

## REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA



**Comunità di Montagna del Gemonese**

**Comune di Venzone**

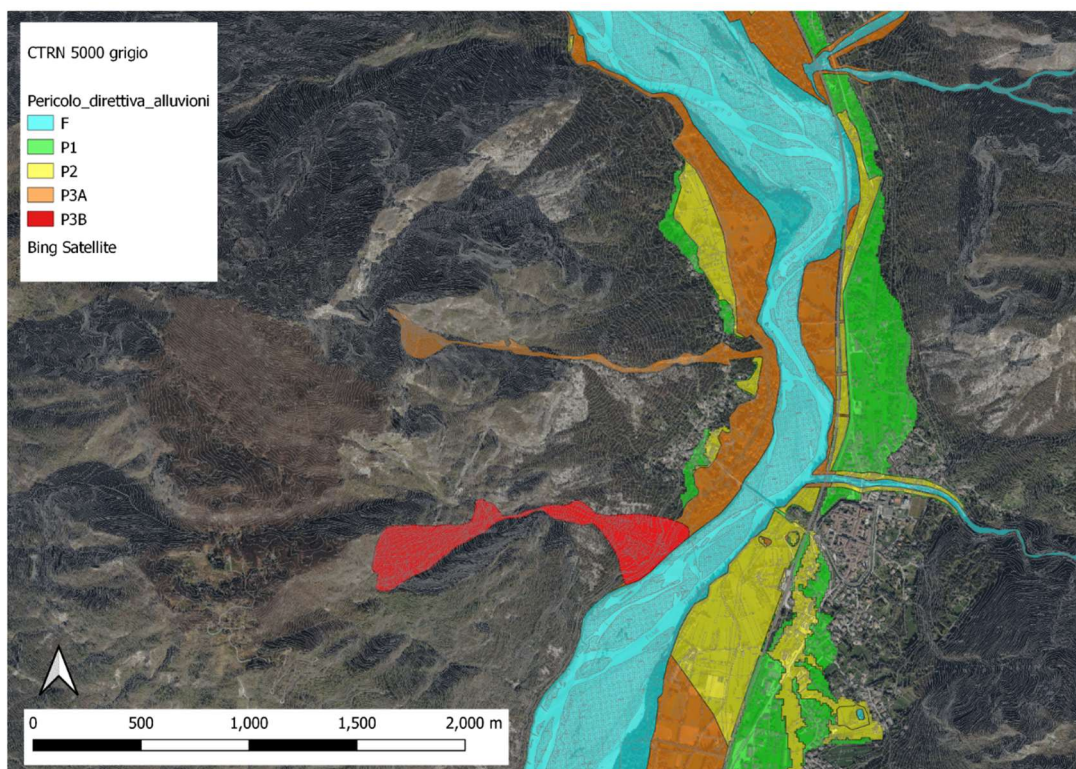
PIANO DI COMPLETAMENTO DELLA RETE CICLABILE REGIONALE DEL COMPENSIORIO DEL GEMONESE FVG1 – FVG3 – FVG6 – PISTA CICLABILE DI COLLEGAMENTO PORTIS VECCHIO – VENZONE SULL'EX SEDIME FERROVIARIO, COMPLETAMENTO FVG1.

AFFIDAMENTO INCARICO GESTIONE RISCHIO ALLUVIONI.

CUP: G41B21007910002 – CIG: B66390F591

### **Verifica di compatibilità idraulica (NTA, Allegato V PGR)**

#### **Relazione idrologico-idraulica**



Dott. ing. Matteo Nicolini

Palazzo Antonini Deciani, via Rauscedo, 5 – 33100 Udine  
[matteo.nicolini@ingpec.eu](mailto:matteo.nicolini@ingpec.eu)

*Rev.01 - 2025.07.17*





## **Indice generale**

<b>Indice generale.....</b>	<b>iii</b>
<b>Indice delle Figure.....</b>	<b>iv</b>
<b>Indice delle Tabelle .....</b>	<b>viii</b>
<b>1 Premesse.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Aspetti relativi al II° ciclo del PGRA (2021-2027): metodologia e nuove cartografie.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Considerazioni generali .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Le mappe di allagabilità, pericolosità e rischio .....</b>	<b>4</b>
2.2.1 <i>Mappe di allagabilità.....</i>	<i>5</i>
2.2.2 <i>Mappe di pericolosità per alluvioni di pianura (fluviali) .....</i>	<i>7</i>
2.2.3 <i>Mappe di pericolosità per alluvioni torrentizie (cenni) .....</i>	<i>11</i>
2.2.4 <i>Mappe di rischio .....</i>	<i>12</i>
<b>2.3 Le mappe per la zona di interesse.....</b>	<b>14</b>
<b>3 Caratteristiche dell'area oggetto di analisi.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Il bacino idrografico del Tagliamento.....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 La zona oggetto di studio.....</b>	<b>23</b>
<b>4 Sviluppo del modello idrologico.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Dati disponibili dalla piattaforma SIGMA.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2 Identificazione bacini idrografici principali per la zona di interesse in relazione alla modellazione idrodinamica .....</b>	<b>27</b>
<b>4.3 Modellazione idrologica.....</b>	<b>31</b>
4.3.1 <i>Approccio metodologico .....</i>	<i>31</i>
4.3.2 <i>Calibrazione del picco di piena e individuazione della forma di ietogramma più cautelativo .....</i>	<i>34</i>
4.3.3 <i>Campionamento per sedimentogrammi .....</i>	<i>35</i>
4.3.4 <i>Determinazione degli idrogrammi pmax e vmax .....</i>	<i>37</i>
4.3.5 <i>Sintesi dei risultati ottenuti .....</i>	<i>38</i>
<b>5 Sviluppo del modello idrodinamico di simulazione .....</b>	<b>40</b>

