato tempo di ritorno, in particolare quello di 50 anni, per valutarne la coerenza complessiva, senza poter tuttavia ricavare informazioni di maggior dettaglio. La Figura 4.10 rappresenta il dato osservato dell'evento presso la stazione idrometrica di Carasco.



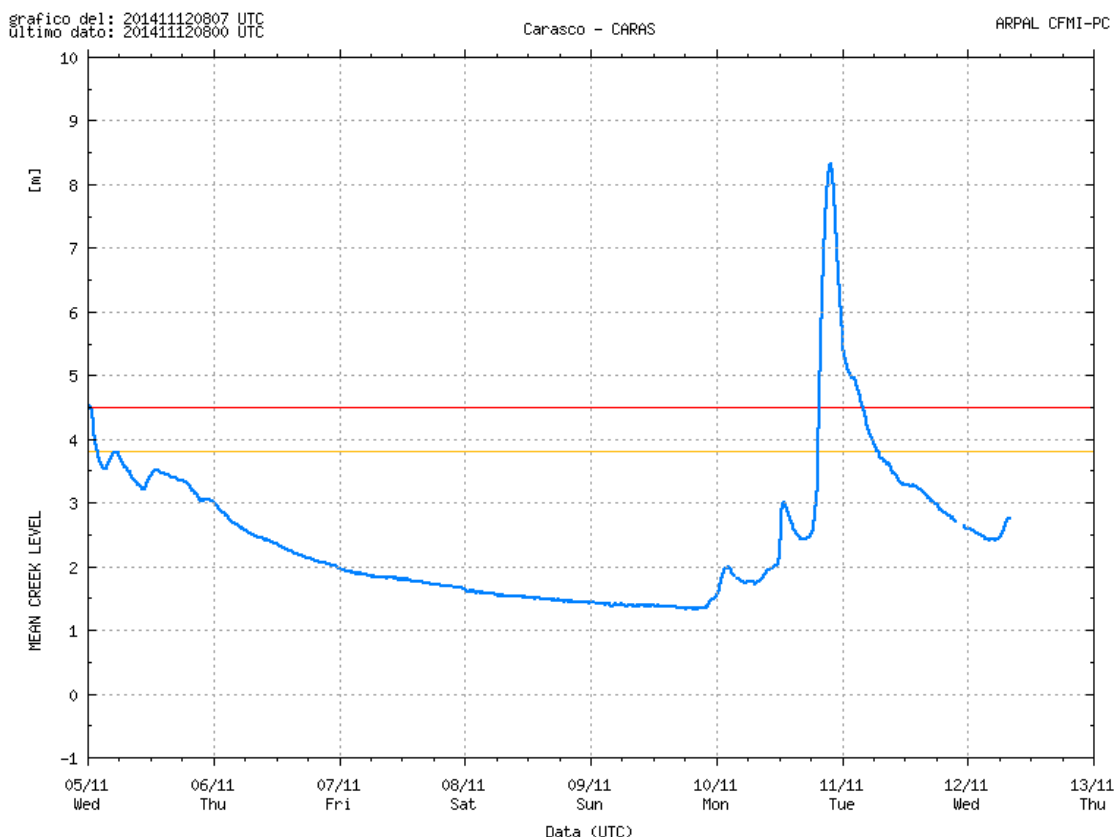


Figura 4.10 Osservazione del livello idrometrico della stazione di Carasco (presso ponte SP225) per l'evento del 10-11 Novembre 2014.

Un secondo elemento di valutazione disponibile relativamente all'evento del 2014 è la mappatura delle aree soggette ad allagamento, comparabile con i risultati della componente bidimensionale del modello MIKE FLOOD degli eventi ad assegnato tempo di ritorno. In considerazione di quanto sopra esposto, è possibile condurre analogha sommaria comparazione di validazione tra gli allagamenti dell'evento del 2014 e di quello cinquantennale, ponendo quale ulteriore osservazione che il confronto risulta solo quantitativo in quanto, in particolare in riferimento al Lavagna, si interpone tra esso e la stazione di Panesi anche il contributo del torrente Sturla.

Ad ogni modo, dal confronto emerge che nel tratto afferente al bacino del Lavagna gli allagamenti dell'evento cinquantennale risultano generalmente più elevati rispetto a quelli dell'evento osservato, ma in alcune aree si nota una discreta similitudine. Nel tratto afferente al bacino dell'Entella invece, si osserva una complessiva analogia perché si evidenziano sia alcune aree con una maggior estensione degli allagamenti dell'evento sia viceversa altre con maggior consistenza dell'allagamento cinquantennale. In sintesi, dal complessivo confronto dei due eventi è possibile validare con il supporto dei dati dell'evento 2014 la coerenza di quanto implementato nei modelli idraulici. Va altresì evidenziato che, in aggiunta alle numerose incertezze sopra descritte, l'evento cinquantennale presenta livelli di poco superiori o inferiori rispetto alle quote spondali: è sufficiente quindi una lieve variazione del livello in alveo per comportare differenze in alcuni casi anche significative dell'estensione degli allagamenti nelle aree golenali.

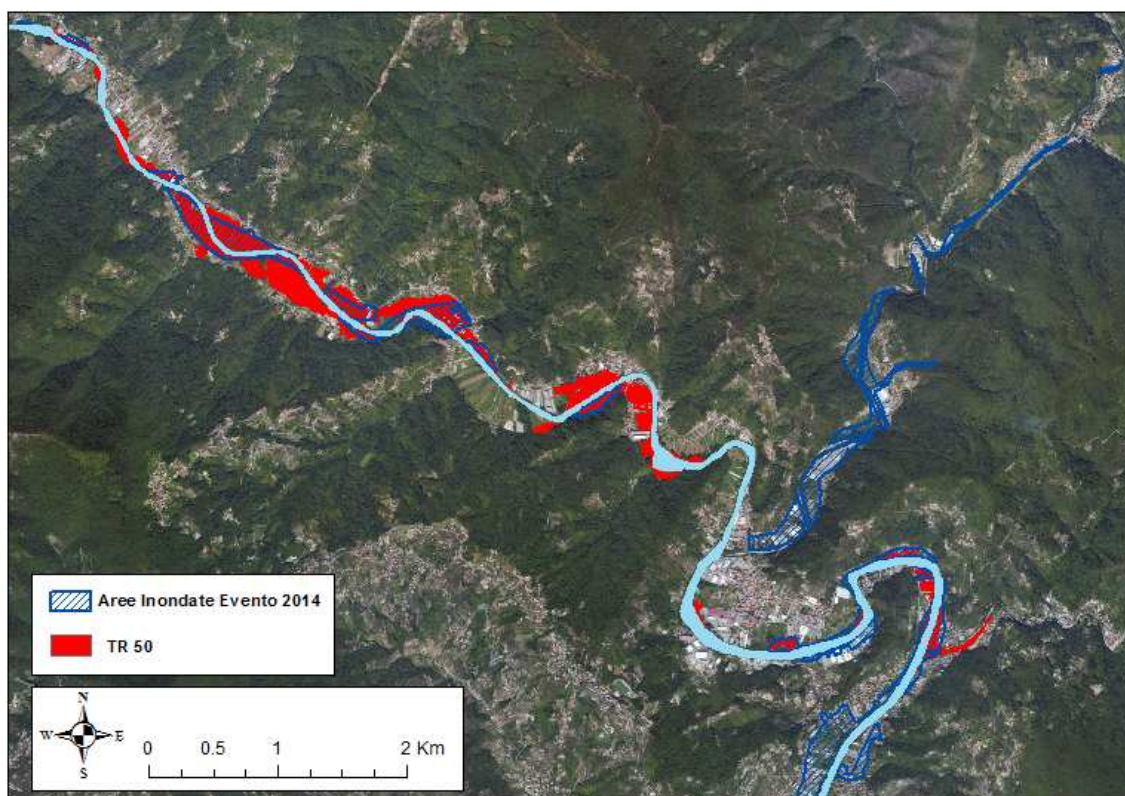


Figura 4.11 Mappatura di confronto tra la perimetrazione degli allagamenti osservati dell'evento 2014 e quella dell'evento simulato con tempo di ritorno 50 anni.

A conclusione del presente paragrafo, in merito alla validazione dei modelli implementati a partire dai dati degli eventi pregressi, si cita quale ulteriore fonte informativa il tematismo del Piano di Bacino delle aree storicamente inondate, che in termini di locale valutazione degli esiti della modellazione può fornire un'ulteriore validazione di quanto ottenuto, pur nella genericità di tale informazione. Tale informazione è stata ricavata dalla relativa Carta, di cui in Figura 4.12 è riportato un esempio.

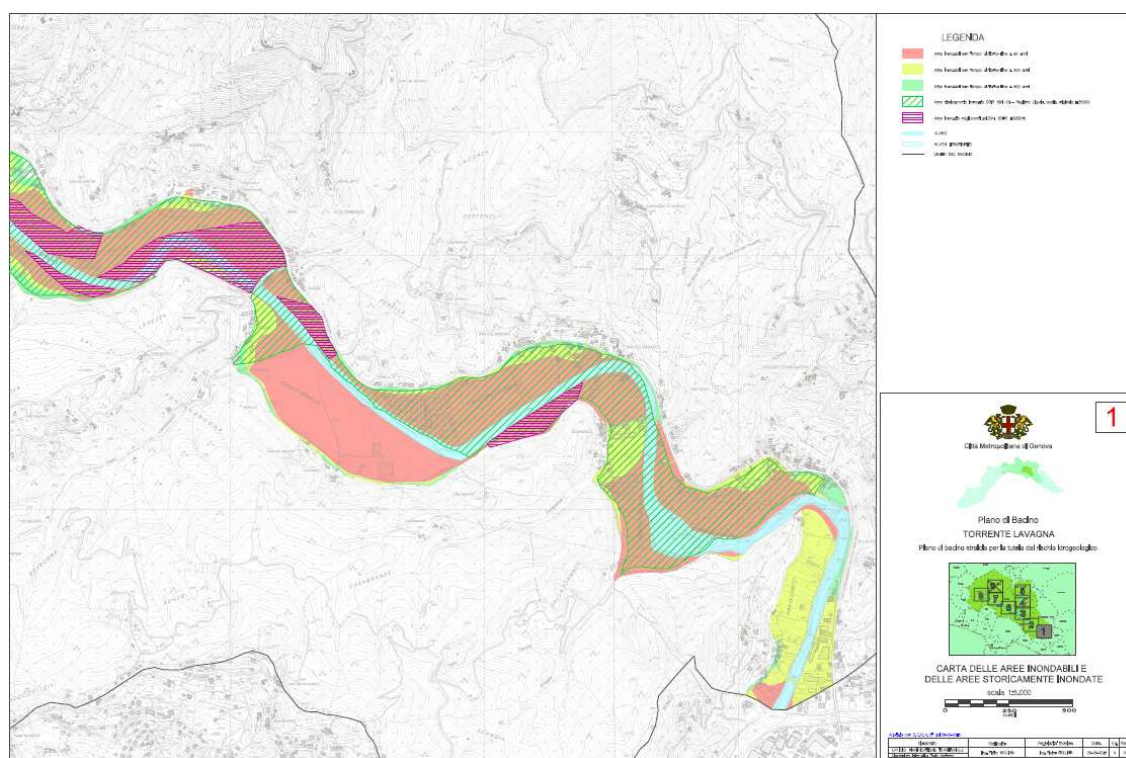


Figura 4.12 Torrente Lavagna – Esempio di tavola della Carta delle aree storicamente inondate pubblicata nel Piano di Bacino.

## 5 Proposta di fasce di pericolosità idraulica

### 5.1 Premessa

Le fasce di inondabilità sono definite nelle Norme di Attuazione del Piano di Bacino Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, in particolare all'Art. 12, per entrambi gli ambiti di interesse (torrente Lavagna e Ambito n°16). Tale definizione è di seguito integralmente riportata.

*Fasce di inondabilità («Aree AIN»): sono individuate nella «Carta delle fasce di inondabilità» ed articolate nel modo seguente:*

- 1) *Fascia A – pericolosità idraulica molto elevata ( $P_{13}$ ): aree perifluviali inondabili al verificarsi dell'evento di piena con portata al colmo di piena corrispondente a periodo di ritorno  $T=50$  anni;*
- 2) *Fascia B – pericolosità idraulica media ( $P_{12}$ ): aree perifluviali, esterne alle precedenti, inondabili al verificarsi dell'evento di piena con portata al colmo di piena corrispondente a periodo di ritorno  $T=200$  anni;*
- 3) *Fascia C – pericolosità idraulica bassa ( $P_{11}$ ): aree perifluviali, esterne alle precedenti, inondabili al verificarsi dell'evento di piena con portata al colmo di piena corrispondente a periodo di ritorno  $T=500$  anni, o aree storicamente inondate ove più ampie, laddove non si siano verificate modifiche definitive del territorio tali da escludere il ripetersi dell'evento;*
- 4) *Fascia B\* (ovvero A\*): aree storicamente inondate, per le quali non siano avvenute modifiche definitive del territorio tali da escludere il ripetersi dell'evento, ovvero aree individuate come a rischio di inondazione sulla base di considerazioni geomorfologiche o di*

*altra evidenze di criticità, in corrispondenza delle quali non siano state effettuate nell'ambito dei Piani le adeguate verifiche idrauliche finalizzate all'individuazione delle fasce di inondabilità.*

Operativamente per la definizione delle sopracitate fasce occorre non solamente determinare gli allagamenti degli eventi con i tempo di ritorno specificati, da cui ricavare la perimetrazione, ma svolgere anche una serie di valutazioni di carattere sia idraulico sia urbanistico, che verranno esplicitate nel dettaglio all'interno del presente Capitolo.

## 5.2 Criteri per la definizione delle fasce di pericolosità idraulica

Ai fini della perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica occorre procedere in primo luogo all'analisi di dettaglio dei risultati delle simulazioni degli eventi con tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni, precedentemente descritti al Par. 4.6. Tale analisi di dettaglio comporta la valutazione dei seguenti input:

- comparazione degli allagamenti determinati dalle simulazioni rispetto alle rispettive fasce di inondabilità attualmente vigenti, al fine di valutare se localmente nei diversi tratti investigati si tratta di una conferma, un restringimento, un ampliamento o una nuova perimetrazione rispetto alle fasce vigenti;
- comparazione dei massimi livelli in alveo con gli impalcati degli attraversamenti, al fine di valutarne il franco idraulico di sicurezza;
- comparazione dei massimi livelli in alveo con le quote spondali in tutte le sezioni del corso d'acqua;
- valutazione del grado di confidenza dei risultati e verifica di scenari di parzializzazione delle sezioni.

In merito al terzo punto, indirettamente attinente anche al secondo, nei casi in cui il franco idraulico in alveo sia negativo e sia correttamente rappresentata la propagazione sul dominio bidimensionale degli allagamenti, non occorre svolgere particolari approfondimenti, in quanto si tratta semplicemente di perimetrare entro la fascia quanto coinvolto dalle esondazioni. In termini opposti, invece, nelle sezioni in cui il franco idraulico risulta molto ampio, uguale o superiore al metro, si ritiene tale margine di sicurezza adeguato per considerare non sormontate le sponde (o non raggiunto l'impalcato del ponte) e pertanto le aree golenali come non soggette ad allagamento, con l'adeguato margine di sicurezza per poterle escludere dalla perimetrazione delle fasce. Quale ultima configurazione possibile, vi è la possibilità che il franco idraulico risulti positivo ma di entità ridotta, inferiore al metro, nel qual caso è da valutarsi un ulteriore approfondimento, come di seguito indicato.

Nei casi in cui il massimo livello in alveo risulta inferiore alla quota spondale con un margine limitato, generalmente inferiore al metro, per un numero significativo di sezioni consecutive in modo tale da poter effettivamente identificare un tratto omogeneo di corso d'acqua in tale condizione, occorre valutare la conformazione del territorio situato nelle adiacenze al tratto stesso, ricavabile ad esempio da un'analisi del DTM. Qualora infatti, in prossimità della sponda, sia presente una zona a forte pendenza e senza la presenza di aree pianeggianti in prossimità dell'alveo, il fattore di incertezza di cui può essere affetto il livello di piena non è comunque tale da comportare possibili rilevanti esondazioni, poiché di fatto tali aree disponibili al deflusso non sono presenti. Non si pone quindi il rischio di sottostimare l'estensione delle aree inondabili a causa dei fattori di incertezza dell'analisi idraulica e pertanto non è necessario introdurre particolare coefficienti di sicurezza.

Nei casi in cui invece a latere delle sponde con ridotto franco idraulico siano presenti delle aree pianeggianti, potenzialmente inondabili, allora occorre introdurre un fattore di sicurezza che possa considerare un eventuale incremento del massimo livello di piena in alveo al fine di

appurare quali aree verrebbero conseguentemente allagate. Operativamente tale fattore di sicurezza viene introdotto ipotizzando una parzializzazione della sezione, cioè una riduzione della sezione disponibile al deflusso. Tale riduzione viene stimata sulla base di valutazioni legate a fenomenologie fisiche che possono effettivamente comportare una parzializzazione della sezione defluente, ma va più generalmente inteso come un coefficiente di sicurezza che include, in modo complessivo, come è usuale pratica ingegneristica, tutti i possibili fattori di incertezza legati, ad esempio, in primo luogo alla definizione della geometria della sezione e dell'idrogramma di piena e in secondo luogo a quei fenomeni fisici correlati agli eventi di piena che tuttavia non vengono rappresentati nella presente analisi idraulica quali il trasporto solido, l'evoluzione del fondo dell'alveo, il trasporto di materiale flottante, oscillazioni del livello di piena per fenomeni di natura turbolenta, ecc.

All'interno del tratto di corso d'acqua oggetto di studio si tratta pertanto di identificare se esistono e quali siano le porzioni che rientrano nella casistica descritta, da valutare per ognuno degli eventi con assegnato tempo di ritorno, essendo tale configurazione variabile con il massimo livello di piena in alveo. Per l'evento cinquantennale sono stati complessivamente identificati due tratti in cui svolgere tale ulteriore approfondimento. Il primo si estende tra le sezioni LAV25 e LAV17 comprese, quindi all'interno del tratto afferente al torrente Lavagna nel territorio del Comune di San Colombano Certenoli, mentre il secondo è tra le sezioni LAV01 e 104 comprese, quindi la parte terminale del torrente Lavagna e larga parte del fiume Entella, nella zona in prossimità del centro del Comune di Carasco, fino al Ponte di Birago compreso. Nelle seguenti figure sono rappresentati i due tratti citati, sovrapposti alla cartografia di base.

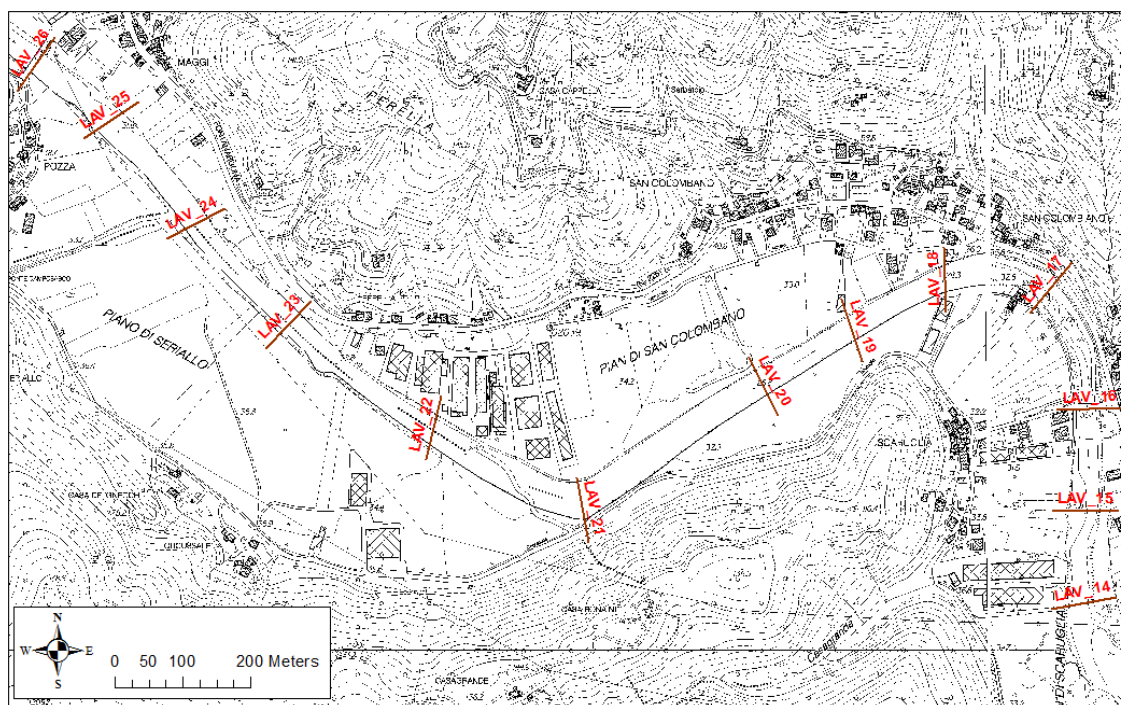


Figura 5.1 Torrente Lavagna - Primo tratto soggetto a parzializzazione di sezione per la definizione delle fasce di pericolosità idraulica – Intervallo LAV25-LAV17.

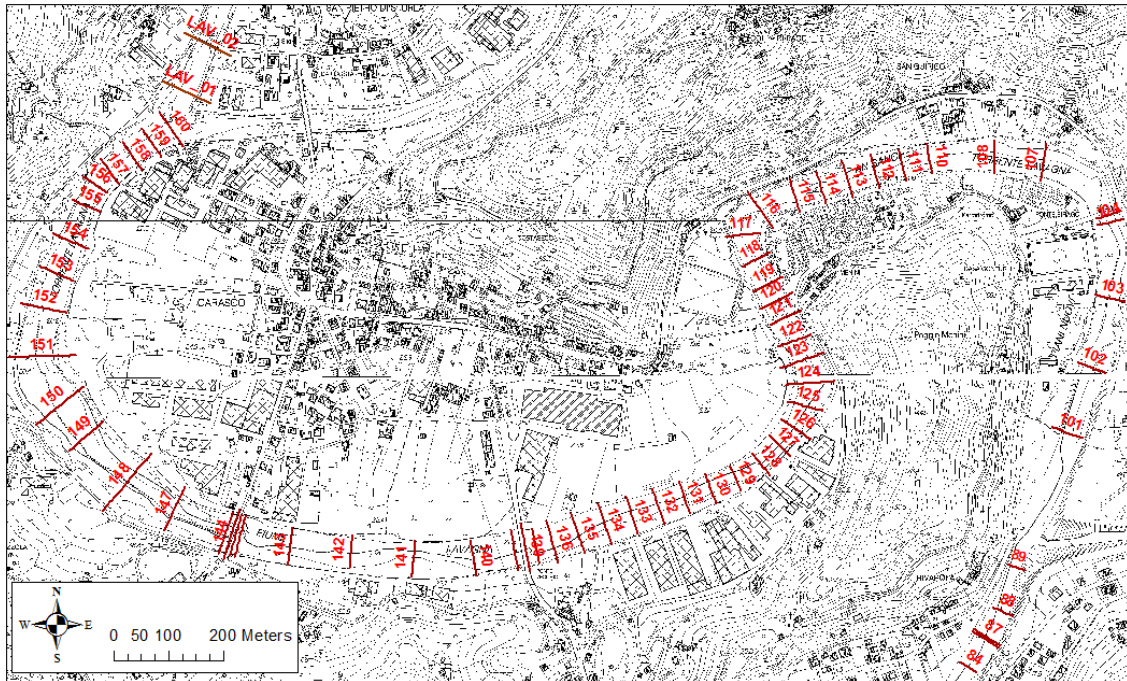


Figura 5.2 Torrente Lavagna e Fiume Entella – Secondo tratto soggetto a parzializzazione di sezione per la definizione delle fasce di pericolosità idraulica – Intervallo LAV01-104.

Per quanto riguarda invece l'evento duecentennale, l'unico tratto in cui si è ritenuto necessario svolgere tale approfondimento è il secondo tratto citato in precedenza e raffigurato in Figura 5.2. Infine, non sono invece stati identificati tratti in cui svolgere questa tipologia di ulteriore analisi con l'evento con tempo di ritorno 500 anni.

La parzializzazione delle sezioni che si assume di considerare è equivalente all'innalzamento di un metro del profilo di fondo, in analogia al metro di franco idraulico di sicurezza. Tale parzializzazione, verificata sui tratti di corso d'acqua in oggetto, è tale da comportare, in rapporto all'area defluente della sezione piena, cioè considerata al livello della massima quota spondale, una riduzione mediamente pari a circa il 10%.

A conclusione è opportuno citare che in aggiunta ai criteri più strettamente idraulici precedentemente introdotti, altre valutazioni possono essere condotte per tracciare una perimetrazione delle fasce inondabili, leggermente differente da quello che può essere il puro involucro dell'estensione degli allagamenti ricavati dalle simulazioni.

In primo luogo, qualora vi siano piccole aree attualmente perimetrare in fascia, in tratti in cui il franco idraulico pur risultando positivo è comunque inferiore al metro e non si è ritenuto necessario in quel tratto adottare la parzializzazione delle sezioni, si è mantenuta convenzionalmente la perimetrazione esistente, perché il margine di sicurezza non è sufficiente a giustificare un declassamento della pericolosità idraulica.

In secondo luogo, nel definire la perimetrazione, si è tenuto conto di elementi urbanistici secondo le convenzionali metodologie suggerite dalla competente Autorità di Bacino, a titolo di esempio per quanto riguarda l'inserimento entro la fascia di edifici lambiti su uno o più lati dagli allagamenti.

## 5.3 Risultati

I risultati inerenti all'attività di definizione della perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica sono duplici. In primo luogo vi è l'esito dell'ipotesi di parzializzazione delle sezioni in due tratti

del corso d'acqua per alcuni dei tempi di ritorno considerati, di cui verificare gli effetti. In secondo luogo, sulla base di tutte le simulazioni condotte, l'effettiva perimetrazione proposta per le tre fasce A, B e C.

Nelle seguenti figure è rappresentata una comparazione, in termini di massima estensione degli allagamenti, tra i risultati delle simulazioni con e senza la parzializzazione delle sezioni.

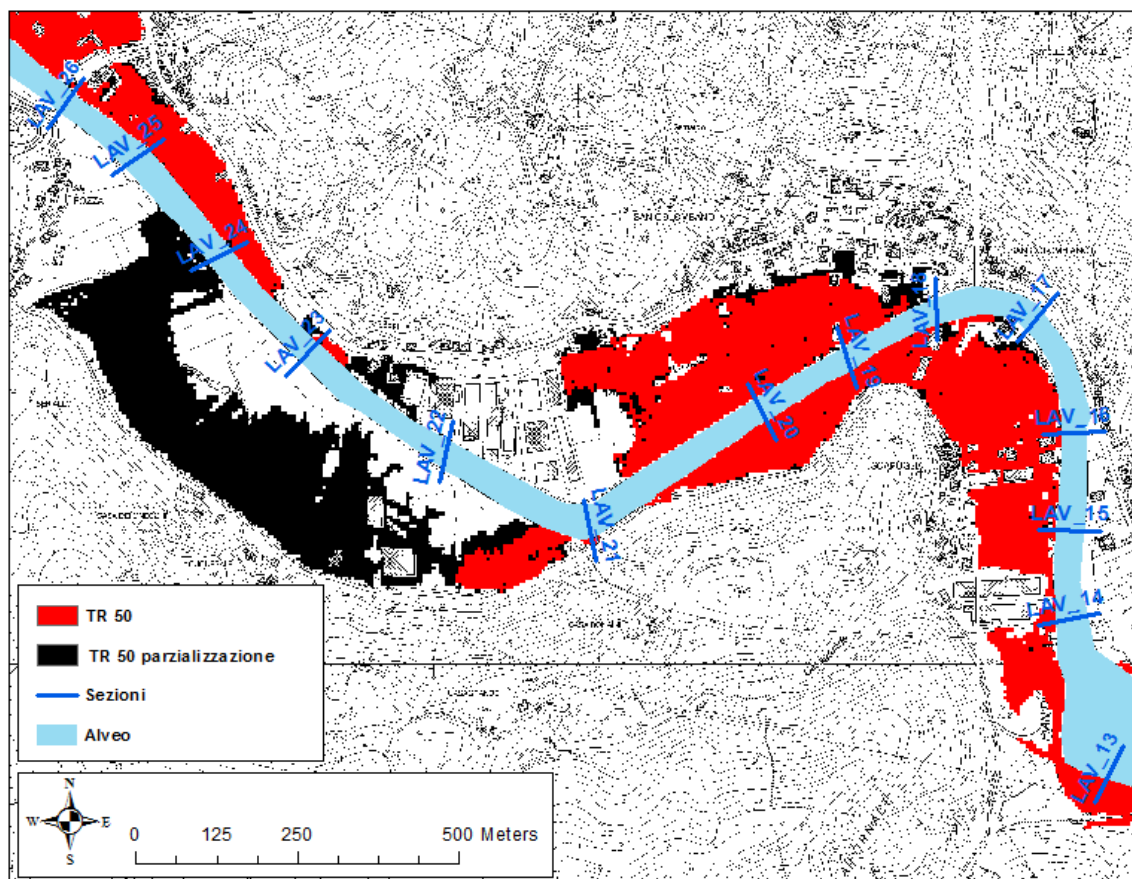


Figura 5.3 Torrente Lavagna – Comparazione dell'estensione degli allagamenti degli eventi con tempo di ritorno 50 anni con e senza parzializzazione di sezione, rispettivamente in colore nero e rosso, nel primo tratto oggetto di riduzione della sezione defluente.

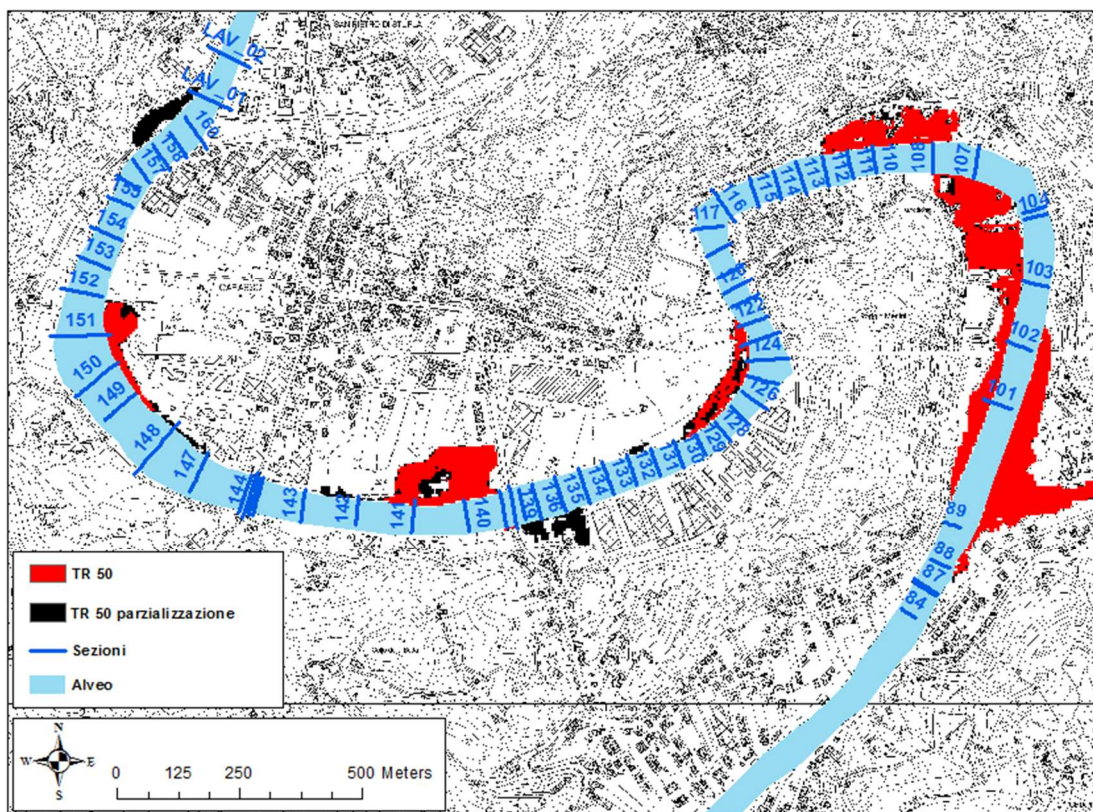


Figura 5.4 Torrente Lavagna e fiume Entella – Comparazione dell'estensione degli allagamenti degli eventi con tempo di ritorno 50 anni con e senza parzializzazione di sezione, rispettivamente in colore nero e rosso, nel secondo tratto oggetto di riduzione della sezione defluente.

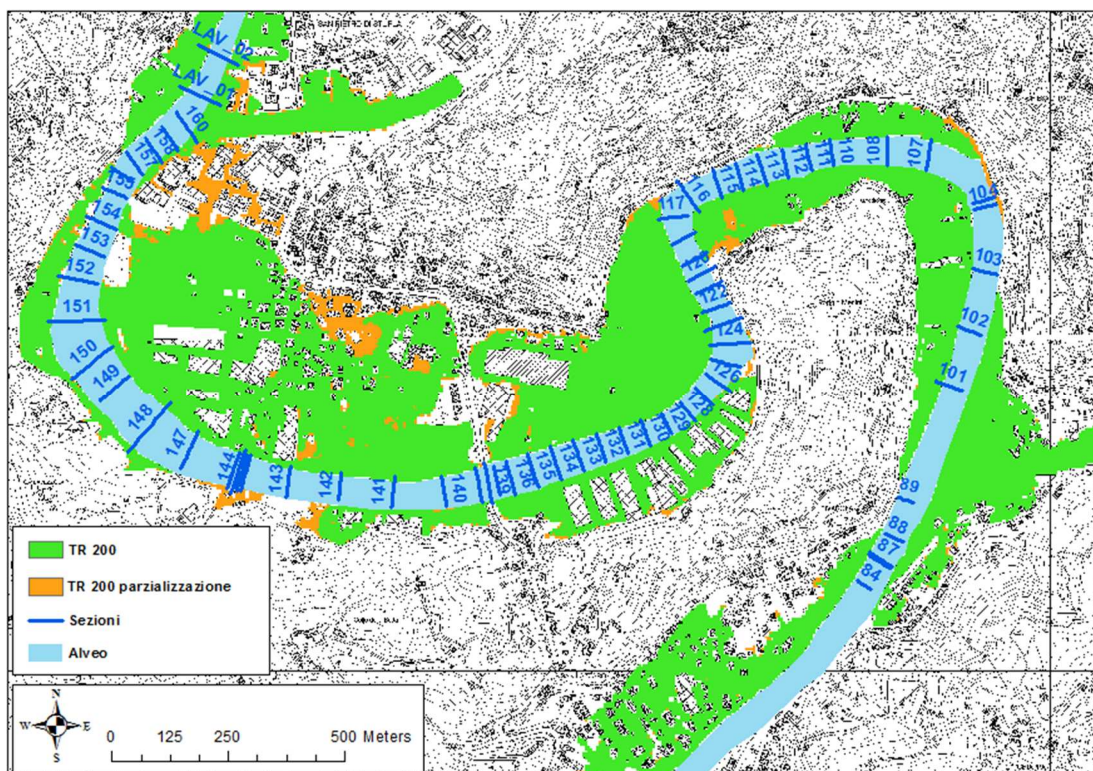


Figura 5.5 Torrente Lavagna e fiume Entella – Comparazione dell'estensione degli allagamenti degli eventi con tempo di ritorno 200 anni con e senza parzializzazione di sezione, rispettivamente in colore arancione e verde, nel secondo tratto oggetto di riduzione della sezione defluente.



La definizione di dettaglio su tutto il dominio di studio dei tematismi degli allagamenti, della perimetrazione delle fasce di inondabilità e dei valori massimi delle variabili idrodinamiche in alveo, sono disponibili nei GRID, nelle mappe e nelle tabelle allegate.

Di seguito si forniscono alcune rappresentazioni di dettaglio delle proposte di fasce di inondabilità, a titolo di esempio, circoscritte ad alcune aree di particolare interesse.