<b>5.1</b>	<b>Il modello basato sul software BASEMENT.....</b>	<b>40</b>
<b>5.2</b>	<b>Dominio computazionale e creazione della mesh di calcolo .....</b>	<b>43</b>
5.2.1	<i>Estensione e caratteristiche del dominio di calcolo.....</i>	43
5.2.2	<i>Caratteristiche della mesh e quotatura dei nodi .....</i>	50
<b>5.3</b>	<b>Dati e parametri in input .....</b>	<b>52</b>
5.3.1	<i>Idrogrammi di piena.....</i>	52
5.3.2	<i>Sedimentogrammi assunti nelle simulazioni .....</i>	54
5.3.3	<i>Coefficienti di scabrezza.....</i>	54
5.3.4	<i>Analisi di erodibilità delle opere.....</i>	54
5.3.5	<i>Analisi dell'eventuale ostruzione delle luci dei ponti.....</i>	55
<b>6</b>	<b>Simulazioni effettuate e risultati ottenuti.....</b>	<b>57</b>
<b>6.1</b>	<b>Premesse.....</b>	<b>57</b>
<b>6.2</b>	<b>Risultati ottenuti (SDF e SDP): mappe di involuppo delle variabili idrodinamiche.....</b>	<b>60</b>
<b>6.3</b>	<b>Risultati ottenuti (SDF e SDP): mappe differenziali delle variabili idrodinamiche.....</b>	<b>66</b>
<b>6.4</b>	<b>Risultati ottenuti (SDF e SDP3): mappe differenziali delle variabili idrodinamiche.....</b>	<b>70</b>
<b>7</b>	<b>Considerazioni conclusive e verifica di compatibilità idraulica dell'intervento.....</b>	<b>75</b>

## Indice delle Figure

Figura 1.1	Inquadramento della zona oggetto di studio, su mappa PGRA e con evidenziato il tracciato della pista ciclabile. ....	1
Figura 2.1 (a)	Analisi di rotte arginali avvenute in passato: larghezza della breccia vs. altezza dell'argine misurato a lato campagna; (b) schematizzazione della rotta arginale e relazione empirica tra larghezza della breccia e altezza dell'argine misurato a lato campagna. ....	7
Figura 2.2	Matrice di BUWAL modificata per la classificazione della pericolosità per alluvioni nel territorio di pianura.....	10
Figura 2.3	Esempio schematico di rappresentazione delle aree pericolose.....	11
Figura 2.4	Matrice di BUWAL per la classificazione della pericolosità per alluvioni torrentizie. ....	12

Figura 2.5 Tavola O36-PI del PGRA 2021-2027. ....	14
Figura 2.6 Tavola O36-RI del PGRA 2021-2027. ....	15
Figura 2.7 Tavola O36-HPH (Tr = 30 anni) del PGRA 2021-2027. ....	15
Figura 2.8 Tavola O36-MPH (Tr = 100 anni) del PGRA 2021-2027. ....	16
Figura 2.9 Tavola O36-LPH (Tr = 300 anni) del PGRA 2021-2027. ....	16
Figura 3.1 Inquadramento geografico del fiume Tagliamento. ....	17
Figura 3.2 Mappa dei 36 comuni rivieraschi sull'asta principale del fiume Tagliamento (da C. Francescato: Paesaggi vegetali, biodiversità cenotica e funzionalità fluviale, Tesi di Dottorato, Università di Trieste, 2012). ....	18
Figura 3.3 Bacino idrografico del Tagliamento. ....	19
Figura 3.4 Bacino montano del Tagliamento con i suoi principali affluenti. La linea blu tratteggiata indica i tre antichi percorsi oggi abbandonati per altrettante catture fluviali. Sono rispettivamente quello di Ampezzo (1), di Cavazzo (2) e di Cimano (3). ....	20
Figura 3.5 Andamento delle precipitazioni annuali (a sinistra) e delle temperature medie (a destra) lungo l'asta principale del fiume. ....	21
Figura 3.6 Climadiagrammi della stazione di Forni di Sopra (a sinistra) e di Tolmezzo (a destra). ....	21
Figura 3.7 Mappa del Von Zach (1805) relativa a Tagliamento e Fella a monte e a valle della confluenza, fino a Venzone. ....	23
Figura 3.8 Inquadramento generale su mappa della pericolosità del PGRA, con evidenziata la zona di interesse oggetto di verifica di compatibilità idraulica. ....	24
Figura 3.9 Evoluzione 2006-2024 dell'area di interesse in ambito di Venzone (ortofoto Google). ....	25
Figura 4.1 Idrogrammi di piena di Tagliamento e Fella per il tempo di ritorno di 100 anni (PGRA 2021-2027). ....	26
Figura 4.2 Idrogrammi di piena dai dati idrologici della piattaforma SIGMA per il tempo di ritorno di 100 anni (PGRA 2021-2027). ....	27
Figura 4.3 Interfaccia grafica del software Lekan con evidenziato il contorno e le relative caratteristiche principali del bacino idrografico del fiume Tagliamento chiuso poco a valle dell'immissione del torrente Fella. ....	28
Figura 4.4 Interfaccia grafica del software Lekan con evidenziato il contorno e le relative caratteristiche principali del bacino idrografico del fiume Tagliamento chiuso a monte del ponte di Braulins. ....	29
Figura 4.5 Bacini idrografici principali di Fella e Tagliamento, con indicata l'ubicazione delle stazioni pluviometriche e l'area interessata dal dominio di calcolo (mesh computazionale). ....	30

Figura 4.6 Stazioni pluviometriche e topoieti del bacino idrografico dell'alto Tagliamento e del Fella.....	32
Figura 4.7 Inquadramento generale del DTM dell'alto Tagliamento.....	33
Figura 4.8 Mappa del coefficiente CN-II nella zona dell'alto Tagliamento e Fella.....	33
Figura 4.9 Idrogrammi di piena per $Tr = 100$ anni in corrispondenza della confluenza Fella-Tagliamento: con il colore grigio rappresentato quello desumibile dalla piattaforma SIGMA, mentre quelli con i colori verde, azzurro e viola sono stati ottenuti con il modello idrologico a partire da diverse forme di ietogramma, rispettivamente, costante, monotono crescente e a blocchi alterni.....	34
Figura 4.10 Ubicazione del punto di campionamento a valle della confluenza fra Fella e Tagliamento.....	35
Figura 4.11 Esempio di misura di un sedimento in alveo. ....	35
Figura 4.12 Risultati del campionamento in alveo per il fiume Tagliamento a valle della immissione del Fella.....	36
Figura 4.13 Idrogrammi di piena per $Tr = 100$ anni per la sezione di chiusura a valle della confluenza fra Fella e Tagliamento e per diverse durate di precipitazione: con i tratti sottili sono indicati quelli ottenuti a partire dallo ietogramma monotono crescente (eccezion fatta per quello $p_{max}$ e $v_{max}$ , evidenziati in rosso e in verde), mentre con i maggiori spessori sono indicati quelli ottenuti a partire dallo ietogramma a blocchi alterni. L'idrogramma rappresentato con il colore nero è quello $p_{max}$ ottenuto dallo ietogramma monotono crescente amplificato del 20%, per tenere in considerazione gli effetti del cambiamento climatico in atto. ....	37
Figura 4.14 Idrogrammi $p_{max}$ di Tagliamento, Fella e Venzonassa: quelli con il suffisso 'CC' ( <i>climate change</i> ) sono stati adottati quali condizioni al contorno della modellazione idrodinamica a fondo mobile per $Tr = 100$ anni, contemplando l'effetto dei cambiamenti climatici.....	39
Figura 4.15 Idrogrammi $v_{max}$ di Tagliamento, Fella e Venzonassa, adottati quali condizioni al contorno della modellazione idrodinamica a fondo mobile per $Tr = 100$ anni.....	39
Figura 5.1 Inquadramento generale del dominio di calcolo, con evidenziati il contorno della mesh (in blu), le nodestings (in rosso) e le principali poligonali per definire le aree a differente scabrezza. ....	43
Figura 5.2 Porzione del dominio di calcolo nella zona a monte della confluenza fra Tagliamento e Fella.....	44
Figura 5.3 Particolare del dominio di calcolo nel tratto interessato dalla pista ciclabile. ....	45
Figura 5.4 Particolare della mesh nel tratto di confluenza fra Fella e Tagliamento.....	46
Figura 5.5 Particolare della mesh lungo il tratto iniziale della pista ciclabile.....	47