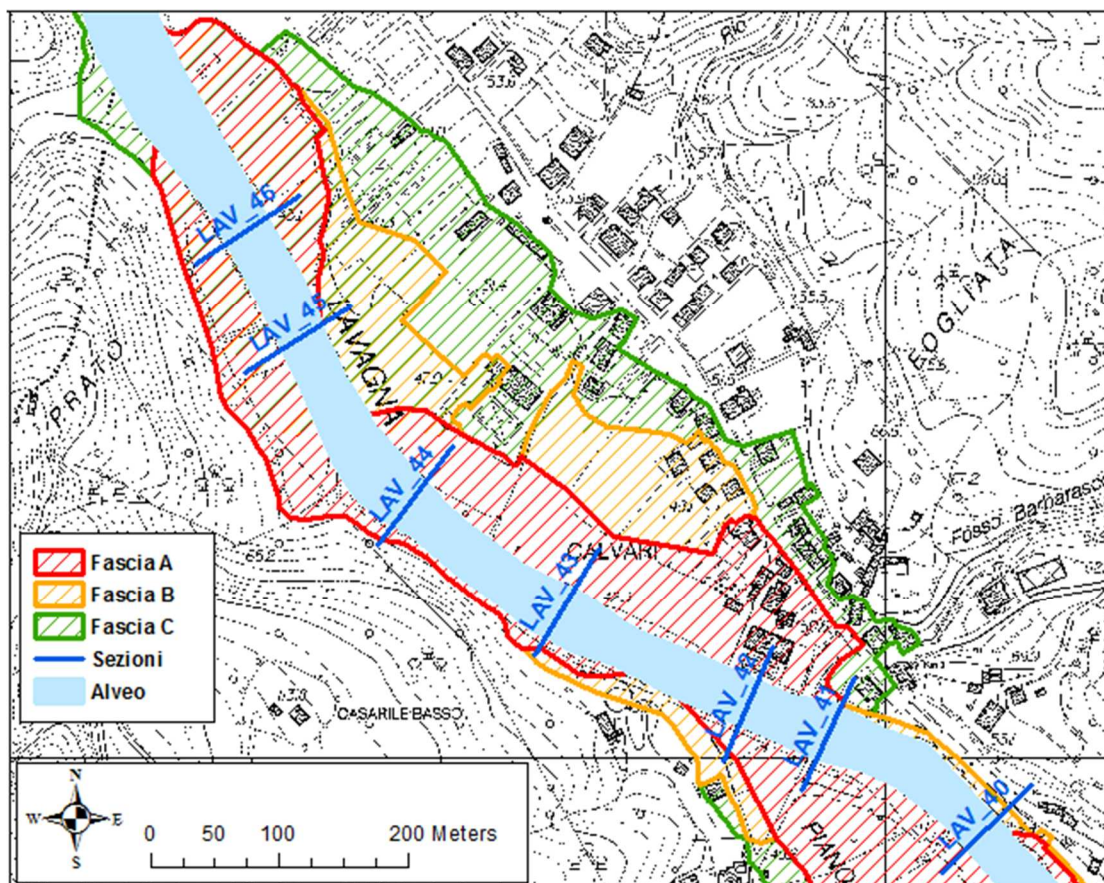


Figura 5.6 Proposte di fasce di inondabilità A-B-C in prossimità dell'abitato di Calvaresi.

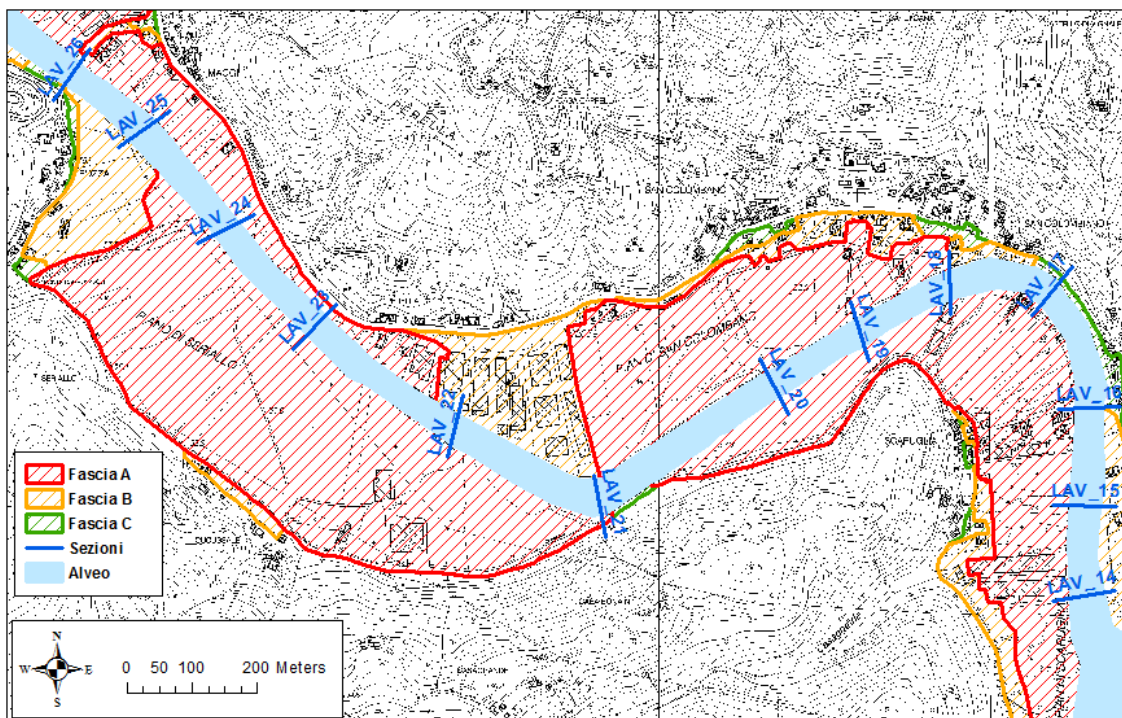


Figura 5.7 Proposte di fasce di inondabilità A-B-C in prossimità dell'abitato di San Colombano Certenoli.

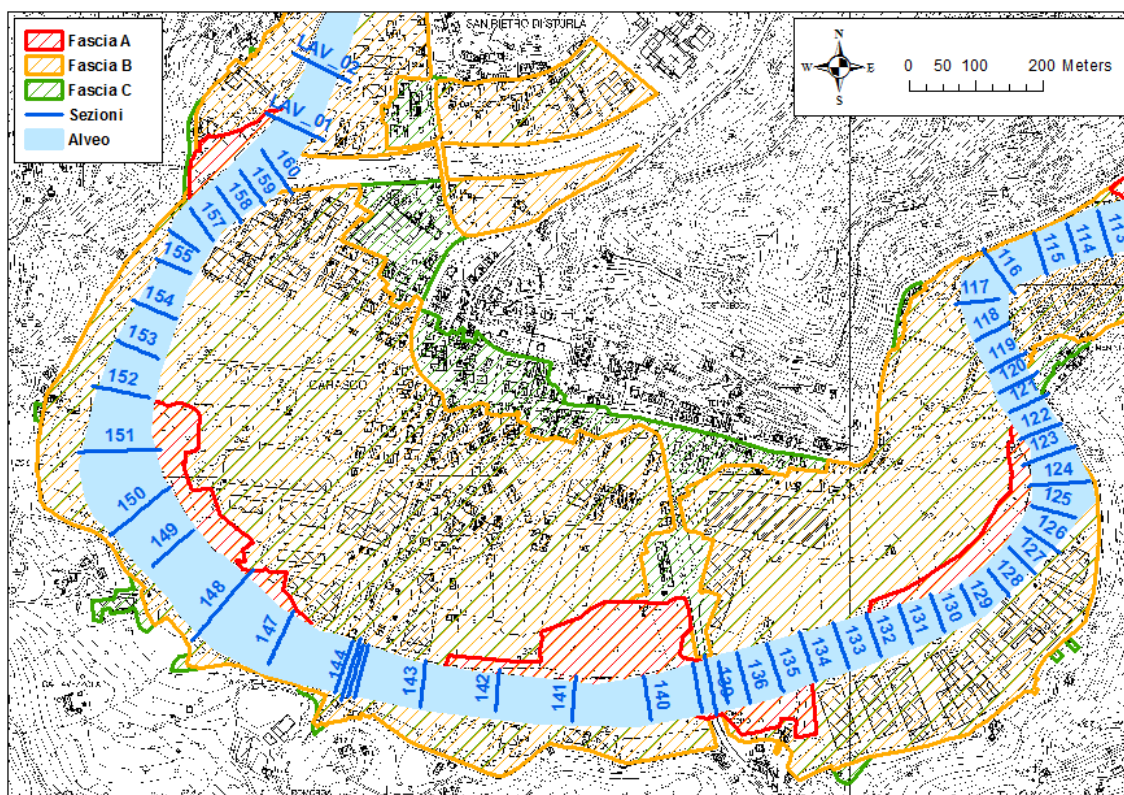


Figura 5.8 Proposte di fasce di inondabilità A-B-C in prossimità dell'abitato di Carasco.

## 6 Proposta di fascia di riassetto fluviale

### 6.1 Premessa

La fascia di riassetto fluviale è definita nelle Norme di Attuazione del Piano di Bacino Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, in particolare all'Art. 12, per entrambi gli ambiti di interesse (torrente Lavagna e Ambito n°16). Tale definizione è di seguito integralmente riportata.

*Fascia di riassetto fluviale (RF): è individuata nella “Carta della fascia di riassetto fluviale” o nella “Carta delle fasce di inondabilità” e comprende le aree esterne all'alveo attuale necessarie per l'adeguamento del corso d'acqua all'assetto definitivo previsto dal presente Piano. La sua delimitazione è effettuata sulla base delle strategie e delle scelte pianificatorie del Piano e dell'insieme degli interventi strutturali individuati nell'ambito dello stesso. Comprende in particolare le aree necessarie al ripristino della idonea sezione idraulica, tutte le forme fluviali riattivabili durante gli stati di piena e le aree da destinare alle opere di sistemazione idraulica previste. Può comprendere, inoltre, aree ritenute di pertinenza fluviale e/o di elevato pregio naturalistico-ambientale limitrofe al corso d'acqua.*

Come specificato in premessa al Cap. 1, tra le attività previste nel presente incarico vi è anche la definizione della fascia di riassetto fluviale. Poiché come emerge dalla definizione stessa, la delimitazione di tale fascia è conseguenza anche di scelte pianificatorie del Piano, la proposta fornita in questo approfondimento idraulico sarà maggiormente improntata a valutazioni di natura idraulica, in modo da fornire successivamente, agli Enti preposti alle scelte pianificatorie, elementi utili da integrare con valutazioni più ampie e proprie della pianificazione di bacino.

Nel presente Capitolo vengono illustrati i criteri adottati per la definizione della fascia di riassetto fluviale e la proposta di delimitazione conseguentemente ottenuta.

### 6.2 Criteri per la definizione della fascia di riassetto fluviale

Come anticipato in premessa, il criterio adottato per la definizione della fascia di riassetto fluviale è improntato a una valutazione di parametri di natura prevalentemente idrodinamica, esulando pertanto da valutazioni di tipo urbanistico, pur basando l'ipotesi di fascia sulla realtà concreta del territorio in esame. Conseguentemente a ciò, la proposta di fascia è stata elaborata a partire dai risultati dell'analisi idraulica descritta nei precedenti capitoli.

In considerazione della definizione stessa della fascia, si è utilizzato quale evento di riferimento la piena duecentennale, che nell'ipotetico assetto definitivo del corso d'acqua dovrebbe risultare completamente contenuta in alveo. A partire dagli allagamenti di tale evento si è definito un criterio di selezione degli stessi in modo da delimitare la componente preponderante in termini di deflusso superficiale, da comprendere all'interno della fascia, considerando accettabile che allagamenti residuali con valore marginale di portata defluente non vengano inseriti: in questo modo la fascia di riassetto fluviale, oltre naturalmente all'alveo attivo, delimita tutte le aree in cui defluisce la piena duecentennale a meno di contributi marginali.

Operativamente il criterio sopradescritto si può esplicitare valutando la grandezza idrodinamica della densità di flusso, che rappresenta sostanzialmente la portata defluente nel dominio bidimensionale per unità di cella, per la quale si è preso quale riferimento il valore di soglia di  $1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ; tale valore, rapportato alla dimensione di cella di 5m definita nel modello, equivale a una portata defluente di  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . In analogia alle classi di tiranti e velocità poste alla base della classificazione degli ambiti normativi di fascia B, tale valore corrisponde a una combinazione di tiranti mediamente superiori al metro e velocità mediamente dell'ordine di  $1 \text{ m}/\text{s}$ ; pertanto, in analogia alla classificazione citata, tale combinazione rientra nell'ambito normativo BB.

A seguito della rappresentazione di tale tematismo, filtrato sul valore di soglia definito, si è proceduto con la perimetrazione della fascia di riassetto fluviale con criterio analogo con quanto descritto per le fasce di inondabilità, cioè circoscrivendo il tematismo ma tenendo anche il conto degli elementi urbanistici presenti nel territorio (ad esempio gli edifici). In particolare, essendo la fascia di riassetto fluviale maggiormente di indirizzo rispetto a quelle di inondabilità, nella delimitazione si è adottato un approccio meno puntuale rispetto ai risultati idraulici.

### 6.3 Risultati

La definizione di dettaglio su tutto il dominio di studio della fascia di riassetto fluviale è disponibile nelle mappe allegate. Di seguito si forniscono alcune rappresentazioni di dettaglio, a titolo di esempio, circoscritte ad alcune aree di interesse, con la fascia sovrapposta al tematismo della densità di flusso.

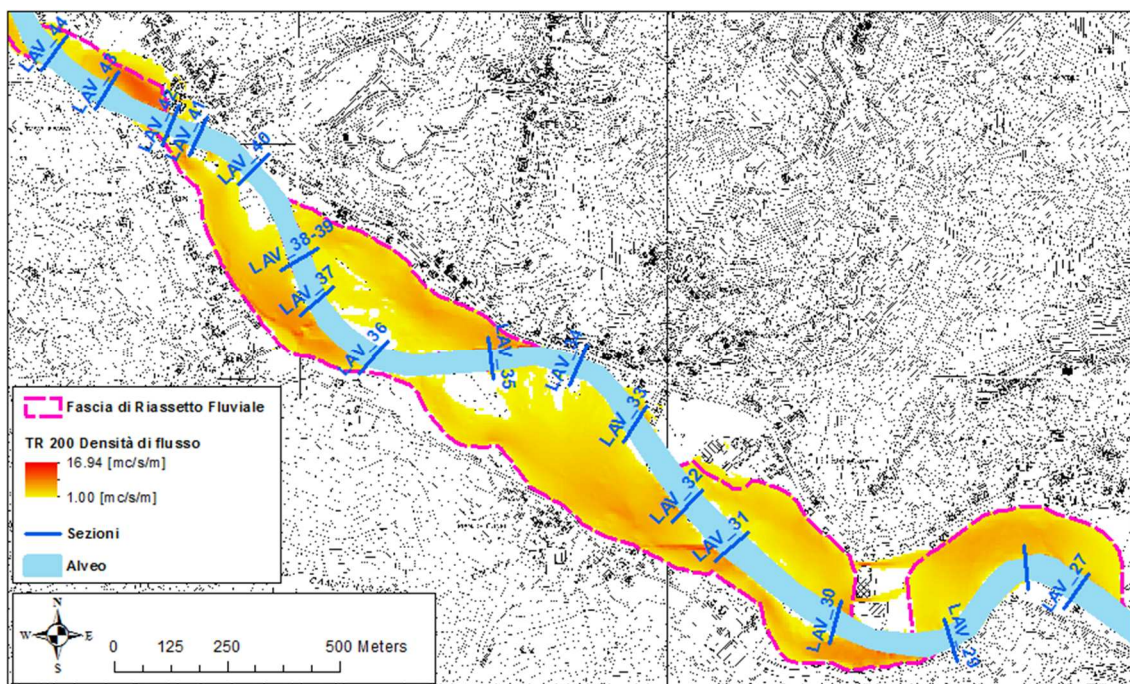


Figura 6.1 Tematismi della proposta di fascia di riassetto fluviale e della densità di flusso dell'evento duecentennale in una porzione del bacino del torrente Lavagna oggetto di studio.

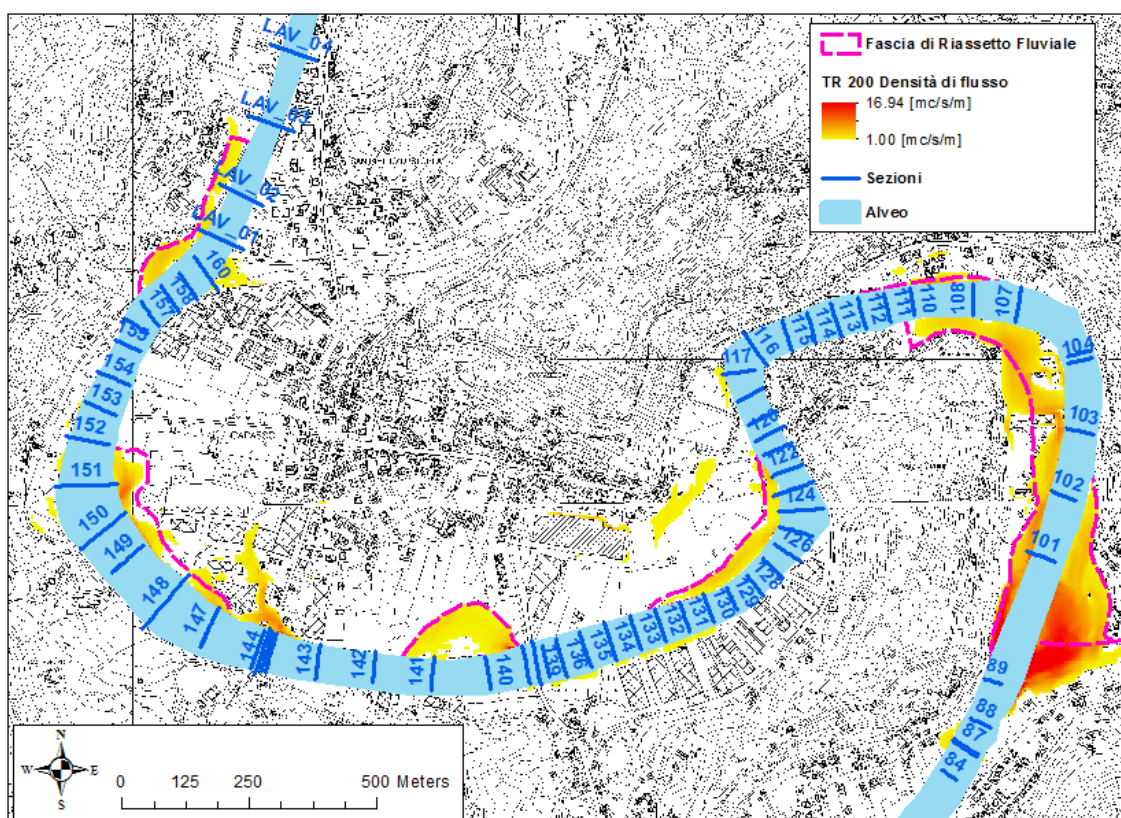


Figura 6.2 Tematismi della proposta di fascia di riassetto fluviale e della densità di flusso dell'evento duecentennale in prossimità del centro abitato di Carasco.

## 7 Scenari di intervento – Comune di S. Colombano Certenoli

### 7.1 Premessa

Tra le attività previste nel presente incarico vi è infine un'analisi e comparazione di interventi idraulici e urbanistici; nel dettaglio la stessa, in accordo con il Committente, si è esplicitata nell'ipotizzare e valutare due scenari di intervento di messa in sicurezza nel territorio di San Colombano Certenoli. In particolare l'area oggetto di ipotesi di intervento è situata in sponda sinistra tra le sezioni LAV24 e LAV17, rappresentata nella seguente Figura 7.1 su base cartografica con la sovrapposizione delle proposte di fasce di inondabilità elaborate nel presente approfondimento idraulico.

In dettaglio si evidenzia la presenza, procedendo da monte verso valle, di una zona industriale in parte in fascia A e in parte in fascia B, di un'ampia zona non ancora urbanizzata e inserita in fascia A ed infine la parte centrale dell'abitato di San Colombano Certenoli con la chiesa, un impianto sportivo, alcune abitazioni, direttamente in fascia A o in prossimità di essa.

La Figura 7.2 rappresenta una visualizzazione tridimensionale dall'alto dell'area in oggetto, con il centro abitato in primo piano, al fine di una migliore visualizzazione degli edifici presenti e della destinazione urbanistica delle aree.

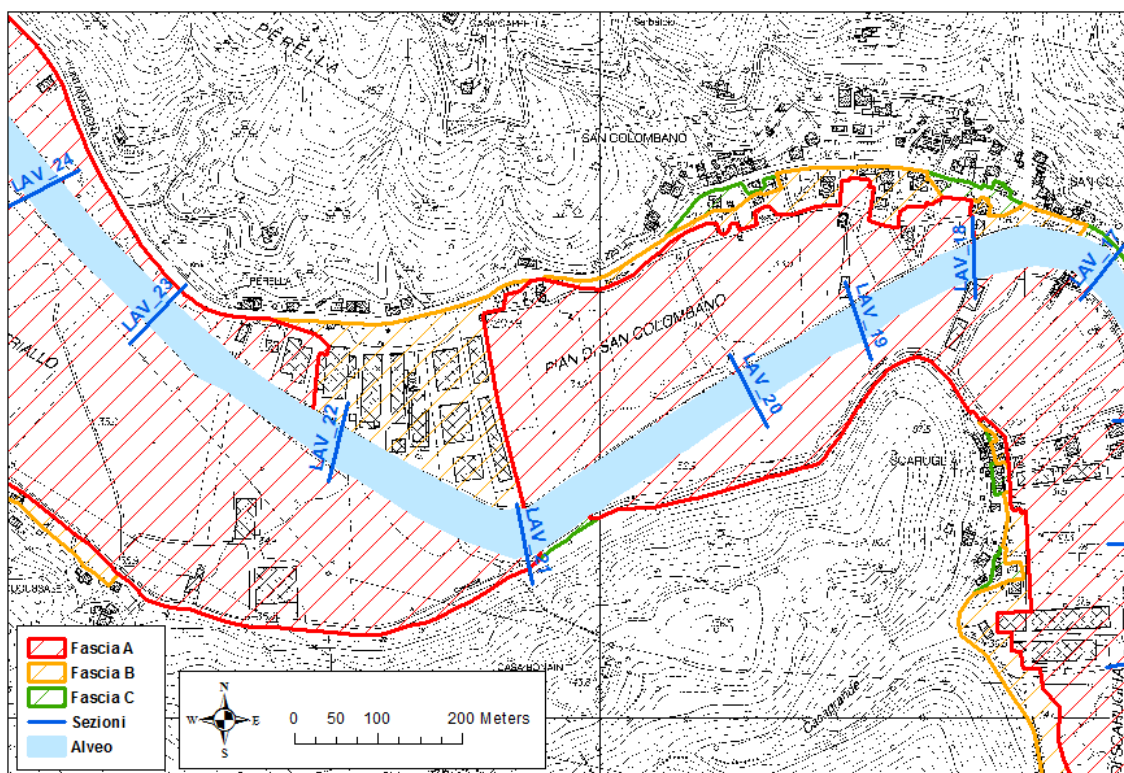


Figura 7.1 Area nel Comune di San Colombano Certenoli, in sponda sinistra, oggetto delle ipotesi di intervento di sistemazione idraulica.



Figura 7.2 Comune di San Colombano Certenoli, rappresentazione tridimensionale aerea dell'area in sponda sinistra del torrente Lavagna oggetto delle ipotesi di sistemazione idraulica.

## 7.2 Ipotesi di intervento

L'ipotesi di intervento elaborata, distinta in due scenari differenziati, consiste essenzialmente nella realizzazione di una difesa spondale tale da mettere in sicurezza parte delle aree in sponda sinistra nel tratto sopra descritto. Occorre specificare che la valutazione degli effetti dell'intervento non va svolta solo in termini di benefici sull'area che si vuol mettere in sicurezza, ma anche di impatto sulle aree circostanti e sui livelli in alveo, in modo da quantificare eventuali incrementi di pericolosità in altre porzioni del dominio.

Le seguenti Figura 7.3 e Figura 7.4 rappresentano a diverso livello di dettaglio l'intervento ipotizzato in sponda sinistra: dalla sezione LAV23 alla LAV21 e successivamente dal campo sportivo (poco a valle della LAV19) alla LAV17 in entrambi gli scenari è prevista la realizzazione di una protezione arginale immediatamente in sponda all'alveo e di altezza tale da non risultare sormontata dai livelli di piena; nel tratto intermedio, dalla sezione LAV21 al campo sportivo, è prevista simile protezione arginale ma non immediatamente in sponda: la localizzazione risulta all'interno dell'area golenale e differenziata tra i due scenari. Nella prima ipotesi, di seguito sinteticamente denominata "arginatura stretta", tale protezione risulta molto vicina all'alveo, con il vantaggio di mettere in sicurezza una porzione di territorio maggiore ma con lo svantaggio, di cui si tratterà più diffusamente in seguito, di incrementare maggiormente i livelli in alveo e i tiranti degli allagamenti nel territorio circostante; in particolare in questa configurazione si metterebbero in sicurezza tutti gli edifici attualmente presenti, anche quelli realizzati più vicini all'alveo. Nella seconda ipotesi, denominata invece "arginatura larga", la localizzazione sarebbe più distante dall'alveo, non proteggerebbe tutti gli edifici attualmente presenti (in particolare uno, situato in prossimità del campo sportivo e particolarmente vicino all'alveo) e metterebbe in sicurezza una porzione di superficie minore; al contempo però l'intervento impatterebbe in misura minore in termini di riduzione dell'effetto di laminazione attualmente generato dall'area golenale accessibile agli allagamenti. In dettaglio, in termini indicativi, tale seconda ipotesi prenderebbe quale limite dell'area da porre in sicurezza la breve strada localizzata tra la Strada Provinciale e l'alveo, dove è anche presente accanto ad essa un fosso di limitate dimensioni, garantendo pertanto almeno la protezione di tutti i fabbricati situati internamente tra le due strade citate.

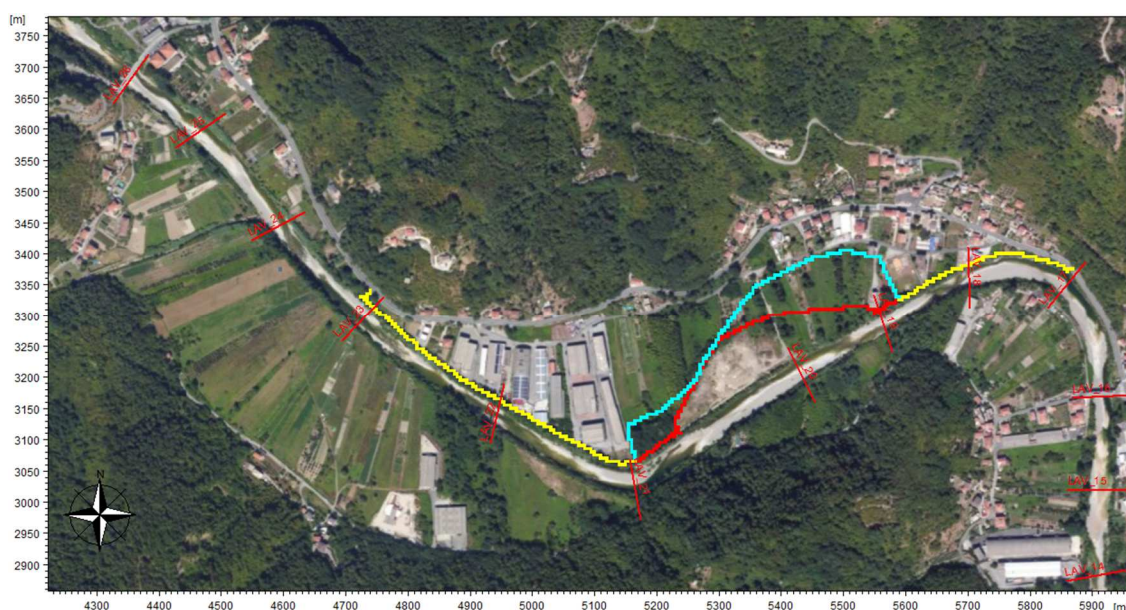


Figura 7.3 Comune di San Colombano Certenoli: traccia delle opere di protezione idraulica ipotizzate nell'area di intervento: i tratti evidenziati in giallo sono comuni tra le due ipotesi di intervento, quelli in azzurro e in rosso rappresentano le due alternative nel tratto intermedio.



Figura 7.4 Comune di San Colombano Certenoli: visualizzazione di dettaglio della traccia planimetrica delle ipotesi di intervento degli scenari di sistemazione idraulica dell'area.

## 7.3 Risultati

Al fine di analizzare l'efficacia e l'impatto delle ipotesi di intervento di sistemazione idraulica considerate, è stata elaborata una variante dei modelli idraulici implementati in MIKE FLOOD e illustrati al Cap. 4, in cui nella batimetria di calcolo è stata inserita l'opera di protezione spondale descritta nel precedente paragrafo, nelle due varianti presentate. Poiché la valutazione idraulica è stata condotta al fine di verificare le condizioni nell'ipotesi di messa in sicurezza definitiva delle aree descritte, l'analisi è stata condotta con il solo evento con tempo di ritorno 200 anni. Operativamente sono state selezionate le celle evidenziate con le differenti colorazioni in Figura 7.3, a cui è stata assegnata una quota altimetrica tale da non essere sormontata dagli allagamenti della piena duecentennale. Nei successivi livelli di progettazione, qualora si proceda secondo le ipotesi indicate, sarà possibile stimare la quota di dettaglio di tali manufatti a partire dai livelli raggiunti in alveo e nelle aree coinvolte da allagamenti, valori disponibili a partire dai risultati degli scenari qui descritti.

Di seguito si illustrano i risultati delle due simulazioni idrauliche condotte, nei rispettivi scenari, in termini di mutuo confronto e di comparazione rispetto alla configurazione attuale. I risultati di dettaglio, in termini di tabelle e mappe, sono consultabili negli allegati al presente elaborato.

Idrogramma di portata in una sezione immediatamente a valle dell'area di intervento, localizzata presso il ponte della sezione LAV16: l'incremento di portata defluente dovuto ad entrambi gli interventi è assolutamente marginale, con differenze di entità inferiore a  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  rispetto a un valore di massima portata di circa  $1385 \text{ m}^3/\text{s}$ ; in termini di idrogramma si segnala inoltre un lieve anticipo del tempo al picco, per entrambi gli scenari, pari a circa 5 minuti. Tale variazione è di per sé poco significativa ma pone in evidenza il fatto che qualora venissero realizzati una pluralità di analoghi interventi lungo il corso d'acqua, senza tenere opportunamente in conto questa conseguenza, si potrebbe ottenere una riduzione anche consistente del tempo di corrivazione del bacino alla sezione di chiusura. La seguente Figura 7.5 rappresenta una comparazione del picco dell'idrogramma di portata nelle tre configurazioni.



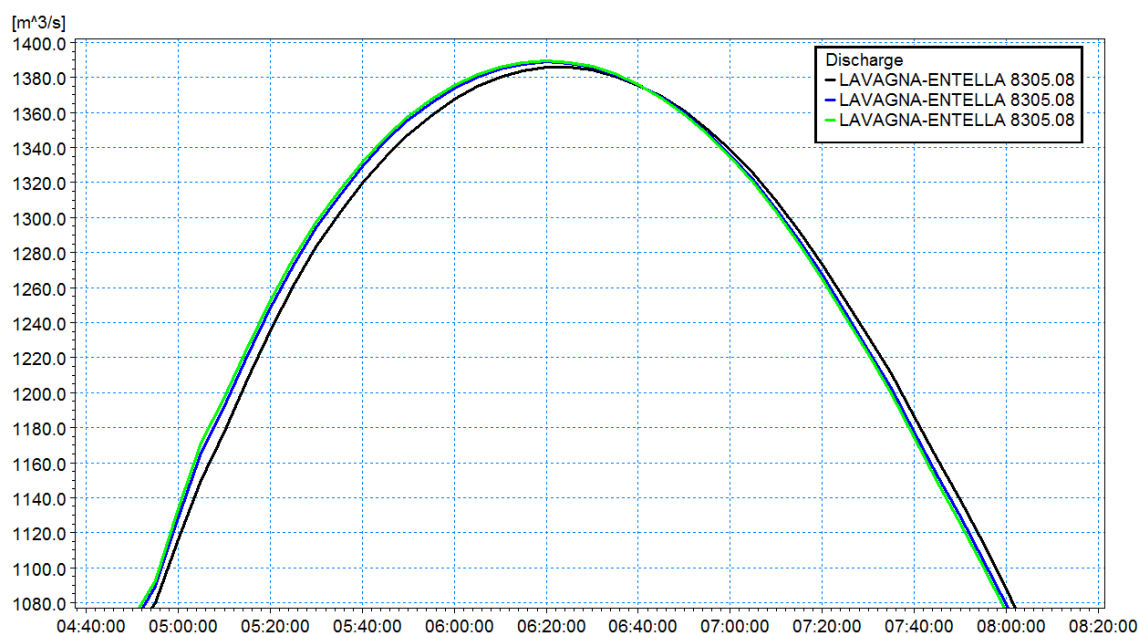


Figura 7.5 Sezione LAV16: confronto tra gli idrogrammi dell'evento con tempo di ritorno 200 anni nelle configurazioni: attuale in nero, arginatura "larga" in blu, arginatura "stretta" in verde.

Massimo profilo di corrente in alveo nel tratto oggetto di intervento: le differenze tra le tre configurazioni risultano poco significative, pari a pochi centimetri, nel tratto oggetto di intervento, per poi sostanzialmente annullarsi immediatamente a valle di esso, a partire dalla sezione LAV17, come illustrato in Figura 7.6.

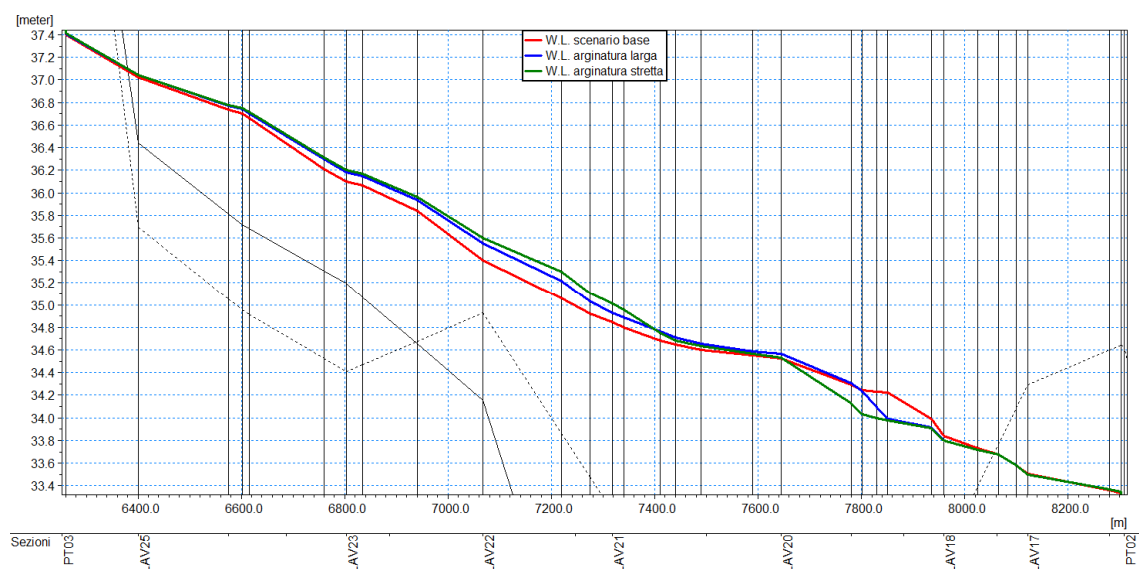


Figura 7.6 Confronto dell'andamento del massimo livello in alveo, a fronte di un evento con tempo di ritorno 200 anni, nelle tre configurazioni considerate: attuale in rosso, arginatura "larga" in blu, arginatura "stretta" in verde.

Tiranti degli allagamenti nel dominio bidimensionale in prossimità dell'area di intervento: nelle due configurazioni di sistemazione idraulica gli incrementi risultano evidentemente differenziati, con valori maggiori nel caso di arginatura "stretta"; tuttavia si evidenzia come gli stessi risultino generalmente contenuti in entrambi i casi, mantenendosi sempre inferiori ai 30 cm e, nel caso di "arginatura larga", quasi ovunque anche minori di 20 cm. In particolare in Figura 7.7 sono rappresentate le differenze di tirante idrico degli allagamenti tra lo scenario con "arginatura

larga” rispetto alla configurazione base, mentre in Figura 7.8 è mostrato analogo confronto ma relativo all’ipotesi di “arginatura stretta”.

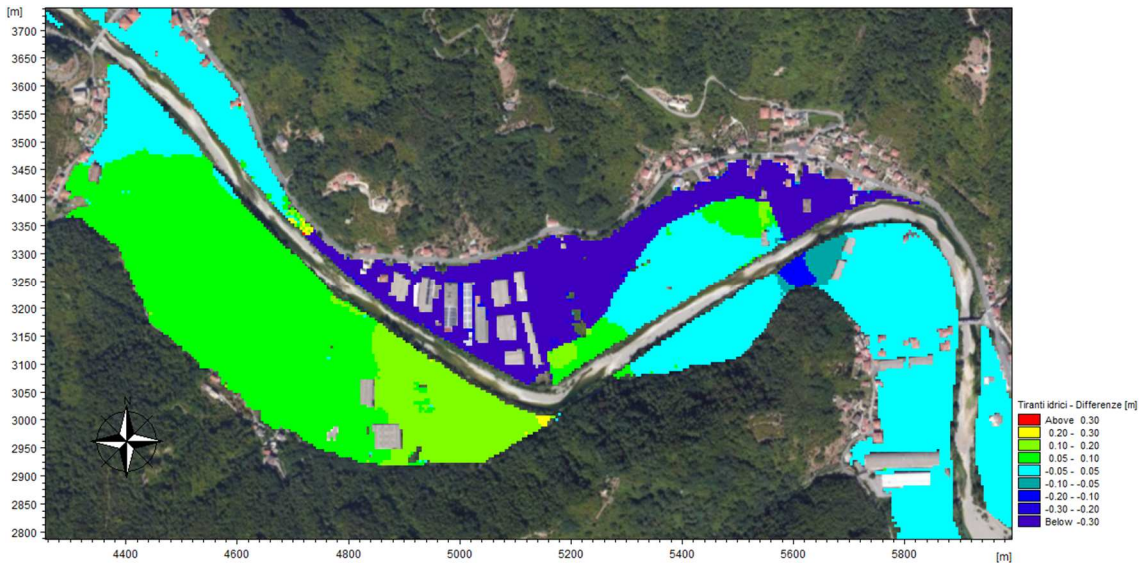


Figura 7.7 Comune di San Colombano Certenoli – Differenze di tiranti idrici degli allagamenti tra lo scenario di sistemazione idraulica con “arginatura larga” e la configurazione base.