Figura 5.6 Particolare della mesh lungo il tratto centrale della pista ciclabile.....	48
Figura 5.7 Particolare della mesh lungo il tratto finale della pista ciclabile. ....	49
Figura 5.8 Andamento altimetrico generale della mesh di calcolo (DTM 2020). ....	51
Figura 5.9 Andamento altimetrico della mesh nella zona di Venzone.....	52
Figura 5.10 Idrogrammi $p_{max}$ di Tagliamento, Fella e Venzonassa quali condizioni al contorno della modellazione idrodinamica a fondo mobile per $Tr = 100$ anni, contemplando l'effetto dei cambiamenti climatici. ....	53
Figura 5.11 Idrogrammi $v_{max}$ di Tagliamento, Fella e Venzonassa quali condizioni al contorno della modellazione idrodinamica a fondo mobile per $Tr = 100$ anni. ....	53
Figura 5.12 Ubicazione delle <i>nodestrings</i> del modello idrodinamico ai fini delle verifiche di eventuale ostruzione delle luci dei ponti (zona di Venzone). ....	56
Figura 6.1 Mappa generale delle massime profondità dell'acqua, in m ( $Tr 100$ ), sovrapposta alla cartografia della pericolosità del PGRA.....	58
Figura 6.2 Mappa generale delle massime velocità della corrente, in m/s ( $Tr 100$ ), sovrapposta alla cartografia della pericolosità del PGRA.....	59
Figura 6.3 Mappa di inviluppo delle massime profondità dell'acqua, in m ( $Tr 100$ ), allo SDF. ....	60
Figura 6.4 Mappa di inviluppo delle massime profondità dell'acqua, in m ( $Tr 100$ ), allo SDP. ....	61
Figura 6.5 Mappa di inviluppo delle massime velocità della corrente, in m/s ( $Tr 100$ ), allo SDF. ....	62
Figura 6.6 Mappa di inviluppo delle massime velocità della corrente, in m/s ( $Tr 100$ ), allo SDP. ....	63
Figura 6.7 Mappa di inviluppo delle massime profondità dell'acqua, in m ( $Tr 100$ ), allo SDF; particolare per la zona di Venzone.....	64
Figura 6.8 Mappa di inviluppo delle massime profondità dell'acqua, in m ( $Tr 100$ ), allo SDP; particolare per la zona di Venzone.....	64
Figura 6.9 Mappa di inviluppo delle massime velocità della corrente, in m/s ( $Tr 100$ ), allo SDF; particolare per la zona di Venzone. ....	65
Figura 6.10 Mappa di inviluppo delle massime velocità della corrente, in m/s ( $Tr 100$ ), allo SDP; particolare per la zona di Venzone. ....	65
Figura 6.11 Mappa differenziale delle massime profondità dell'acqua, in m ( $Tr 100$ ), SDP-SDF. ....	66
Figura 6.12 Mappa differenziale delle massime velocità della corrente, in m/s ( $Tr 100$ ), SDP-SDF. ....	67

Figura 6.13 Mappa differenziale delle massime quote del pelo libero, in m (Tr 100), SDP-SDF. .....	68
Figura 6.14 Mappa differenziale delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), SDP-SDF; particolare per la zona di Venzone.....	69
Figura 6.15 Mappa differenziale delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), SDP-SDF; particolare per la zona di Venzone.....	69
Figura 6.16 Mappa differenziale delle massime quote del pelo libero, in m (Tr 100), SDP-SDF; particolare per la zona di Venzone.....	70
Figura 6.17 Mappa differenziale delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), SDP3-SDF.....	71
Figura 6.18 Mappa differenziale delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), SDP3-SDF.....	72
Figura 6.19 Mappa differenziale delle massime quote del pelo libero, in m (Tr 100), SDP-SDF. .....	73
Figura 6.20 Mappa differenziale delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), SDP3-SDF; particolare per la zona di Venzone.....	74
Figura 6.21 Mappa differenziale delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), SDP3-SDF; particolare per la zona di Venzone.....	74
Figura 6.22 Mappa differenziale delle massime quote del pelo libero, in m (Tr 100), SDP3-SDF; particolare per la zona di Venzone.....	75

## Indice delle Tabelle

Tabella 3.1 Caratteristiche dei principali sottobacini del Tagliamento (le estensioni indicano le aree di afflusso diretto o attraverso corsi minori con sottobacini afferenti di 2° ordine di estensione > 35 km <sup>2</sup> ). .....	20
Tabella 3.2 Classificazione delle aste del bacino idrografico secondo il criterio di Strahler.	22
Tabella 3.3 Percentuale della superficie dei bacini più importanti rispetto al bacino del Tagliamento.....	22
Tabella 4.1 Ietogramma monotono crescente: risultati sintetici per la determinazione degli idrogrammi <i>p<sub>max</sub></i> e <i>v<sub>max</sub></i> . .....	38
Tabella 5.1 Caratteristiche degli attraversamenti analizzati e calcolo dei vari parametri per valutare l'eventualità di ostruzione degli stessi.....	56

## 1 Premesse

Lo studio nasce dalla necessità da parte della Comunità di Montagna del Gemonese di effettuare la Verifica di Compatibilità Idraulica (VCI), in accordo con le Norme Tecniche di Attuazione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA 2021-2027), della pista ciclabile di collegamento Portis Vecchio – Venzone sull'ex sedime ferroviario, completamento FVG1, nell'ambito del Piano di completamento della rete ciclabile regionale del comprensorio del Gemonese FVG1 – FVG3 – FVG6 (Figura 1.1).

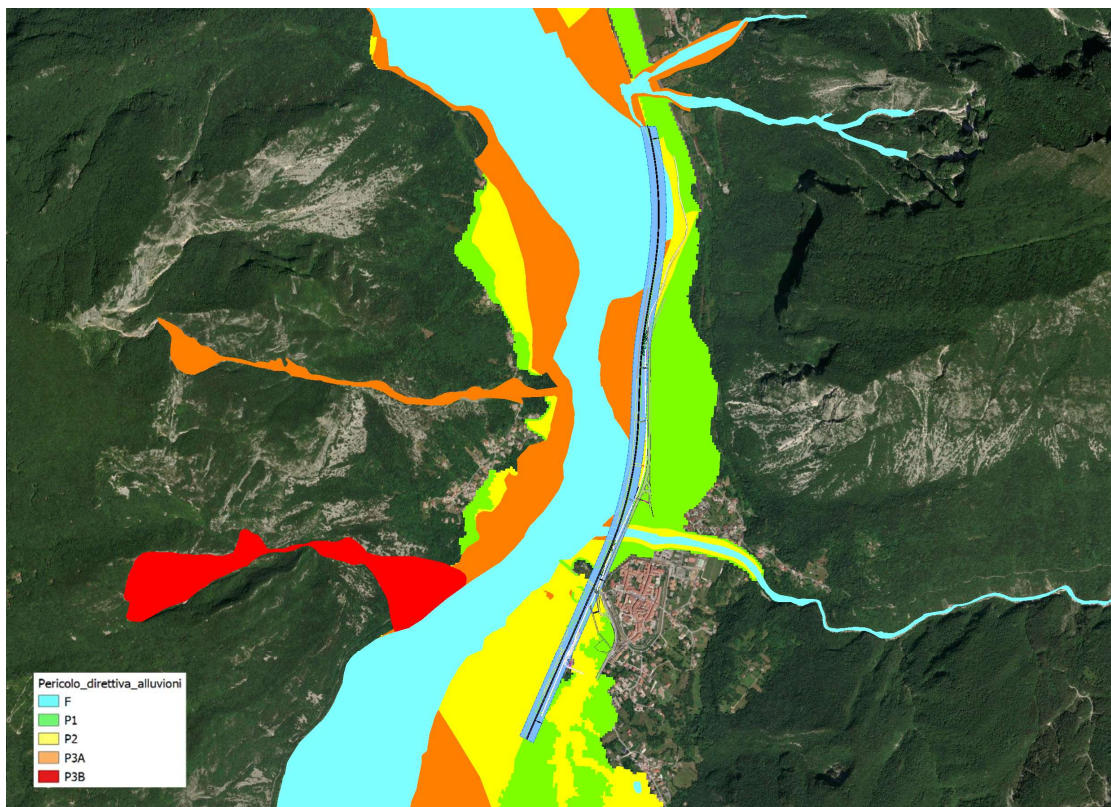


Figura 1.1 Inquadramento della zona oggetto di studio, su mappa PGRA e con evidenziato il tracciato della pista ciclabile.

In particolare, in base all'incarico aggiudicato allo scrivente in data 10.05.2025, la presente relazione riporta le analisi idrologico-idrauliche finalizzate alla verifica di compatibilità idraulica dell'intervento.

L'attuale classificazione delle mappe di pericolosità del PGRA prevede che il tracciato interessi porzioni di territorio mappate prevalentemente come P2 e P3.

In base alle NTA del PGRA 2021-2027, la realizzazione della pista ciclabile deve quindi essere soggetta al posizionamento della stessa alla quota di sicurezza, ottenibile come sopraelevazione rispetto alla quota attuale del terreno del massimo tirante riportato nelle mappe di allagabilità per il tempo di ritorno pari a 100 anni.

Il lavoro è quindi principalmente consistito nella realizzazione di un modello idrodinamico bidimensionale a fondo mobile, utile a simulare i campi di profondità dell'acqua e velocità della corrente sia alla condizione attuale (stato di fatto, SDF) che in quella di progetto (SDP), onde verificare la compatibilità idraulica dell'intervento in termini di differenze fra le due condizioni.

Preliminarmente alle analisi idrodinamiche, si è proceduto con la messa a punto di un modello idrologico a partire dai dati disponibili sul portale SIGMA dell'Autorità di bacino Distrettuale delle Alpi Orientali, in corrispondenza delle sezioni del Tagliamento e del Fella, subito a monte della confluenza. Il modello idrologico è stato tarato in modo tale da riprodurre il picco di portata con riferimento allo stesso evento simulato dall'Autorità di bacino (sia per durata che per forma dello ietogramma), opportunamente calibrando i parametri relativi al fattore di picco e al tempo di picco dell'IUH SCS.

Il modello idrologico è quindi servito a:

- 1) identificare le condizioni maggiormente cautelative per le analisi, ovvero, a parità di precipitazione e modificando la forma dello ietogramma si è pervenuti alla tipologia di pioggia che produce la massima portata al colmo;
- 2) effettuare la ricerca degli eventi cosiddetti  $p_{max}$  e  $v_{max}$ , ovvero le durate di quegli eventi che, per il dato tempo di ritorno, determinano la condizione di massima portata al colmo e di massimo volume di materiale solido trasportato

Gli idrogrammi di piena dei corsi d'acqua minori che interessano il dominio di calcolo sono stati ottenuti in modo cautelativo scalando l'idrogramma del Tagliamento (mantenendone quindi la forma), e in modo tale da riprodurre il picco di portata del corso d'acqua affluente che si immette: tale valore, critico per l'affluente, è stato calcolato con l'ipotesi di trasformazione afflussi-deflussi di tipo cinematico, in relazione alla durata critica del bacino ivi afferente.

Gli idrogrammi di piena così ottenuti sono stati dati in input quali condizioni al contorno del modello idrodinamico a fondo mobile, oltre a tutta una serie di parametri utili per le simulazioni: coefficienti di scabrezza, dimensione media dei sedimenti, caratteristiche delle opere e degli attraversamenti.

Le simulazioni sono tutte a scala di evento, con riferimento al tempo di ritorno di 100 anni e agli scenari come da All. I del PGRA. I risultati sono riportati in termini di mappe di inviluppo dei massimi valori di profondità dell'acqua e di velocità della corrente, sia allo SDF che allo SDP. Ai fini della verifica di compatibilità idraulica, sono riportate le mappe differenziali delle stesse variabili idrodinamiche, ottenute come differenze fra la configurazione allo SDP e la situazione allo SDF.