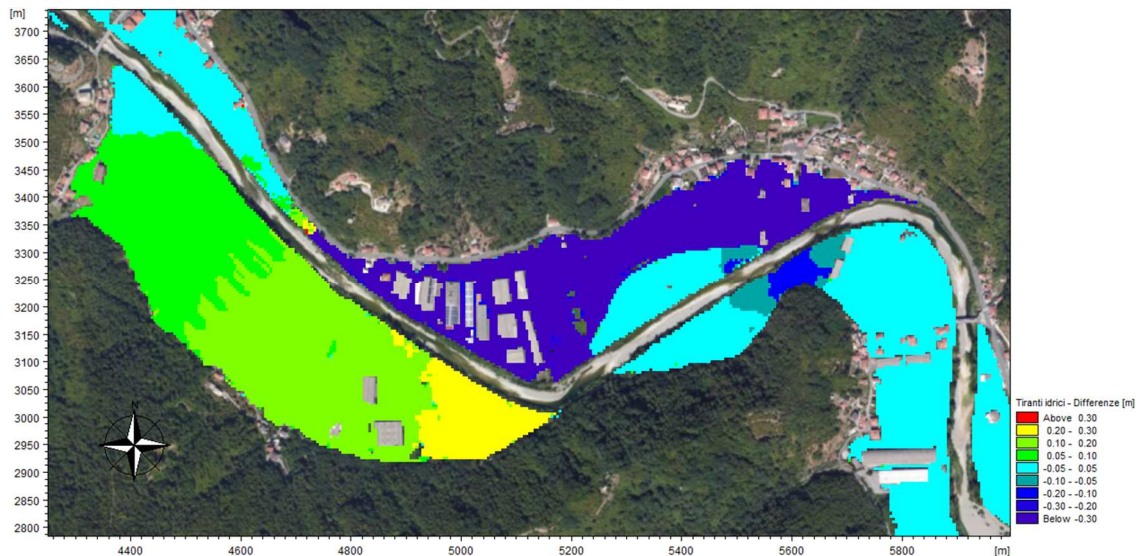


Figura 7.8 Comune di San Colombano Certenoli – Differenze di tiranti idrici degli allagamenti tra lo scenario di sistemazione idraulica con “arginatura stretta” e la configurazione base.

## 8 Sopralluogo

In appendice alle descrizioni delle attività condotte nel presente incarico, descritte nei precedenti capitoli, risulta opportuno specificare più in dettaglio un aspetto metodologico di indubbia importanza e utilità nella conduzione dello studio citato.

Ai fini della verifica della fattibilità delle diverse ipotesi metodologiche assunte e a validazione dei risultati ottenuti è stato condotto uno specifico sopralluogo in sito nel territorio oggetto di studio. Di seguito si riportano le principali tematiche affrontate in tale sede, con la rappresentazione di alcune foto a campione scattate in tale circostanza. Risulta opportuno

inoltre specificare che, in affiancamento e ad integrazione del sopralluogo stesso, sono state svolte analisi su cartografia tridimensionale disponibile in rete, con stesse finalità.

- Trattati di corso d'acqua oggetto di ipotesi parzializzazione di sezione per la definizione delle fasce di pericolosità idraulica: nonostante tale ipotesi assuma un significato di più generale fattore di sicurezza, lo stesso è stato definito anche con attinenza a ipotesi reali di riduzione della sezione defluente. Tuttavia, risulta utile un'indagine qualitativa volta a comprendere se le ipotesi adottate possano essere realistiche e verosimili. Una delle cause più concrete di possibile riduzione di sezione, nei casi di parzializzazione distribuita e non concentrata su una singola sezione quale può essere un attraversamento, è dovuta al deposito di sedimenti che possono comportare una diminuzione della sezione utile al deflusso rispetto alle geometrie inserite in input nel modello idraulico. In sede di sopralluogo si è pertanto speditamente valutata la consistenza dell'ipotesi che i tratti oggetto di parzializzazione potessero risultare affetti da deposito di sedimenti, circostanza confermata durante il sopralluogo. Si riportano a titolo di esempio le foto di Figura 8.1 e Figura 8.2 rappresentati sezioni di corso d'acqua appartenenti ai tratti in oggetto. Fenomenologie tipiche che si sono riscontrate nei tratti di interesse riguardano, ad esempio, la presenza di tratti curvilinei del corso d'acqua in cui, nella parte interna delle sezione trasversale rispetto alla curvatura, si riscontra un evidente deposito di sedimenti, in particolare di materiale ghiaioso e ciottoli, che può conseguentemente comportare una possibile riduzione della sezione defluente. Analogamente, in prossimità di attraversamenti con pile in alveo che comportano un apprezzabile restringimento della sezione utile al deflusso, quale è a titolo di esempio il Ponte Vecchio rappresentato in foto, il rigurgito conseguentemente generato, amplificato nel caso in cui la piena raggiunge l'impalcato, genera a monte del ponte stesso un rallentamento della corrente; tale riduzione di velocità comporta un conseguente deposito di materiale e pertanto una possibile riduzione della sezione defluente che giustifica l'ipotesi di parzializzazione adottata.



Figura 8.1 Fiume Entella presso l'abitato di Carasco, in prossimità del ponte della Strada Provinciale; sullo sfondo è visibile il Ponte Vecchio.



Figura 8.2 Torrente Lavagna in corrispondenza della sezione LAV21, vista verso monte.



Figura 8.3 Esempio di edifici disposti su differenti livelli altimetrici con conseguente possibile diversa perimetrazione, nel caso in cui il solo livello sottostante sia raggiunto da allagamenti.

- Verifica della corretta rappresentazione del territorio da parte del DTM e della cartografia, ad esempio in termini di presenza degli edifici: in casi puntuali si è riscontrato il non completo aggiornamento dei tematismi citati, che pertanto non rappresentavano correttamente alcuni edifici o interventi urbanistici recentemente eseguiti, di conseguenza opportunamente inseriti nella batimetria di calcolo.
- Verifica puntuale della proposta di definizione delle fasce, sia quelle di pericolosità idraulica sia quella di riassetto fluviale, ad esempio per quanto riguarda l'inserimento o l'esclusione puntuale di edifici o porzioni di territorio.
- Verifica puntuale dei risultati delle simulazioni idrauliche, in caso di locali incertezze della congruità dei risultati ottenuti, oltre a una più generale sommaria validazione a partire da brevi interviste con abitanti del luogo in merito a eventi storici o criticità note.
- Definizione di dettaglio degli scenari di sistemazione idraulica nel Comune di San Colombano Certenoli con una valutazione di dettaglio della conformazione del territorio, degli attuali manufatti spondali, della destinazione d'uso delle aree di interesse e di eventuali ulteriori aspetti di dettaglio utili alla definizione degli scenari proposti.

Il complesso di approfondimenti svolti in tale circostanza ha pertanto permesso di validare e finalizzare le analisi svolte.

## 9 Conclusioni

L'approfondimento idraulico condotto nel presente studio ha riguardato la parte terminale del torrente Lavagna, a partire dal ponte della SP58 in località Pian dei Manzi nel Comune di Coreglia Ligure, e il tratto di fiume Entella compreso tra le confluenze con i torrenti Sturla e Graveglia, per i quali è stata svolta un'analisi idraulica di dettaglio suddivisa in molteplici attività.

Primo obiettivo perseguito nell'incarico è stata la rappresentazione di eventi di piena con tempo di ritorno 50, 200 e 500 anni con codice di calcolo integrato MIKE FLOOD, che permette di accoppiare dinamicamente la rappresentazione dell'alveo con modello monodimensionale e delle aree inondabili con modello bidimensionale. Mediante tale metodologia sono pertanto state determinate, per gli eventi citati, le principali caratteristiche idrodinamiche della corrente in alveo e degli allagamenti, ad esempio in termini di tiranti idrici e velocità di scorrimento.

Per il raggiungimento dell'obiettivo sopradescritto sono state svolte una serie di attività preliminari, sia di implementazione dei modelli, da cui la necessità ad esempio di acquisire una serie di tematismi e dati pregressi quali il DTM del dominio di studio e la geometria delle sezioni trasversali, sia di definizione degli idrogrammi di piena, per i quali è stata svolta un'analisi idrologica finalizzata alla definizione di idrogrammi tali da rispettare i requisiti definiti dal Piano di Bacino, in primo luogo in termini di massime portate di piena per assegnato tempo di ritorno.

A conclusione dell'analisi idraulica è stato perseguito il secondo obiettivo, corrispondente alla definizione delle fasce di inondabilità. A tal fine è stato riscontrato come in una serie di tratti di corso d'acqua i risultati non presentassero, coerentemente con i criteri definiti dalla competente Autorità di Bacino, l'adeguato margine di sicurezza per la definizione delle fasce inondabili, da cui è stato introdotto un criterio di parzializzazione delle sezioni tale da superare, per i risultati successivamente ottenuti, il margine di incertezza specificato. Sono pertanto stati identificati due tratti del corso d'acqua in cui, in modo continuo, sono state modificate in modo generalizzato le sezioni ipotizzando un innalzamento di un metro del livello di fondo, corrispondente mediamente a una riduzione del 10% dell'area defluente. A partire dalle nuove geometrie così definite sono state rieseguite le simulazioni idrauliche, a seguito delle quali è stata definita una proposta di nuova perimetrazione delle fasce di inondabilità, redatta nell'ottica dell'aggiornamento di quelle attualmente vigenti.

Terzo obiettivo dell'approfondimento idraulico è stata la definizione di una proposta di perimetrazione della fascia di riassetto fluviale, per la quale è stato definito un criterio metodologico prevalentemente basato sui risultati delle simulazioni idrauliche, a discapito di valutazioni di natura urbanistica, legando la definizione della fascia di riassetto fluviale alla variabile idrodinamica della densità di flusso degli allagamenti dell'evento duecentennale. Tale variabile è equivalente a una portata di scorrimento superficiale per unità di cella, per la quale è stato definito un opportuno valore di soglia al fine di identificare le aree a prevalente deflusso.

Infine ultimo obiettivo del presente incarico è stata la definizione di alcune ipotesi di intervento di sistemazione idraulica nel territorio del Comune di San Colombano Certenoli, al fine di mettere in sicurezza alcune aree in sponda sinistra soggette ad elevata pericolosità. La definizione e successiva valutazione degli esiti delle ipotesi di intervento è stata condotta sia in termini di valutazione dell'estensione e della tipologia, quale destinazione d'uso, delle aree da mettere in sicurezza, sia dell'impatto che tali interventi avrebbero sul territorio circostante sia come incremento degli allagamenti sia come alterazione dell'onda di piena in alveo, in termini di livelli e portate.

Infine risulta opportuno citare che tra gli elaborati di consegna del presente incarico, oltre alla Relazione Tecnica e relativi Allegati, vi sono i risultati delle simulazioni in forma di differenti tematismi e gli stessi modelli idraulici implementati, che resteranno pertanto a disposizione dei funzionari dell'Autorità di Bacino per ogni successiva attività inerente i corsi d'acqua oggetto di studio.

## ALLEGATI





ALLEGATO A  
Tabelle delle grandezze  
idrodinamiche in alveo

Di seguito si riportano le tabelle relative ai valori idrodinamici in alveo per tutti i tratti considerati. Le tabelle riportano le seguenti informazioni:

- Progressiva: valore di posizionamento della sezione trasversale, come distanza progressiva in [m] a partire dall'inizio del tratto;
- ID sezione: identificativo della sezione trasversale;
- Quota fondo: minimo livello altimetrico [m s.m.] delle quote d'alveo;
- Y: tirante idrico in [m];
- PL: livello del pelo libero in [m s.m.];
- V: velocità della corrente in [m/s];
- Fr: numero di Froude;
- H: valore del carico totale in [m s.m.].

#### Tempo di ritorno 50 anni

PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H
[m]	[-]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m/s]	[-]	[m s.m.]
0.0	LAV62	55.48	5.01	60.49	4.30	0.61	61.43
96.5	LAV61	55.00	5.11	60.11	5.06	0.71	61.41
322.9	LAV60	53.00	5.77	58.77	5.60	0.74	60.37
493.2	LAV59	53.50	4.22	57.72	4.71	0.73	58.85
709.5	LAV58	51.30	5.15	56.45	4.83	0.68	57.64
962.2	LAV57	50.20	5.50	55.70	4.09	0.56	56.55
1014.6	LAV56_m_PT08	50.48	5.05	55.53	4.27	0.61	56.46
1024.1	LAV56_v_PT08	50.47	3.91	54.38	5.82	0.94	56.11
1066.4	LAV55	49.85	4.22	54.07	4.78	0.74	55.23
1264.5	LAV54	49.05	4.34	53.39	4.66	0.71	54.50
1500.2	LAV53_m_PT07	48.86	3.67	52.53	4.96	0.83	53.78
1503.2	LAV53_v_PT07	48.85	3.61	52.46	5.07	0.85	53.77
1659.0	LAV52	47.10	4.44	51.54	3.60	0.55	52.20
1842.0	LAV51a	45.74	5.47	51.21	3.18	0.43	51.73
2125.7	LAV51	44.61	6.05	50.66	3.49	0.45	51.28
2306.1	LAV50_m_PT06	44.76	5.19	49.95	5.01	0.70	51.23
2311.1	LAV50_v_PT06	44.75	5.10	49.85	5.12	0.72	51.19
2590.9	LAV47	43.37	5.30	48.67	4.62	0.64	49.76
2825.1	LAV46	40.85	7.27	48.12	3.64	0.43	48.80
2918.6	LAV45	42.20	5.56	47.76	4.45	0.60	48.77
3073.8	LAV44	41.89	5.41	47.30	4.53	0.62	48.35
3220.3	LAV43	41.63	5.42	47.05	3.99	0.55	47.86
3384.7	LAV42	41.48	4.99	46.47	4.63	0.66	47.56
3444.1	LAV41_m_PT05	40.99	5.56	46.55	3.44	0.47	47.15
3451.1	LAV41_v_PT05	40.98	5.09	46.07	3.90	0.55	46.85
3597.6	LAV40	40.50	4.91	45.41	5.19	0.75	46.78
3827.9	LAV39_m_briglia	40.50	4.34	44.84	3.64	0.56	45.52
3828.9	LAV39_v_briglia	39.25	5.12	44.37	3.89	0.55	45.14
3928.7	LAV37	39.80	4.13	43.93	4.15	0.65	44.81
4111.4	LAV36	38.42	4.74	43.16	4.43	0.65	44.16
4369.1	LAV35	36.75	5.72	42.47	3.99	0.53	43.28

PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H
[m]	[-]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m/s]	[-]	[m s.m.]
4568.8	LAV34	36.61	5.45	42.06	3.44	0.47	42.66
4757.1	LAV33_m_PT04	35.80	6.11	41.91	3.19	0.41	42.43
4759.1	LAV33_v_PT04	35.79	4.99	40.78	4.17	0.60	41.67
4970.9	LAV32	35.23	5.11	40.34	3.72	0.53	41.05
5106.6	LAV31	34.00	6.17	40.17	3.16	0.41	40.68
5392.2	LAV30	33.25	6.24	39.49	3.83	0.49	40.24
5655.5	LAV29	31.25	7.37	38.62	4.58	0.54	39.69
5898.6	LAV28	32.50	5.14	37.64	6.23	0.88	39.62
6026.7	LAV27	31.90	5.51	37.41	3.50	0.48	38.03
6251.7	LAV26_m_PT03	31.00	5.99	36.99	4.06	0.53	37.83
6260.7	LAV26_v_PT03	30.99	5.61	36.60	4.43	0.60	37.60
6400.8	LAV25	30.35	6.00	36.35	3.84	0.50	37.10
6601.7	LAV24	30.00	5.89	35.89	4.05	0.53	36.73
6803.1	LAV23	29.50	5.53	35.03	5.17	0.70	36.39
7067.2	LAV22	29.00	5.12	34.12	4.90	0.69	35.34
7317.6	LAV21	28.20	5.50	33.70	3.42	0.47	34.30
7645.2	LAV20	27.10	6.06	33.16	4.04	0.52	33.99
7801.0	LAV19	26.25	6.51	32.76	4.53	0.57	33.81
7959.0	LAV18	26.37	5.98	32.35	4.37	0.57	33.32
8122.4	LAV17	26.07	5.61	31.68	5.26	0.71	33.09
8301.6	LAV16_m_PT02	25.06	6.13	31.19	4.05	0.52	32.03
8307.6	LAV16_v_PT02	25.05	5.43	30.48	4.32	0.59	31.43
8457.5	LAV15	24.35	5.89	30.24	3.72	0.49	30.95
8597.5	LAV14	24.94	4.87	29.81	4.29	0.62	30.75
8852.8	LAV13	23.08	6.30	29.38	2.00	0.25	29.58
9133.3	LAV12	23.41	5.56	28.97	3.08	0.42	29.45
9313.5	LAV11	22.37	5.93	28.30	4.07	0.53	29.14
9467.1	LAV10	21.95	6.34	28.29	3.21	0.41	28.82
9551.0	LAV09	21.26	6.52	27.78	4.42	0.55	28.78
9617.3	LAV08	21.00	7.10	28.10	3.05	0.37	28.57
9693.7	LAV07	20.80	6.91	27.71	4.05	0.49	28.55
9765.3	LAV06	20.27	7.40	27.67	3.84	0.45	28.42
9909.1	LAV05	20.71	6.52	27.23	4.81	0.60	28.41
10050.2	LAV04	20.36	6.39	26.75	4.61	0.58	27.83
10196.8	LAV03	20.27	6.11	26.38	5.18	0.67	27.75
10343.8	LAV02_m_PT01	19.93	6.32	26.25	4.75	0.60	27.40
10349.8	LAV02_v_PT01	19.92	6.26	26.18	4.87	0.62	27.39
10446.1	LAV01	20.04	5.90	25.94	5.25	0.69	27.34
10512.3	160	19.80	6.14	25.94	3.57	0.46	26.59
10559.6	159	19.60	6.06	25.66	4.23	0.55	26.57
10602.7	158	19.58	6.05	25.63	4.12	0.53	26.50
10653.3	157	19.43	5.88	25.31	4.79	0.63	26.48
10684.9	156	19.42	5.72	25.14	5.02	0.67	26.42
10724.9	155	19.35	5.58	24.93	5.31	0.72	26.37
10796.2	154	18.88	5.78	24.66	4.39	0.58	25.64
10861.0	153	18.95	5.39	24.34	5.01	0.69	25.62
10928.1	152	18.75	5.65	24.40	3.90	0.52	25.18
11021.5	151	18.55	6.03	24.58	2.49	0.32	24.90
11142.1	150	18.34	6.23	24.57	2.21	0.28	24.82
11217.6	149	18.31	5.93	24.24	3.24	0.42	24.78
11337.1	148	18.25	6.04	24.29	2.46	0.32	24.60
11444.5	147	17.38	6.56	23.94	3.52	0.44	24.57

PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H
[m]	[-]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m/s]	[-]	[m s.m.]
11550.3	146_m_P.Vecchio	17.66	6.13	23.79	3.49	0.45	24.41
11561.5	144_v_P.Vecchio	17.41	4.11	21.52	5.37	0.85	22.99
11569.5	143.8	16.93	4.57	21.50	5.36	0.80	22.96
11578.0	143.3	15.87	5.76	21.63	3.75	0.50	22.35
11673.8	143	14.58	6.76	21.34	4.20	0.52	22.24
11786.2	142	14.60	6.49	21.09	4.24	0.53	22.01
11901.3	141	14.05	6.90	20.95	3.93	0.48	21.74
12018.5	140	14.46	6.27	20.73	4.02	0.51	21.55
12095.1	139.5	14.07	6.49	20.56	4.01	0.50	21.38
12117.3	139_m_P.SP	12.15	8.72	20.87	2.78	0.30	21.26
12138.0	137_v_P.SP	12.97	7.66	20.63	3.46	0.40	21.24
12172.1	136	14.21	6.19	20.40	3.95	0.51	21.20
12225.8	135	14.17	6.08	20.25	4.10	0.53	21.11
12277.5	134	14.07	6.09	20.16	4.05	0.52	21.00
12329.8	133	13.91	6.17	20.08	3.95	0.51	20.88
12381.7	132	13.53	6.45	19.98	3.99	0.50	20.79
12433.3	131	13.34	6.46	19.80	4.32	0.54	20.75
12483.9	130	13.10	6.51	19.61	4.64	0.58	20.71
12533.8	129	13.11	6.25	19.36	5.02	0.64	20.64
12588.7	128	12.82	6.46	19.28	4.85	0.61	20.48
12636.8	127	12.67	6.45	19.12	4.96	0.62	20.37
12678.8	126	12.66	6.34	19.00	4.95	0.63	20.25
12723.3	125	12.58	6.38	18.96	4.27	0.54	19.89
12768.0	124	12.33	6.83	19.16	3.09	0.38	19.65
12815.1	123	12.32	6.80	19.12	3.11	0.38	19.61
12854.2	122	12.30	6.55	18.85	3.78	0.47	19.58
12900.7	121	11.92	6.67	18.59	4.31	0.53	19.54
12936.4	120	11.86	6.63	18.49	4.36	0.54	19.46
12971.9	119	11.93	6.34	18.27	4.82	0.61	19.45
13023.0	118	11.95	6.12	18.07	5.17	0.67	19.43
13075.5	117	11.90	6.17	18.07	4.45	0.57	19.08
13151.3	116	11.85	6.30	18.15	4.04	0.51	18.98
13222.8	115	11.90	5.85	17.75	4.84	0.64	18.94
13273.9	114	11.70	5.99	17.69	4.49	0.59	18.72
13324.1	113	11.40	6.35	17.75	3.97	0.50	18.55
13376.5	112	10.95	6.75	17.70	3.85	0.47	18.46
13428.1	111	10.90	6.69	17.59	3.97	0.49	18.39
13478.3	110	10.85	6.70	17.55	3.81	0.47	18.29
13597.5	108	10.80	6.32	17.12	4.77	0.61	18.28
13689.4	107	10.80	6.12	16.92	4.64	0.60	18.02
13874.1	106_m_P.Birago	8.64	7.64	16.28	5.16	0.60	17.64
13889.4	104_v_P.Birago	8.63	7.49	16.12	5.30	0.62	17.55
14039.9	103	9.65	5.95	15.60	5.41	0.71	17.09
14172.8	102	9.60	5.78	15.38	4.53	0.60	16.43
14299.3	101	10.15	4.87	15.02	5.02	0.73	16.30
14400.0	confl.Grav.	9.39	5.25	14.64	5.05	0.70	15.94
14564.0	89	8.15	5.91	14.06	4.84	0.64	15.25
14648.9	88	8.00	5.69	13.69	5.43	0.73	15.19
14704.7	87_m_Pass.Rivarola	7.09	6.64	13.73	4.07	0.50	14.57
14709.4	85_v_Pass.Rivarola	7.08	5.92	13.00	4.76	0.62	14.15
14769.9	84	7.10	5.64	12.74	5.11	0.69	14.07

### Tempo di ritorno 200 anni

PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H
[m]	[-]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m/s]	[-]	[m s.m.]
0.0	LAV62	55.48	6.56	62.04	5.03	0.63	63.33
96.5	LAV61	55.00	6.66	61.66	5.66	0.70	63.29
322.9	LAV60	53.00	7.38	60.38	6.67	0.78	62.65
493.2	LAV59	53.50	5.83	59.33	4.89	0.65	60.55
709.5	LAV58	51.30	7.05	58.35	5.57	0.67	59.93
962.2	LAV57	50.20	7.44	57.64	5.05	0.59	58.94
1014.6	LAV56_m_PT08	50.48	7.02	57.50	5.06	0.61	58.80
1024.1	LAV56_v_PT08	50.47	5.37	55.84	6.99	0.96	58.33
1066.4	LAV55	49.85	5.70	55.55	5.90	0.79	57.32
1264.5	LAV54	49.05	5.81	54.86	5.77	0.76	56.56
1500.2	LAV53_m_PT07	48.86	5.21	54.07	6.41	0.90	56.16
1503.2	LAV53_v_PT07	48.85	5.10	53.95	6.56	0.93	56.14
1659.0	LAV52	47.10	6.18	53.28	3.98	0.51	54.09
1842.0	LAV51a	45.74	7.30	53.04	3.71	0.44	53.74
2125.7	LAV51	44.61	7.82	52.43	4.68	0.53	53.55
2306.1	LAV50_m_PT06	44.76	6.96	51.72	5.95	0.72	53.52
2311.1	LAV50_v_PT06	44.75	6.77	51.52	6.14	0.75	53.44
2590.9	LAV47	43.37	6.91	50.28	5.81	0.71	52.00
2825.1	LAV46	40.85	8.70	49.55	4.91	0.53	50.78
2918.6	LAV45	42.20	7.01	49.21	5.49	0.66	50.75
3073.8	LAV44	41.89	6.81	48.70	5.53	0.68	50.26
3220.3	LAV43	41.63	6.96	48.59	4.49	0.54	49.62
3384.7	LAV42	41.48	6.36	47.84	5.87	0.74	49.60
3444.1	LAV41_m_PT05	40.99	7.01	48.00	4.06	0.49	48.84
3451.1	LAV41_v_PT05	40.98	5.96	46.94	5.14	0.67	48.29
3597.6	LAV40	40.50	5.80	46.30	6.15	0.82	48.23
3827.9	LAV39_m_briglia	40.50	4.97	45.47	3.64	0.52	46.15
3828.9	LAV39_v_briglia	39.25	5.88	45.13	3.89	0.51	45.90
3928.7	LAV37	39.80	4.98	44.78	4.18	0.60	45.67
4111.4	LAV36	38.42	5.58	44.00	5.04	0.68	45.29
4369.1	LAV35	36.75	6.41	43.17	4.81	0.61	44.35
4568.8	LAV34	36.61	6.02	42.63	4.33	0.56	43.59
4757.1	LAV33_m_PT04	35.80	6.95	42.75	3.37	0.41	43.33
4759.1	LAV33_v_PT04	35.79	6.15	41.94	4.26	0.55	42.86
4970.9	LAV32	35.23	6.42	41.65	3.86	0.49	42.41
5106.6	LAV31	34.00	7.52	41.52	3.28	0.38	42.07
5392.2	LAV30	33.25	7.82	41.07	3.98	0.45	41.88
5655.5	LAV29	31.25	8.76	40.01	5.12	0.55	41.35
5898.6	LAV28	32.50	6.73	39.23	6.24	0.77	41.21
6026.7	LAV27	31.90	7.47	39.37	3.51	0.41	40.00
6251.7	LAV26_m_PT03	31.00	7.59	38.59	4.67	0.54	39.70
6260.7	LAV26_v_PT03	30.99	6.41	37.40	5.83	0.74	39.13
6400.8	LAV25	30.35	6.67	37.02	4.88	0.60	38.23
6601.7	LAV24	30.00	6.70	36.70	4.56	0.56	37.76
6803.1	LAV23	29.50	6.60	36.10	5.56	0.69	37.68
7067.2	LAV22	29.00	6.41	35.41	5.27	0.66	36.83
7317.6	LAV21	28.20	6.65	34.85	4.19	0.52	35.74
7645.2	LAV20	27.10	7.41	34.51	4.34	0.51	35.47
7801.0	LAV19	26.25	8.04	34.29	4.56	0.51	35.35
7959.0	LAV18	26.37	7.47	33.84	4.73	0.55	34.98
8122.4	LAV17	26.07	7.43	33.50	5.30	0.62	34.93

PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H
[m]	[-]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m/s]	[-]	[m s.m.]
8301.6	LAV16_m_PT02	25.06	8.27	33.33	4.13	0.46	34.20
8307.6	LAV16_v_PT02	25.05	7.03	32.08	4.83	0.58	33.27
8457.5	LAV15	24.35	7.45	31.80	4.46	0.52	32.81
8597.5	LAV14	24.94	6.44	31.38	4.77	0.60	32.54
8852.8	LAV13	23.08	8.28	31.36	2.52	0.28	31.68
9133.3	LAV12	23.41	7.74	31.15	3.19	0.37	31.67
9313.5	LAV11	22.37	8.08	30.45	4.13	0.46	31.32
9467.1	LAV10	21.95	8.41	30.36	3.73	0.41	31.07
9551.0	LAV09	21.26	8.37	29.63	5.25	0.58	31.03
9617.3	LAV08	21.00	9.04	30.04	3.72	0.40	30.75
9693.7	LAV07	20.80	8.81	29.61	4.71	0.51	30.74
9765.3	LAV06	20.27	9.26	29.53	4.83	0.51	30.72
9909.1	LAV05	20.71	8.35	29.06	5.67	0.63	30.70
10050.2	LAV04	20.36	8.29	28.65	5.58	0.62	30.24
10196.8	LAV03	20.27	8.02	28.29	6.06	0.68	30.16
10343.8	LAV02_m_PT01	19.93	8.37	28.30	5.91	0.65	30.08
10349.8	LAV02_v_PT01	19.92	8.28	28.20	5.99	0.66	30.03
10446.1	LAV01	20.04	7.75	27.79	6.59	0.76	30.00
10512.3	160	19.80	8.15	27.95	4.57	0.51	29.01
10559.6	159	19.60	8.05	27.65	5.07	0.57	28.96
10602.7	158	19.58	8.00	27.58	5.06	0.57	28.88
10653.3	157	19.43	7.73	27.16	5.79	0.66	28.87
10684.9	156	19.42	7.58	27.00	6.03	0.70	28.85
10724.9	155	19.35	7.48	26.83	6.25	0.73	28.82
10796.2	154	18.88	7.59	26.47	5.57	0.65	28.05
10861.0	153	18.95	7.16	26.11	6.05	0.72	27.98
10928.1	152	18.75	7.42	26.17	5.01	0.59	27.45
11021.5	151	18.55	7.93	26.48	3.21	0.36	27.01
11142.1	150	18.34	8.24	26.58	2.71	0.30	26.95
11217.6	149	18.31	7.98	26.29	3.50	0.40	26.91
11337.1	148	18.25	8.17	26.42	2.86	0.32	26.84
11444.5	147	17.38	8.65	26.03	3.95	0.43	26.83
11550.3	146_m_P.Vecchio	17.66	8.30	25.96	3.66	0.41	26.64
11561.5	144_v_P.Vecchio	17.41	6.20	23.61	5.58	0.72	25.20
11569.5	143.8	16.93	6.66	23.59	5.48	0.68	25.12
11578.0	143.3	15.87	7.90	23.77	4.23	0.48	24.68
11673.8	143	14.58	8.65	23.23	5.26	0.57	24.64
11786.2	142	14.60	8.35	22.95	5.35	0.59	24.41
11901.3	141	14.05	8.81	22.86	4.88	0.52	24.07
12018.5	140	14.46	8.24	22.70	4.86	0.54	23.90
12095.1	139.5	14.07	8.30	22.38	5.12	0.57	23.72
12117.3	139_m_P.SP	12.15	10.67	22.82	3.40	0.33	23.41
12138.0	137_v_P.SP	12.97	9.39	22.36	4.51	0.47	23.40
12172.1	136	14.21	7.86	22.07	5.05	0.58	23.37
12225.8	135	14.17	7.76	21.93	5.23	0.60	23.32
12277.5	134	14.07	7.77	21.84	5.13	0.59	23.18
12329.8	133	13.91	7.83	21.74	5.13	0.59	23.08
12381.7	132	13.53	8.14	21.67	5.12	0.57	23.01
12433.3	131	13.34	8.18	21.52	5.31	0.59	22.96
12483.9	130	13.10	8.30	21.40	5.48	0.61	22.93
12533.8	129	13.11	8.05	21.16	5.81	0.65	22.88
12588.7	128	12.82	8.27	21.09	5.76	0.64	22.78

PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H
[m]	[-]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m/s]	[-]	[m s.m.]
12636.8	127	12.67	8.30	20.97	5.76	0.64	22.66
12678.8	126	12.66	8.29	20.95	5.59	0.62	22.54
12723.3	125	12.58	8.28	20.86	5.14	0.57	22.21
12768.0	124	12.33	8.85	21.18	3.89	0.42	21.95
12815.1	123	12.32	8.85	21.17	3.81	0.41	21.91
12854.2	122	12.30	8.59	20.89	4.31	0.47	21.84
12900.7	121	11.92	8.62	20.54	4.68	0.51	21.66
12936.4	120	11.86	8.54	20.40	4.79	0.52	21.57
12971.9	119	11.93	8.22	20.15	5.23	0.58	21.54
13023.0	118	11.95	7.95	19.90	5.64	0.64	21.52
13075.5	117	11.90	7.97	19.87	5.61	0.63	21.47
13151.3	116	11.85	8.09	19.94	4.93	0.55	21.18
13222.8	115	11.90	7.69	19.59	5.54	0.64	21.15
13273.9	114	11.70	7.76	19.46	5.23	0.60	20.85
13324.1	113	11.40	8.11	19.51	5.11	0.57	20.84
13376.5	112	10.95	8.52	19.47	5.09	0.56	20.79
13428.1	111	10.90	8.48	19.38	5.20	0.57	20.76
13478.3	110	10.85	8.54	19.39	4.94	0.54	20.63
13597.5	108	10.80	8.11	18.91	5.67	0.64	20.55
13689.4	107	10.80	8.04	18.84	5.53	0.62	20.40
13874.1	106_m_P.Birago	8.64	9.71	18.35	5.94	0.61	20.15
13889.4	104_v_P.Birago	8.63	9.46	18.09	6.24	0.65	20.07
14039.9	103	9.65	7.85	17.50	6.47	0.74	19.63
14172.8	102	9.60	7.75	17.35	5.73	0.66	19.02
14299.3	101	10.15	7.06	17.21	5.95	0.71	19.01
14400.0	confl.Grav.	9.39	7.71	17.10	5.45	0.63	18.61
14564.0	89	8.15	8.11	16.26	5.82	0.65	17.99
14648.9	88	8.00	7.83	15.83	6.29	0.72	17.85
14704.7	87_m_Pass.Rivarola	7.09	8.95	16.04	4.75	0.51	17.19
14709.4	85_v_Pass.Rivarola	7.08	8.02	15.10	5.45	0.61	16.61
14769.9	84	7.10	7.61	14.71	6.01	0.70	16.55

### Tempo di ritorno 500 anni

PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H
[m]	[-]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m/s]	[-]	[m s.m.]
0.0	LAV62	55.48	7.93	63.41	5.41	0.61	64.90
96.5	LAV61	55.00	8.03	63.03	5.97	0.67	64.85
322.9	LAV60	53.00	8.91	61.91	7.10	0.76	64.48
493.2	LAV59	53.50	7.44	60.94	4.89	0.57	62.16
709.5	LAV58	51.30	8.77	60.07	6.04	0.65	61.93
962.2	LAV57	50.20	9.19	59.39	5.72	0.60	61.06
1014.6	LAV56_m_PT08	50.48	8.84	59.32	5.48	0.59	60.85
1024.1	LAV56_v_PT08	50.47	6.58	57.05	7.94	0.99	60.26
1066.4	LAV55	49.85	6.91	56.76	6.81	0.83	59.12
1264.5	LAV54	49.05	7.02	56.07	6.65	0.80	58.32
1500.2	LAV53_m_PT07	48.86	6.69	55.55	6.46	0.80	57.68
1503.2	LAV53_v_PT07	48.85	6.43	55.28	6.76	0.85	57.61
1659.0	LAV52	47.10	7.74	54.84	4.26	0.49	55.76
1842.0	LAV51a	45.74	8.91	54.65	4.15	0.44	55.53
2125.7	LAV51	44.61	9.31	53.92	5.24	0.55	55.32
2306.1	LAV50_m_PT06	44.76	8.48	53.24	6.29	0.69	55.26
2311.1	LAV50_v_PT06	44.75	8.09	52.84	6.62	0.74	55.07
2590.9	LAV47	43.37	8.13	51.50	6.86	0.77	53.90
2825.1	LAV46	40.85	9.68	50.53	6.26	0.64	52.53
2918.6	LAV45	42.20	8.09	50.29	6.54	0.73	52.47
3073.8	LAV44	41.89	7.99	49.88	6.40	0.72	51.97
3220.3	LAV43	41.63	8.18	49.81	5.04	0.56	51.10
3384.7	LAV42	41.48	7.47	48.95	6.35	0.74	51.01
3444.1	LAV41_m_PT05	40.99	8.11	49.10	4.67	0.52	50.21
3451.1	LAV41_v_PT05	40.98	6.66	47.64	5.87	0.73	49.40
3597.6	LAV40	40.50	6.54	47.04	6.53	0.82	49.21
3827.9	LAV39_m_briglia	40.50	5.51	46.01	4.12	0.56	46.88
3828.9	LAV39_v_briglia	39.25	6.55	45.80	3.96	0.49	46.60
3928.7	LAV37	39.80	5.72	45.52	4.32	0.58	46.47
4111.4	LAV36	38.42	6.37	44.78	5.33	0.67	46.23
4369.1	LAV35	36.75	7.19	43.94	5.24	0.62	45.34
4568.8	LAV34	36.61	6.88	43.49	4.69	0.57	44.61
4757.1	LAV33_m_PT04	35.80	7.83	43.63	3.75	0.43	44.35
4759.1	LAV33_v_PT04	35.79	7.22	43.01	4.31	0.51	43.96
4970.9	LAV32	35.23	7.57	42.80	3.88	0.45	43.57
5106.6	LAV31	34.00	8.72	42.72	3.36	0.36	43.30
5392.2	LAV30	33.25	9.10	42.35	4.05	0.43	43.19
5655.5	LAV29	31.25	9.98	41.23	5.47	0.55	42.76
5898.6	LAV28	32.50	8.02	40.52	6.25	0.70	42.51
6026.7	LAV27	31.90	8.98	40.88	3.68	0.39	41.57
6251.7	LAV26_m_PT03	31.00	8.93	39.93	5.26	0.56	41.34
6260.7	LAV26_v_PT03	30.99	7.35	38.34	6.74	0.79	40.66
6400.8	LAV25	30.35	7.53	37.88	5.56	0.65	39.46
6601.7	LAV24	30.00	7.58	37.58	5.40	0.63	39.07
6803.1	LAV23	29.50	7.71	37.21	5.63	0.65	38.83
7067.2	LAV22	29.00	7.84	36.84	5.32	0.61	38.28
7317.6	LAV21	28.20	8.14	36.34	4.49	0.50	37.37
7645.2	LAV20	27.10	9.03	36.13	4.80	0.51	37.30
7801.0	LAV19	26.25	9.72	35.97	4.82	0.49	37.15
7959.0	LAV18	26.37	9.15	35.52	5.03	0.53	36.81
8122.4	LAV17	26.07	9.12	35.19	5.33	0.56	36.64



PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H
[m]	[-]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m/s]	[-]	[m s.m.]
8301.6	LAV16_m_PT02	25.06	10.03	35.09	4.18	0.42	35.98
8307.6	LAV16_v_PT02	25.05	8.17	33.22	5.43	0.61	34.72
8457.5	LAV15	24.35	8.65	33.00	4.96	0.54	34.25
8597.5	LAV14	24.94	7.68	32.62	5.02	0.58	33.90
8852.8	LAV13	23.08	9.62	32.70	2.84	0.29	33.11
9133.3	LAV12	23.41	9.09	32.50	3.42	0.36	33.10
9313.5	LAV11	22.37	9.81	32.18	4.18	0.43	33.07
9467.1	LAV10	21.95	9.92	31.87	3.86	0.39	32.63
9551.0	LAV09	21.26	9.62	30.88	5.67	0.58	32.52
9617.3	LAV08	21.00	10.28	31.28	4.54	0.45	32.33
9693.7	LAV07	20.80	10.05	30.85	5.28	0.53	32.27
9765.3	LAV06	20.27	10.49	30.76	5.18	0.51	32.13
9909.1	LAV05	20.71	9.56	30.27	6.00	0.62	32.10
10050.2	LAV04	20.36	9.58	29.94	6.16	0.64	31.87
10196.8	LAV03	20.27	9.11	29.38	6.54	0.69	31.56
10343.8	LAV02_m_PT01	19.93	9.17	29.10	6.85	0.72	31.49
10349.8	LAV02_v_PT01	19.92	9.03	28.95	6.94	0.74	31.40
10446.1	LAV01	20.04	8.67	28.71	7.16	0.78	31.32
10512.3	160	19.80	9.03	28.83	5.14	0.55	30.18
10559.6	159	19.60	8.88	28.48	5.73	0.61	30.15
10602.7	158	19.58	8.85	28.43	5.66	0.61	30.06
10653.3	157	19.43	8.58	28.01	6.22	0.68	29.98
10684.9	156	19.42	8.45	27.87	6.38	0.70	29.94
10724.9	155	19.35	8.34	27.69	6.52	0.72	29.86
10796.2	154	18.88	8.51	27.39	6.11	0.67	29.29
10861.0	153	18.95	8.03	26.98	6.53	0.74	29.15
10928.1	152	18.75	8.27	27.02	5.62	0.62	28.63
11021.5	151	18.55	8.66	27.21	4.05	0.44	28.05
11142.1	150	18.34	9.20	27.54	3.03	0.32	28.01
11217.6	149	18.31	8.88	27.19	3.83	0.41	27.94
11337.1	148	18.25	9.18	27.43	2.90	0.31	27.86
11444.5	147	17.38	9.63	27.01	4.01	0.41	27.83
11550.3	146_m_P.Vecchio	17.66	9.42	27.08	3.70	0.38	27.78
11561.5	144_v_P.Vecchio	17.41	7.41	24.82	5.62	0.66	26.43
11569.5	143.8	16.93	7.79	24.72	5.49	0.63	26.26
11578.0	143.3	15.87	9.03	24.90	4.41	0.47	25.89
11673.8	143	14.58	9.68	24.26	5.56	0.57	25.84
11786.2	142	14.60	9.48	24.08	5.54	0.57	25.64
11901.3	141	14.05	9.97	24.02	5.13	0.52	25.36
12018.5	140	14.46	9.43	23.89	5.00	0.52	25.16
12095.1	139.5	14.07	9.37	23.44	5.63	0.59	25.06
12117.3	139_m_P.SP	12.15	11.81	23.96	3.52	0.33	24.59
12138.0	137_v_P.SP	12.97	10.25	23.22	4.98	0.50	24.48
12172.1	136	14.21	8.69	22.90	5.51	0.60	24.45
12225.8	135	14.17	8.63	22.80	5.62	0.61	24.41
12277.5	134	14.07	8.68	22.75	5.55	0.60	24.32
12329.8	133	13.91	8.75	22.66	5.56	0.60	24.24
12381.7	132	13.53	9.10	22.63	5.53	0.59	24.19
12433.3	131	13.34	9.17	22.51	5.67	0.60	24.15
12483.9	130	13.10	9.38	22.48	5.69	0.59	24.13
12533.8	129	13.11	9.15	22.26	6.02	0.64	24.11
12588.7	128	12.82	9.40	22.22	5.95	0.62	24.02

PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H
[m]	[-]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m/s]	[-]	[m s.m.]
12636.8	127	12.67	9.45	22.12	5.93	0.62	23.91
12678.8	126	12.66	9.48	22.14	5.63	0.58	23.76
12723.3	125	12.58	9.41	21.99	5.41	0.56	23.48
12768.0	124	12.33	10.05	22.38	3.94	0.40	23.17
12815.1	123	12.32	10.10	22.42	3.82	0.38	23.16
12854.2	122	12.30	9.88	22.18	4.33	0.44	23.14
12900.7	121	11.92	10.03	21.95	4.77	0.48	23.11
12936.4	120	11.86	10.01	21.87	4.83	0.49	23.06
12971.9	119	11.93	9.64	21.57	5.37	0.55	23.04
13023.0	118	11.95	9.34	21.29	5.81	0.61	23.01
13075.5	117	11.90	9.43	21.33	5.67	0.59	22.97
13151.3	116	11.85	9.51	21.36	4.98	0.52	22.62
13222.8	115	11.90	8.98	20.88	5.77	0.61	22.58
13273.9	114	11.70	9.13	20.83	5.72	0.60	22.50
13324.1	113	11.40	9.55	20.95	5.47	0.57	22.48
13376.5	112	10.95	9.98	20.93	5.28	0.53	22.35
13428.1	111	10.90	9.90	20.80	5.49	0.56	22.34
13478.3	110	10.85	10.02	20.87	5.16	0.52	22.23
13597.5	108	10.80	9.52	20.32	6.10	0.63	22.22
13689.4	107	10.80	9.58	20.38	5.66	0.58	22.01
13874.1	106_m_P.Birago	8.64	11.52	20.16	5.95	0.56	21.96
13889.4	104_v_P.Birago	8.63	11.18	19.81	6.46	0.62	21.94
14039.9	103	9.65	9.32	18.97	7.31	0.76	21.69
14172.8	102	9.60	9.22	18.82	6.57	0.69	21.02
14299.3	101	10.15	8.52	18.67	6.46	0.71	20.80
14400.0	confl.Grav.	9.39	9.13	18.52	5.86	0.62	20.27
14564.0	89	8.15	9.55	17.70	6.66	0.69	19.96
14648.9	88	8.00	9.18	17.18	6.99	0.74	19.67
14704.7	87_m_Pass.Rivarola	7.09	10.30	17.39	5.47	0.54	18.92
14709.4	85_v_Pass.Rivarola	7.08	9.45	16.53	6.03	0.63	18.38
14769.9	84	7.10	8.98	16.08	6.42	0.68	18.18

**Tabella di sintesi degli attraversamenti per gli eventi con tempo di ritorno 50 – 200 – 500 anni**

Struttura					TR50		TR200		TR500	
Corso d'acqua	Descrizione	SEZ	Progr.	Quota intradosso	P.L.	Franco	P.L.	Franco	P.L.	Franco
		[-]	[-]	[m s.m.]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m]
T. Lavagna	PT08	LAV_56	1024.1	58.11	55.53	2.58	57.50	0.61	59.32	-1.21
T. Lavagna	PT07	LAV_53	1500.2	55.14	52.53	2.61	54.07	1.07	55.55	-0.41
T. Lavagna	PT06	LAV_50	2308.6	52.10	49.95	2.15	51.72	0.38	53.24	-1.14
T. Lavagna	PT05	LAV_41	3451.1	47.10	46.55	0.55	48.00	-0.90	49.10	-2.00
T. Lavagna	PT04	LAV_33	4757.1	42.18	41.91	0.27	42.75	-0.57	43.63	-1.45
T. Lavagna	PT03	LAV_26	6260.7	39.50	36.99	2.51	38.59	0.91	39.93	-0.43
T. Lavagna	PT02	LAV_16	8307.6	33.03	31.19	1.84	33.33	-0.30	35.09	-2.06
T. Lavagna	PT01	LAV_02	10349.8	27.42	26.25	1.17	28.30	-0.88	29.10	-1.68
F. Entella	Ponte Vecchio	145	11558.3	25.91	23.79	2.12	25.96	-0.05	27.08	-1.17
F. Entella	Ponte Strada Provinciale	138	12126.9	24.14	20.87	3.27	22.82	1.32	23.96	0.18
F. Entella	Ponte di Birago	105	13881.1	18.36	16.28	2.08	18.35	0.01	20.16	-1.80
F. Entella	Passerella pedonale di Rivarola	86	14708.7	15.20	13.73	1.47	16.04	-0.84	17.39	-2.19

### Scenari di sistemazione nel territorio di San Colombano – Ipotesi di arginatura larga e stretta

PROGR.	ID SEZIONE	Quota Fondo	Scenario arginatura larga					Scenario arginatura stretta				
			Y	PL	V	Fr	H	Y	PL	V	Fr	H
			[m]	[m s.m.]	[m/s]	[-]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m/s]	[-]	[m s.m.]
6026.7	LAV27	31.90	7.48	39.38	3.51	0.41	40.01	7.48	39.38	3.50	0.41	40.00
6251.7	LAV26_m_PT03	31.00	7.59	38.59	4.67	0.54	39.70	7.59	38.59	4.67	0.54	39.70
6260.7	LAV26_v_PT03	30.99	6.42	37.41	5.81	0.73	39.13	6.42	37.41	5.81	0.73	39.13
6400.8	LAV25	30.35	6.69	37.04	4.86	0.60	38.24	6.70	37.05	4.85	0.60	38.25
6601.7	LAV24	30.00	6.74	36.74	4.51	0.55	37.78	6.75	36.75	4.51	0.55	37.79
6803.1	LAV23	29.50	6.68	36.18	5.55	0.69	37.75	6.70	36.20	5.53	0.68	37.76
7067.2	LAV22	29.00	6.55	35.55	5.21	0.65	36.93	6.60	35.60	5.17	0.64	36.96
7317.6	LAV21	28.20	6.73	34.93	4.24	0.52	35.85	6.81	35.01	4.19	0.51	35.90
7645.2	LAV20	27.10	7.47	34.57	4.44	0.52	35.57	7.43	34.53	4.58	0.54	35.60
7801.0	LAV19	26.25	7.99	34.24	4.77	0.54	35.40	7.78	34.03	5.23	0.60	35.42
7959.0	LAV18	26.37	7.43	33.80	4.92	0.58	35.03	7.43	33.80	4.94	0.58	35.04
8122.4	LAV17	26.07	7.43	33.50	5.35	0.63	34.96	7.43	33.50	5.36	0.63	34.96
8301.6	LAV16_m_PT02	25.06	8.29	33.35	4.18	0.46	34.24	8.29	33.35	4.19	0.46	34.24
8307.6	LAV16_v_PT02	25.05	7.02	32.07	4.84	0.58	33.26	7.03	32.08	4.84	0.58	33.27
8457.5	LAV15	24.35	7.44	31.79	4.49	0.53	32.82	7.44	31.79	4.49	0.53	32.82

**Scenari di sistemazione nel territorio di San Colombano – Confronto tra configurazione attuale e ipotesi di progetto**

Configurazione base			Arginatura larga		Arginatura stretta	
PROGRESSIVA	ID SEZIONE	P.L. TR200	P.L. TR200	Diff. P.L.	P.L. TR200	Diff. P.L.
[m]	[-]	[m s.m.]	[m s.m.]	[m]	[m s.m.]	[m]
6026.7	LAV27	39.37	39.38	0.01	39.38	0.01
6251.7	LAV26_m_PT03	38.59	38.59	0.00	38.59	0.00
6260.7	LAV26_v_PT03	37.40	37.41	0.01	37.41	0.01
6400.8	LAV25	37.02	37.04	0.02	37.05	0.03
6601.7	LAV24	36.70	36.74	0.04	36.75	0.05
6803.1	LAV23	36.10	36.18	0.08	36.20	0.10
7067.2	LAV22	35.41	35.55	0.14	35.60	0.19
7317.6	LAV21	34.85	34.93	0.08	35.01	0.16
7645.2	LAV20	34.51	34.57	0.06	34.53	0.02
7801.0	LAV19	34.29	34.24	-0.05	34.03	-0.26
7959.0	LAV18	33.84	33.80	-0.04	33.80	-0.04
8122.4	LAV17	33.50	33.50	0.00	33.50	0.00
8301.6	LAV16_m_PT02	33.33	33.35	0.02	33.35	0.02
8307.6	LAV16_v_PT02	32.08	32.07	-0.01	32.08	0.00
8457.5	LAV15	31.80	31.79	-0.01	31.79	-0.01



ALLEGATO B  
MIKE 11 RR UHM  
Descrizione Tecnica





## MIKE 11 RR UHM – Descrizione tecnica

Il modulo UHM del codice di calcolo MIKE 11 del DHI (Danish Hydraulic Institute) simula il deflusso generato su un bacino idrografico da un singolo evento di pioggia attraverso l'utilizzo del metodo dell'idrogramma unitario.

La pioggia netta è calcolata assumendo che le perdite nel bacino per infiltrazione possano essere descritte con un valore iniziale fisso e costante, con un valore variabile proporzionale (di fatto come nel metodo razionale) o con il metodo CN del SCS (Soil Conservation Service, 1972).

La pioggia netta è quindi trasformata in deflusso nel corso d'acqua attraverso il metodo dell'idrogramma unitario. Il modulo UHM permette di utilizzare sia l'idrogramma adimensionale del SCS sia qualsiasi idrogramma definito dall'utente e memorizzato in un database, il quale gestisce anche le condizioni al contorno, ovvero le serie storiche dei dati registrati di precipitazione e di portata.

### Modello delle perdite nel bacino

Durante un evento di pioggia parte dell'acqua caduta si infiltra nel suolo. Una grossa parte di tale acqua evapora o raggiunge la rete superficiale come deflusso sotterraneo, quindi dopo un lungo lasso di tempo dalla fine dell'evento.

Quindi risulta ragionevole in questo tipo di modellazione idrologica descrivere la maggior parte dell'infiltrazione come perdita.

La quantità di pioggia che raggiunge il corso d'acqua durante un evento, cioè la precipitazione totale meno la perdita, è definita come pioggia netta.

Il modulo UHM include tre metodi differenti per il calcolo della pioggia netta e sono tutti modelli a parametri concentrati, ovvero che considerano ciascun bacino come un'unità e quindi i parametri utilizzati rappresentano valori medi sul bacino.

Tutti i metodi includono un fattore di aggiustamento areale che tiene conto dell'eventuale distribuzione non uniforme della precipitazione sul bacino.

### Perdita proporzionale (metodo razionale)

Le perdite sono assunte proporzionali al tasso di precipitazione; la pioggia netta viene espressa come:  $P_{netta} = a \cdot A_f \cdot P$

con

$P_{netta}$  = pioggia netta (mm/ora);

$a$  = coefficiente di deflusso (fra 0 e 1);

$A_f$  = fattore areale;

$P$  = precipitazione totale (mm/ora).

### Perdita fissa iniziale e perdita costante

Il metodo prevede che non si produca pioggia netta fino a quando la perdita iniziale, definita a priori dall'utente, non sia stata raggiunta. Di conseguenza la pioggia netta è generata solo quando il tasso di precipitazione è superiore a uno specifico tasso costante di perdita.

$$P_{netta} = \begin{cases} 0 & \text{per } P_{somma} < I_a + I_c \cdot dt \\ A_f \cdot P - I_c & \text{per } P_{somma} > I_a \end{cases}$$

- $P_{netta}$  = pioggia netta (mm/ora);
- $P_{somma}$  = pioggia cumulata dall'inizio dell'evento (mm);
- $I_a$  = perdita iniziale definita dall'utente (mm);
- $I_c$  = tasso costante di perdita definito dall'utente (mm/ora);
- $A_f$  = fattore areale;
- $P$  = precipitazione totale (mm/ora);
- $dt$  = passo di tempo di calcolo (ore).

In questo modo il metodo tiene conto del fatto che le perdite sono maggiori all'inizio dell'evento di precipitazione.

## Perdita con metodo SCS

Il metodo del U.S. Soil Conservation Service (SCS) è stato sviluppato nel 1972 per il calcolo delle perdite durante un evento di pioggia.

Durante un evento di pioggia, l'altezza di pioggia netta (o deflusso diretto  $P_e$ ) è sempre minore o uguale all'altezza totale di pioggia  $P$ ; perciò, quando inizia il deflusso superficiale, l'altezza d'acqua immagazzinata nel bacino,  $F_a$ , è minore o uguale alla massima ritenzione potenziale  $S$ .