## **2 Aspetti relativi al II° ciclo del PGRA (2021-2027): metodologia e nuove cartografie**

### **2.1 Considerazioni generali**

La Conferenza Istituzionale Permanente dell'Autorità di bacino distrettuale delle Alpi Orientali ha adottato in data 21 dicembre 2021 il primo aggiornamento del Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA 2021-2027), ai sensi degli articoli 65 e 66 del D.Lgs. n. 152/2006, la cui efficacia è decorsa dal giorno successivo alla pubblicazione dell'avviso della delibera di adozione sulla Gazzetta Ufficiale (n. 29 del 4 febbraio 2022). Sulla G.U.R.I. n. 31 dd. 07.02.2023, è stato successivamente pubblicato il DPCM dd. 01.12.2022 di approvazione del primo aggiornamento del Piano.

Le componenti attraverso cui il Piano deve strutturarsi sono definite all'interno dell'allegato al testo della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE (FD). Rispetto al I° ciclo di gestione, gli elementi integrativi considerati negli aggiornamenti sono i seguenti:

- informazioni su eventuali modifiche e aggiornamenti apportati dopo la pubblicazione della versione precedente del PGRA, inclusa una sintesi delle revisioni effettuate;
- la valutazione dei progressi realizzati per raggiungere gli obiettivi di cui all'art. 7 della Direttiva 2000/60 CE;
- una descrizione motivata delle eventuali misure previste nella precedente versione del PGRA che erano state programmate ma non poste in essere;
- una descrizione di eventuali misure aggiuntive adottate rispetto a quelle previste nella precedente versione del PGRA.

Le attività di elaborazione delle mappe nel I° ciclo di gestione (2015-2021) si erano concentrate sui principali fiumi di pianura, in quanto gli strumenti modellistici disponibili non permettevano di analizzare correttamente i fenomeni alluvionali di carattere torrentizio e le colate detritiche. Solo recentemente, infatti, la comunità scientifica ha maturato strumenti numerici bidimensionali in grado di trattare i processi di delimitazione e classificazione delle aree pericolose esterne al reticolo idrografico di montagna, con il dovuto requisito di affidabilità e robustezza.

Con riferimento alle aree di pianura, il nuovo approccio metodologico adottato ha permesso di elaborare quanto stabilito all'art. 6 comma 2, 3, e 4 della 2007/60/CE e nello specifico:

- la perimetrazione delle aree che potrebbero essere interessate da alluvioni secondo lo scenario di bassa probabilità (tempo di ritorno pari a 300 anni), di media probabilità (tempo di ritorno di 100 anni) e alta probabilità (tempo di ritorno pari a 30 anni);

- per ogni scenario sopra richiamato, l'estensione delle inondazioni, l'altezza idrica e le caratteristiche del deflusso.

Tali dati costituiscono quindi, per le aree di pianura, uno strato conoscitivo aggiornato sugli effetti che i fenomeni di esondazione potrebbero avere sul territorio, tenendo anche conto dei fenomeni di rottura arginale per sormonto.

Per quel che riguarda il reticolo idrografico di montagna, le nuove elaborazioni si sono particolarmente focalizzate sui fenomeni di alluvioni torrentizie (con metodologie d'indagine simili a quelle per le alluvioni di pianura, ma basandosi su ipotesi di lavoro alquanto differenti) e di colata detritica, tramite software sviluppati ad hoc.

Pertanto, anche nell'ottica di procedere, attraverso il PGRA, con il processo di uniformazione dei vari strumenti di pianificazione (PAI) esistenti nell'area distrettuale, gli elementi di novità di questo II° ciclo hanno riguardato gli aspetti e le tematiche di seguito elencati:

1. la definizione dei criteri per l'attribuzione delle classi di pericolosità idraulica per il territorio affetto da fenomeni di alluvione, alluvione torrentizia e colata detritica;
2. l'identificazione di metodologie speditive per lo studio dei fenomeni di colata detritica nel caso si possa procedere con un dettaglio di analisi meno approfondito;
3. una rappresentazione cartografica in opportuna scala (1:10.000) delle classificazioni di pericolosità idraulica e del relativo rischio presenti sul territorio;
4. la disciplina del territorio affetto da condizioni di potenziale pericolosità idraulica che riprende, omogeneizza e migliora le normative già previste nei PAI;
5. la definizione di criteri operativi di prioritizzazione degli interventi;
6. l'introduzione di nuove misure per ridurre gli impatti negativi derivanti da una alluvione;
7. i meccanismi di coordinamento utilizzati per la condivisione dei dati di base nelle Unità di gestione (UoM) transfrontaliere.

## **2.2 Le mappe di allagabilità, pericolosità e rischio**

L'art. 6 della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE (Floods Directive – FD) stabilisce che gli Stati Membri (Member States – MS) predispongano, a livello di distretto idrografico o unità di gestione, mappe di pericolosità da alluvione e mappe del rischio di alluvioni, nella scala più appropriata per le aree a rischio potenziale significativo di alluvione (APSEFR) individuate ai sensi dell'art. 5, paragrafo 1.

Le APSFR riportate (reporting) alla Commissione Europea (CE) sono state definite nell'ambito della revisione e aggiornamento della Valutazione Preliminare che ha segnato l'inizio del II° ciclo di gestione. Le informazioni ad esse associate, relative ai fenomeni di colate detritiche ed alluvioni torrentizie, sono state utilizzate per integrare le aree allagate già pubblicate nel precedente ciclo di gestione.

Le mappe riportanti le classi di pericolosità idraulica sono quindi il risultato di elaborazioni effettuate sulle informazioni (allagamenti storici e tiranti idraulici) già pubblicate nel Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni vigente e quelle nuove legate al reticolo montano e pedemontano dei corsi d'acqua del Distretto.

### **2.2.1 Mappe di allagabilità**

Nel Distretto delle Alpi Orientali sono considerate significative le alluvioni di origine fluviale e marina. Pertanto, la mappatura viene effettuata solo in relazione ad esse. Pur essendo il livello marino condizione al contorno a chiusura delle modellazioni fluviali nei tratti terminali, le alluvioni di origini diverse sono modellate separatamente per poi essere sovrapposte in fase di mappatura dei singoli scenari di pericolosità a scala di UoM (Multiple sources by overlapping). La sovrapposizione di risultati provenienti da modellazioni diverse in taluni casi è stata utilizzata anche per inondazioni riconducibili a una stessa origine ma determinate da corsi d'acqua diversi in parte interagenti su una medesima area, che sono stati modellati separatamente (ad es. nell'ambito di studi svolti in tempi differenti).

La definizione degli scenari di probabilità nel Distretto delle Alpi Orientali, partendo dalle indicazioni fornite dal D.Lgs 49/2010, tiene conto innanzitutto dell'origine dell'alluvione (fluviale o marina). Sia per le alluvioni di origine fluviale che per quelle di origine marina, i tempi di ritorno utilizzati nelle modellazioni per i bacini nazionali sono, rispettivamente, 30 anni per lo scenario di alta probabilità (HP), 100 anni per lo scenario di media probabilità (MP) e 300 anni per lo scenario di bassa probabilità (LP).

Si ricorda ancora che i corsi d'acqua afferenti alla rete idrografica di pianura sono quelli indagati nel primo ciclo di gestione e non sono state effettuate nuove valutazioni nel merito a quanto richiesto all'art.6 della 2007/60/CE.

In particolare, per quanto riguarda le alluvioni di origine fluviale, fissato lo scenario, il dominio di calcolo sul quale viene sviluppata la procedura di calcolo ed indagato il grado di rischio nelle sue diverse fattispecie è costituito da tutte le porzioni di territorio che possono essere interessate dall'occupazione delle acque esterne all'area fluviale, ovvero quelle aree che possono essere inondate conseguentemente al sormonto spondale e/o al cedimento delle arginature durante eventi di piena di assegnata probabilità di accadimento.

Al fine di definire e caratterizzare i processi di produzione di deflusso e trasporto durante il manifestarsi di eventi alluvionali, è stato utilizzato uno schema di tipo geomorfologico, che ancora la risposta del bacino alle caratteristiche fisiche e geomorfologiche del sistema idrografico.

Tenuto conto che uno degli obiettivi del Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni è quello di mappare la propensione del territorio ad essere più o meno affetto da condizioni di allagabilità, le onde di piena sono state determinate facendo riferimento alla durata di precipitazione che massimamente sollecita il sistema idrografico nella sua interezza ovvero che, a scala di bacino e non di sottobacino, determina l'instaurarsi dei massimi volumi e livelli idrometrici.

Nel contesto del ruolo e della funzione delle opere idrauliche esistenti nei diversi bacini idrografici, nell'analizzare i diversi scenari di piena si è tenuto conto anche dell'eventuale presenza di serbatoi ad uso di laminazione. In tal senso va ricordato che la direttiva P.C.M. 27/2/2004 recante "Gestione organizzativa e funzionale del sistema di allertamento nazionale e regionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini della protezione civile" impone che i serbatoi definiti a tale scopo devono essere dotati di appositi i piani di laminazione. Pertanto, solo in presenza di questi piani di laminazione sono stati inseriti nella modellazione. In tutti gli altri casi, i serbatoi sono stati considerati "trasparenti", ovvero ininfluenti rispetto ai processi idrodinamici.

Nella casistica più vasta dei possibili problemi di allagabilità del territorio legata alle efficienze delle opere idrauliche, sono stati considerati anche i possibili effetti dell'evento alluvionale dovuti alla rottura arginale per tracimazione. Il tema era peraltro già stato a suo tempo affrontato dal PAI dell'Alto Adriatico (Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, 2012).

Lo schema di calcolo utilizza l'informazione derivante da mappe digitali del terreno, dall'interpolazione geostatistica di dati meteorologici, da mappe di uso del suolo e pertanto si configura come distribuito nella descrizione dei processi, ma concentrato nei parametri.

La propagazione dell'onda di piena nel territorio di pianura è indagata mediante modello idraulico mono-bidimensionale. In particolare, il campo di moto per i territori potenzialmente affetti da esondazione è stato modellato con schema di tipo bidimensionale. La risoluzione della cella bidimensionale è 10m x 10m.

Fissato lo scenario, il dominio di calcolo sul quale viene sviluppata la procedura di calcolo ed indagato il grado di rischio nelle sue diverse fattispecie è costituito da tutte le porzioni di territorio che possono essere interessate dall'occupazione delle acque esterne all'area fluviale, ovvero quelle aree che possono essere inondate conseguentemente al sormonto spondale e/o al cedimento delle arginature durante eventi di piena di assegnata probabilità di accadimento.

A fronte, quindi, di questo delicato problema che coinvolge l'uso del territorio, la sua economia e non ultimo la pubblica incolumità, sono state effettuate alcune scelte di modellistica idraulica che tengono conto dei possibili fenomeni di formazione di breccie nei manufatti idraulici di protezione.

A fronte della non conoscenza del modello geotecnico dei corpi arginali, è stata considerata la formazione della breccia per solo sormonto e pertanto non è stata considerata la casistica di cedimento relativa ai fenomeni di sifonamento.

L'inizio della formazione della breccia è stato previsto in presenza di un franco arginale non nullo, pari a circa 20 cm, al fine di tener conto anche di possibili modifiche dei livelli idrometrici dovute a perturbazioni locali (effetto di onde) e dei cambiamenti climatici. Il modello (idraulico) concettuale adottato è stato impostato in modo non conservativo rispetto ai volumi sfiorati, mentre risulta conservativo rispetto alla formazione delle breccie. Sono state cioè considerate le possibili combinazioni delle rotture e dello sfioro degli argini operando successivamente l'inviluppo degli scenari di allagamento. Questo in quanto, non conoscendo il modello geotecnico, non possono essere escluse a priori diverse combinazioni tra lo sfioro e i diversi punti di potenziale rottura.

Per la modellazione della formazione della breccia i riferimenti assunti sono stati quelli di Figura 2.1, con il tempo di innesco della breccia fissato pari a 20 minuti. Nel caso di argini diaframmati il petto di sfioro è coinciso con la quota della sommità arginale (solo effetto di sfioro senza formazione di breccia).