Si individua una certa quantità di pioggia  $I_a$  (perdita iniziale) per la quale non si produce alcun deflusso; in tal modo il deflusso potenziale è definito come  $P-I_a$ .

L'ipotesi del metodo SCS è che il rapporto fra le quantità attuali e potenziali di perdita e precipitazione sia uguale e cioè:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

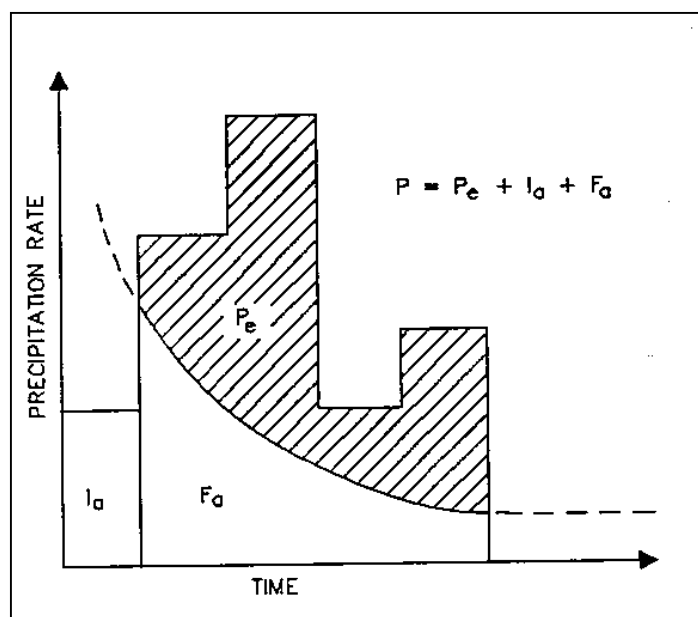
Per il principio di continuità è:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Combinando le precedenti equazioni si ottiene:

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

che è l'equazione base per il calcolo dell'altezza di pioggia netta o deflusso diretto del metodo SCS.



Variabili del metodo SCS

Sono stati utilizzati i risultati di numerosi piccoli bacini sperimentali per ottenere la relazione empirica:

$$I_a = 0.2 \cdot S$$

Ne deriva l'equazione base utilizzata nel modello UHM:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + 0.8 \cdot S}$$

Il fattore S, ritenzione massima potenziale del bacino, è calcolato attraverso il parametro adimensionale CN, utilizzando la seguente formula empirica derivata dall'analisi del fenomeno afflussi-deflussi su un gran numero di bacini:

$$S = ((100/CN) - 10) \cdot 25.4 \quad (\text{mm})$$

Il valore del parametro CN (curve number) dipende dal tipo di suolo, dall'uso del suolo e dalle condizioni precedenti di imbibizione del suolo all'inizio dell'evento di pioggia (confronta tabella 1 allegata). Varia fra 0, cioè nessun deflusso, e 100, cioè pioggia netta pari alla pioggia totale. Per bacini naturali generalmente CN varia fra 50 e 100.

Le classi di appartenenza del suolo nel metodo SCS sono:

- Suoli ad alta permeabilità, costituiti da sabbie grossolane, silt calcarei non consolidati ed omogenei.
- Suoli a moderata permeabilità, costituiti da sabbie limose ed argillose.
- Suoli a medio-bassa permeabilità, costituiti da argille e limi, con contenuti organici.
- Suoli a bassa permeabilità, costituiti da argille plastiche, con livello piezometrico permanentemente alto.

Il modello opera considerando tre diverse condizioni precedenti di imbibizione:

AMC (I) : condizioni secche, vicine all'appassimento;

AMC (II) : condizione medie, vicine alla capacità del suolo;

AMC (III): condizioni bagnate, vicine alla saturazione.

Per ciascun passo di calcolo la pioggia netta è calcolata come la differenza fra la pioggia netta cumulata fra l'inizio e la fine del passo di tempo.

Il metodo SCS è stato sviluppato sulla base di eventi di pioggia giornalieri e di conseguenza il programma considera l'inizio di un nuovo periodo di 24 ore come un nuovo evento, cioè:

- ogni 24 ore AMC è aggiornato di una classe ogni 16 mm di pioggia caduti durante il periodo di simulazione;
- CN e S sono ricalcolati in relazione al valore aggiornato di AMC, utilizzando la tabella 2 allegata;
- il quantitativo di pioggia netta  $P_e$  è resettato a zero.

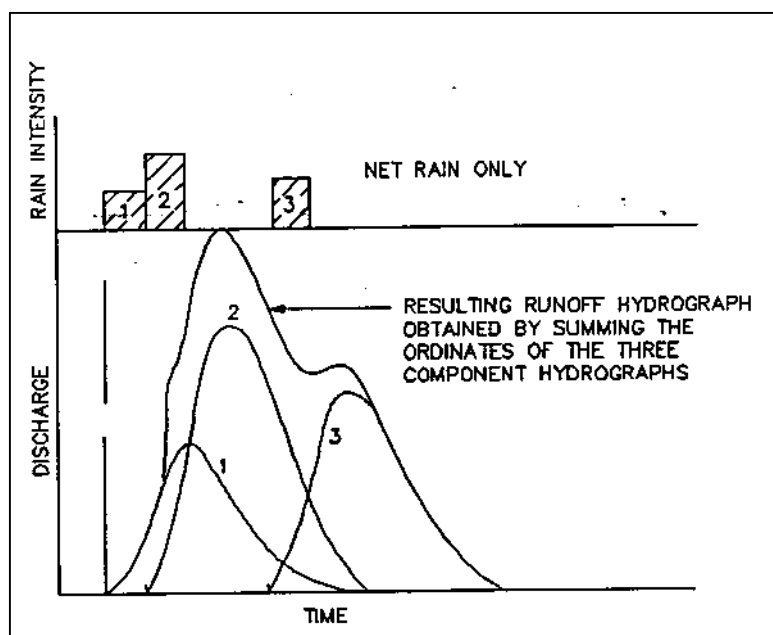
## Modello dell'idrogramma unitario

Il metodo dell'idrogramma unitario è un semplice modello lineare che può essere usato per derivare l'idrogramma risultante da un qualsiasi quantitativo di pioggia netta.

L'idrogramma unitario rappresenta la funzione di risposta impulsiva unitaria di un sistema idrologico lineare, ovvero l'idrogramma diretto di portata risultante da un'unità di pioggia netta nella durata  $t_r$ .

Le seguenti ipotesi sono la base del metodo:

- la pioggia netta ha intensità costante nella durata effettiva
- la pioggia netta è distribuita uniformemente sull'intero bacino idrografico
- il tempo di base dell'idrogramma di portata risultante da una pioggia netta di data durata è costante
- le ordinate di tutti gli idrogrammi di portata con una comune base di tempo sono direttamente proporzionali all'ammontare totale della pioggia netta rappresentata da ciascun idrogramma
- è applicato il principio di sovrapposizione degli idrogrammi risultanti da periodi in continuo o isolati di pioggia netta a intensità costante
- per un dato bacino, l'idrogramma risultante da una specifica pioggia netta riflette le condizioni invariabili del bacino.



*Principio di sovrapposizione degli idrogrammi di portata.*

In condizioni naturali le precedenti ipotesi non sono perfettamente soddisfatte. Tuttavia, in molti casi le condizioni idrologiche sono sufficientemente vicine alle ipotesi sopraddette in modo tale da generare risultati soddisfacenti.

In accordo con le sopraddette ipotesi, il modello ad ogni passo di tempo determina l'idrogramma corrispondente alla pioggia netta generata dal modello delle perdite nel bacino nello stesso passo di tempo, e aggiunge tale risposta al contributo di deflusso generato nel passo di tempo precedente.

## Tipi di idrogrammi unitari

Un idrogramma unitario è caratterizzato dalla durata della pioggia unitaria ( $t_r$ ) e dal "lag time" ( $t_l$ ) definito come la differenza di tempo fra il centro dell'evento unitario di pioggia e il picco di portata.

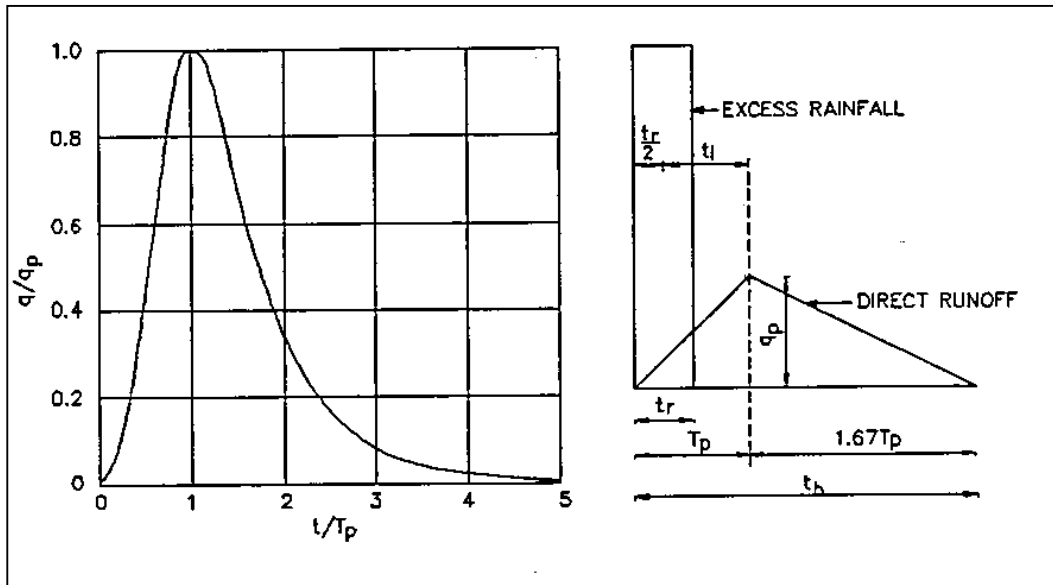
Il tempo di picco ( $T_p$ ), cioè il tempo dall'inizio dell'evento fino al momento in cui si verifica il picco di portata, può essere calcolato come:

$$T_p = t_r/2 + t_l$$

Il realtà l'idrogramma unitario per un dato bacino è unico. Tuttavia sono stati fatti molti sforzi per sviluppare un idrogramma unitario sintetico che potesse essere più e meno generalmente applicabile.

Nel presente modello sono specificati due tipi di idrogrammi unitari sintetici: l'SCS triangolare e l'SCS adimensionale.

L'utente può sceglierne uno dei due o decidere di utilizzare uno specifico idrogramma preso dal database.



*Idrogrammi sintetici del Soil Conservation Service.*

Il modello permette di inserire nel database tre tipi di idrogrammi unitari definiti dall'utente:

- un idrogramma adimensionale specificato come: portata diviso portata di picco ( $q/q_p$ ) funzione del tempo diviso tempo di picco ( $T/T_p$ )
- idrogrammi specifici per ciascun bacino, dimensionati e con le corrispondenti durate unitarie di pioggia  $t_r$
- idrogrammi unitari istantanei derivati dal metodo area-tempo.

Gli idrogrammi unitari istantanei sono automaticamente convertiti in idrogrammi, ovvero con una durata unitaria di precipitazione uguale al passo di calcolo  $dt$ , attraverso la formula:

$$q_{dt}(t) = (q(t) + q(t - dt)) / 2$$

dove:

$q_{dt}(t)$  è l'ordinata al tempo  $t$  dell'idrogramma convertito

$q(t)$  è l'ordinata al tempo  $t$  dell'idrogramma istantaneo

$t$  è tempo di calcolo attuale

$dt$  è il passo di tempo di calcolo

L'utente deve specificare il "lag time" che deve essere utilizzato nei calcoli. Il programma mette quindi automaticamente nella giusta scala l'idrogramma applicato, facendo attenzione che l'area sotto la curva risulti unitaria.

Il "lag time" può anche essere calcolato dai dati caratteristici del bacino utilizzando la formula sperimentale del SCS:

$$t_l = \frac{(L \cdot 3,28 \cdot 10^3)^{0.8} \cdot (1000/CN - 9)^{0.7}}{(1900 Y^{0.5})}$$

dove

$t_l$  = lag time (ore)

$L$  = lunghezza del bacino (km)

CN = SCS curve number

$Y$  = pendenza media del bacino (%)

Un idrogramma unitario derivato dalle curve area-tempo è considerato specifico del bacino. Di conseguenza non si può specificare un lag time arbitrario se si utilizza tale metodo. Il programma utilizza semplicemente il lag time implicitamente dato dalle curve area-tempo.

Il metodo area-tempo implementato nel modulo UHM descrive una pura traslazione dello idrogramma di pioggia netta attraverso la rete di drenaggio superficiale, descritta usando il tempo di percorrenza del canale di flusso. L'idrogramma in uscita ignora quindi gli effetti di immagazzinamento nel bacino.

## Passo di tempo di calcolo

Se si utilizza un idrogramma unitario definito dall'utente è l'utente stesso che deve verificare che il passo di tempo specificato corrisponda alla durata unitaria di pioggia dell'idrogramma unitario.

Se si utilizzano gli idrogrammi del SCS è suggerito un passo di tempo selezionato come il 22% del lag time ed in ogni caso non superiore al 27% del lag time.





ALLEGATO C  
MIKE 11 HD  
Descrizione tecnica



## PREMESSA

MIKE 11 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. 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 11 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 11 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);
- FF/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 11, 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 11 HD.

### MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico HD rappresenta il "cuore" del codice di calcolo MIKE 11 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 11 consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

### 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.

### EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE 11, 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:

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

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

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>).

### 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.

### 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).

### 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:

#### *Tipo 1. Stramazzo a larga soglia*

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

#### *Tipo 2. Relazione Q-h*

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

#### *Tipo 3. Tombino*

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". Il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso: 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.

#### *Tipo 4. Relazione Q-t*

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

#### *Tipo 5. Relazione Q = A(Zj1) . Zj2*

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari.

Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

#### *Tipo 6. Strutture mobili*

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

#### *Tipo 7. Ponti*

In MIKE 11 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).

## RESISTENZA D'ATTRITO

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

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

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

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

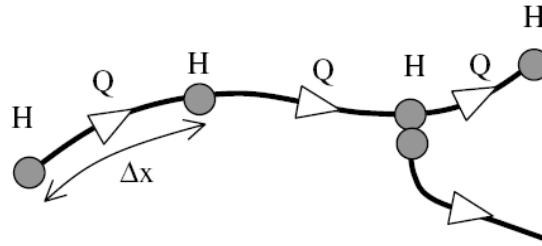
dove M è il coefficiente di Strickler, pari a  $1/n$ , essendo n il coefficiente di Manning.

## 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.

## 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.

### CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne. 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).

### DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

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

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

#### 1) Criterio di Courant

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

dove:

- Cr = numero di Courant;
- d = altezza d'acqua media;
- V = velocità media della corrente;
- g = accelerazione di gravità;

Dt, Dx = passi di calcolo.

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

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

#### 2) Criterio della velocità.

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



$$V *Dt < Dx$$

dove V è velocità media della corrente.

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

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



ALLEGATO D  
MIKE 21 HD  
Descrizione tecnica



## PREMESSA

Il MIKE 21 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 21 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 21 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 21 può essere utilizzato in modo integrato con altri codici di calcolo del DHI, in particolare:

- MIKE 11, grazie al modulo MIKE FLOOD, che consente di condurre simulazioni idrodinamiche accoppiando gli approcci 1d e 2d in modo totalmente integrato;
- MIKE URBAN CS per la simulazione di allagamenti in ambito urbano dalla rete di drenaggio.

In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

Di seguito si descrive il modulo MIKE 21 HD Classical Grid.

### Modulo Idrodinamico (HD)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, 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 21 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 21 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 21 può essere accoppiato in modo dinamico attraverso l'interfaccia MIKE FLOOD al codice monodimensionale MIKE 11, per la simulazione degli alvei e dei canali, ed al codice MIKE URBAN, 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 21 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:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

nelle quali:

$h(x,y,t)$  = profondità dell'acqua;

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

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

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

$G$  = accelerazione di gravità;

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

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

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

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

$\rho_w$  = 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:

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

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

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

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:

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

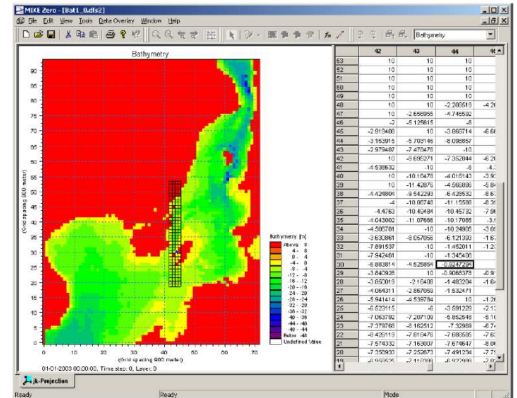
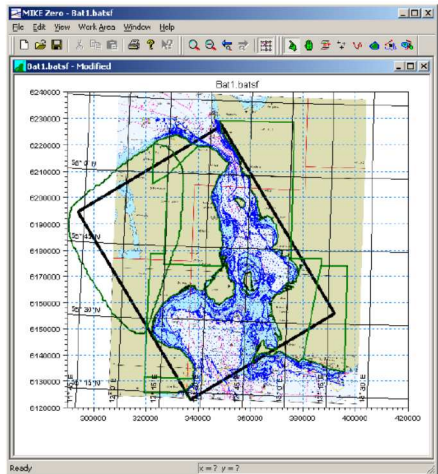
La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ( $m^3/s/m$ ) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva ( $m^3/s$ ) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

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

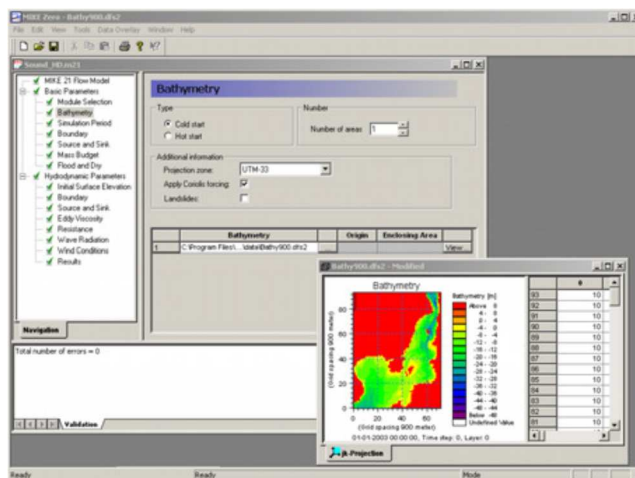
Il medesimo approccio della griglia singola viene utilizzato anche nella versione "griglia multipl-nested grid", che permette di innestare nel dominio di calcolo griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio.

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'algorithmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).



Il modello MIKE 21 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.