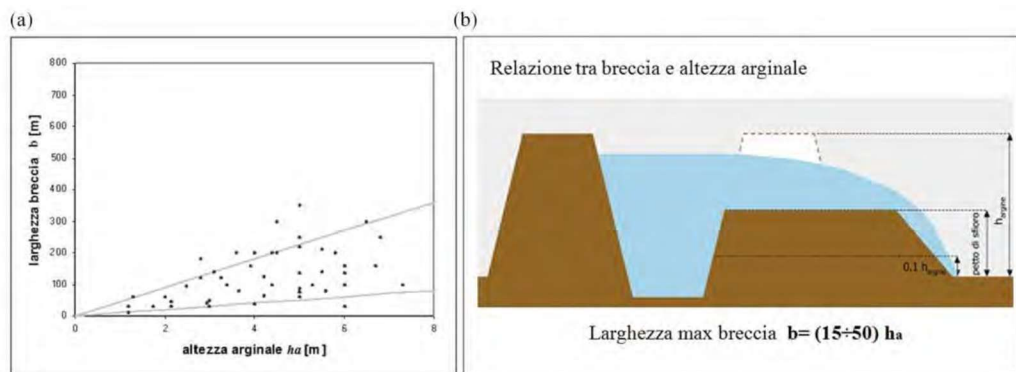


Figura 2.1 (a) Analisi di rotte arginali avvenute in passato: larghezza della breccia vs. altezza dell'argine misurato a lato campagna; (b) schematizzazione della rotta arginale e relazione empirica tra larghezza della breccia e altezza dell'argine misurato a lato campagna.

## 2.2.2 Mappe di pericolosità per alluvioni di pianura (fluviali)

La metodologia precedentemente descritta fornisce una rappresentazione della variabilità spaziale di altezza/tirante idrico e della velocità nelle aree oggetto di indagine per ciascuno dei

tre scenari di pericolosità. Noti nei vari punti del territorio i tiranti d'acqua massimi  $h$  e le velocità massime  $v$  che si manifestano durante un evento di piena, la condizione di pericolo è legata all'intensità del fenomeno ( $I$ ), funzione di tirante e velocità.

Con note n. 18779 del 17 settembre 2019 e n. 24799 del 3.12.2019, la Direzione Generale per la Salvaguardia del Territorio e delle Acque del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del territorio e del Mare (l'ex MATTM, poi MITE e, ad oggi, Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica) ha trasmesso indirizzi operativi e la tempistica da assumere per gli adempimenti relativamente alle attività del secondo ciclo di pianificazione ai sensi della Direttiva 2007/60/CE. Tutto ciò allo scopo di avere prodotti conformi con la normativa e omogenei a scala nazionale da presentare alla Commissione Europea sulla base di quanto previsto dall'art.15 della 2007/60/CE.

Nella nota viene specificato che le aree in cui si ritiene possibile il verificarsi di alluvioni devono essere perimetrate secondo 3 classi di pericolosità basate sulle frequenze di accadimento indicate nella direttiva e nel DL 49/2010 di recepimento della stessa: pericolosità moderata (P1), media (P2), elevata (P3).

Al fine di dar seguito a tale attività di uniformazione, la metodologia di classificazione della pericolosità idraulica, da adottare in modo omogeneo su tutto il territorio distrettuale, si basa sulla matrice di BUWAL che combina l'intensità e la probabilità di accadimento del fenomeno.

Per la classificazione dei singoli processi vengono usate le pendenze del corso d'acqua e del fondovalle, la portata solida, la pressione idrodinamica, gli spessori e le velocità, come di seguito riportato:

- Alluvione: concentrazione del materiale solido < 30%; velocità < 40 km/h; pendenza < 1.5%;
- Alluvione torrentizia: concentrazione del materiale solido < 30%; velocità < 40 km/h; pendenza 1.5% - 15%;
- Colata detritica: concentrazione del materiale solido 30% - 70%; velocità > 40 km/h; pendenza > 15%.

Si precisa che le aree fluviali sono state mutate dal PAI e identificano il luogo di scorrimento delle acque nella massima portata e velocità consentita dalla geomorfologia del fiume, ossia un'area in cui l'inondazione si presenta quale evento naturale e fisiologico, e in cui, pertanto, non viene affatto in rilievo il concetto di "rischio", come tale legato ad eventi straordinari. Esse sono il frutto di studi e indagini idrodinamiche e geomorfologiche che inducono ad escludere

dalla procedura di calcolo l'alveo massimo (considerato sempre di pericolosità massima) si da consentire al pianificatore di concentrarsi, ai fini della mappatura del rischio alluvioni, soltanto sulle aree esterne a quella fluviale.

Le grandezze di riferimento per la misura dell'intensità sono il tirante, assumendo il valore di 1 m per distinguere tra l'intensità bassa e quella media, e la velocità ( $v > 1\text{ m/s}$ ) per individuare tutte quelle situazioni per le quali la velocità è sicuramente di intensità elevata, superiore o uguale a tale valore, come ad esempio nelle immediate prossimità dei rilevati arginali a seguito della formazione di breccie. Infatti, la funzione intensità deve essere applicabile a scala distrettuale e deve essere basata su dati dotati - per quanto possibile - di robustezza o, in subordine, la cui stima può essere comunque confermata con facili analisi di dettaglio. Inoltre, per le aree allagabili, il valore atteso del tirante è un campo obbligatorio richiesto dalla direttiva 2007/60/CE ed è noto e facilmente desumibile ancorché, in taluni casi, da ottenere mediante procedura speditiva.

Diversamente, la velocità di propagazione delle acque, affinché abbia significatività, va determinata con modelli di propagazione idraulica 2D che non sono disponibili per tutti i corsi d'acqua del Distretto; in tal senso la proposta di considerare la velocità come elemento di criticità per  $v > 1\text{ m/s}$  ben si pone in tale logica in quanto ampiamente confermato per le situazioni assunte a riferimento (scenari di rotta arginale). Il valore di tirante pari a 1 m può essere rappresentativo – in linea generale – per distinguere l'intensità media da quella bassa.

Tuttavia non vanno trascurate altre impostazioni assunte in altri PAI per i quali tale soglia è assunta pari a 0.5 m. Tale indicazione -più restrittiva- viene assunta come un sottoinsieme della soglia di 1 m prima richiamata, da rappresentare non tanto nell'estensione territoriale, quanto nella disciplina da osservare; tale particolarità viene pertanto riproposta nell'impostazione e strutturazione delle norme tecniche di attuazione del PGRA, attraverso una specifica disciplina nell'uso del territorio.

La matrice di classificazione della pericolosità risultante (metodo BUWAL) individua quindi, sulla base dei criteri idraulici sopra descritti, tre classi di pericolo, moderato P1, medio P2 ed elevato P3. Inserisce inoltre la classificazione in P3 delle zone contigue a difese arginali che in passato sono state sede di eventuali rotte e/o versano in cattivo stato di manutenzione (*criterio storico-geometrico*), nonché in presenza di fenomeni di erosione spondale, segnalate dalle Amministrazioni e/o già presenti nei PAI; sono assimilati alla medesima classe i laghetti di cava. Introduce infine la classificazione in P1 delle aree storicamente allagate, nelle aree a scolo meccanico, delle aree soggette a ristagno, nelle aree soggette a risalita della falda freatica e ruscellamento (*criterio storico idrogeologico*).

La metodologia proposta prevede, inoltre, di associare agli eventi caratterizzati da bassa probabilità di accadimento un livello di pericolosità moderato P1, fatta eccezione per le situazioni particolari, descritte in precedenza, in cui la classificazione sarà invece in P3.

Vale la pena evidenziare che i criteri sopra elencati consentono di ben riproporre a parità di condizioni idrologiche in ingresso e di strumento modellistico utilizzato (2D) le classificazioni di pericolosità dei PAI degli ex bacini nazionali.

Riassumendo, per le alluvioni (fluviali) sono pertanto individuate tre classi di intensità sulla base dei seguenti criteri idraulici ( $h$  è il tirante, in metri, e  $v$  la velocità, in m/s):

- intensità bassa:  $h < 1$  m;
- intensità media:  $h \geq 1$  m;
- intensità elevata:  $v \geq 1$  m/s.

Sono quindi individuate tre classi di pericolosità, moderata (P1), media (P2) ed elevata (P3) attraverso la matrice di BUWAL modificata, riportata in Figura 2.2.

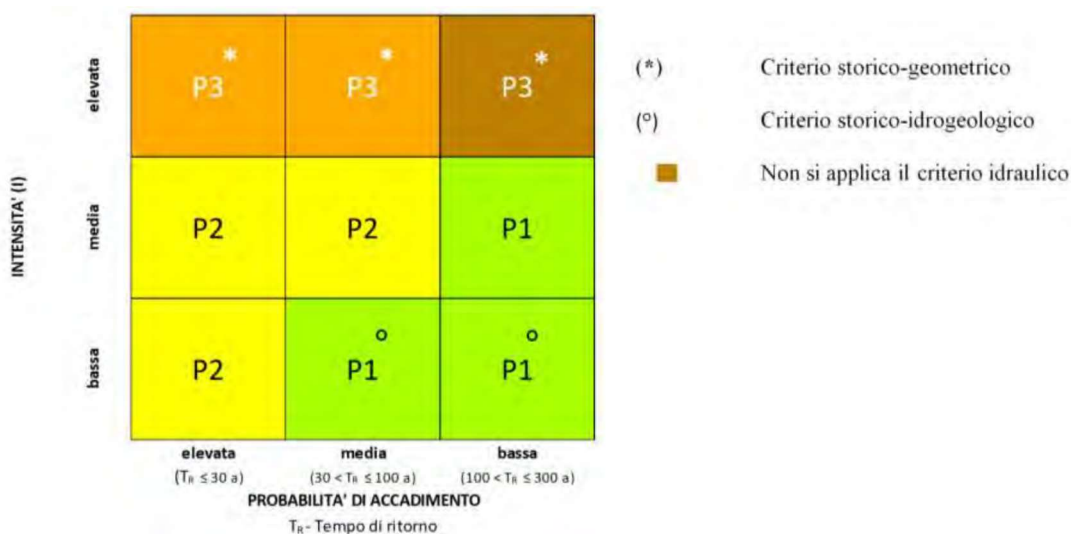


Figura 2.2 Matrice di BUWAL modificata per la classificazione della pericolosità per alluvioni nel territorio di pianura.

In aggiunta al criterio idraulico basato sulla funzione intensità precedentemente definita, viene prevista:

1. la classificazione in pericolosità elevata (P3) per le zone contigue a difese arginali che in passato sono state sede di eventuali rotte e/o versano in cattivo stato di manutenzione. Nello specifico, in analogia a quanto stabilito dai Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dei bacini di rilievo nazionale (Autorità di bacino dei

fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave e Brenta-Bacchiglione, 2012) sono individuate delle fasce, parallele e adiacenti alla struttura arginale, dell'ampiezza orientativa di 150 m e di una lunghezza complessiva pari a quella della rotta, incrementata indicativamente di 500 m sia verso monte che verso valle (Figura 2.3). Sono assimilati alla medesima classe di pericolosità le aree in cui sono presenti fenomeni di erosione spondale, segnalate dalle Amministrazioni e/o già presenti nei PAI e i laghetti di cava (*criterio storico-geometrico*);

2. la classificazione in pericolosità moderata (P1) delle aree storicamente allagate, delle aree a scolo meccanico, delle aree soggette a ristagno, delle aree soggette a risalita della falda freatica e ruscellamento (*criterio storico-idrogeologico*);
3. la classificazione in pericolosità moderata (P1) per tutte le aree allagate in occasione di eventi caratterizzati da bassa probabilità di accadimento, fatta eccezione per le situazioni in cui è applicabile il criterio storico-geometrico.

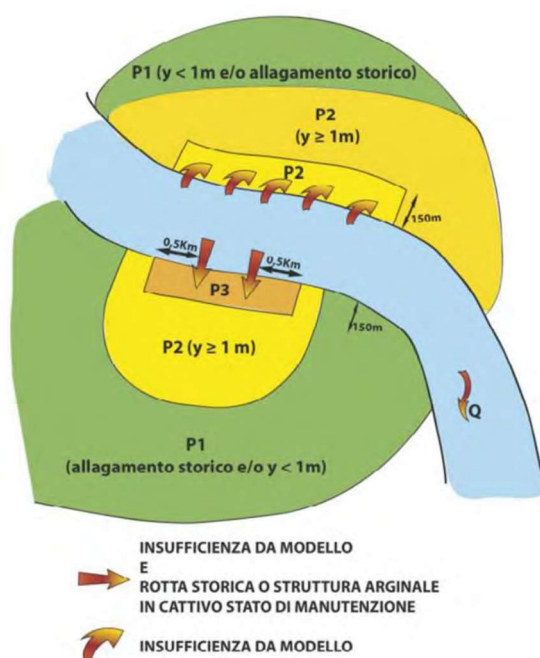


Figura 2.3 Esempio schematico di rappresentazione delle aree pericolose.

### 2.2.3 Mappe di pericolosità per alluvioni torrentizie (cenni)

La classificazione della pericolosità idraulica per i fenomeni di alluvione torrentizia viene definita in funzione della probabilità di accadimento dell'evento e della sua intensità tramite una matrice tipo BUWAL, analogamente a quanto descritto in precedenza. Per quel che concerne le ipotesi modellistiche, si rimanda all'Allegato I del PGRA.

I tre intervalli di tempo di ritorno di riferimento per la valutazione della probabilità di accadimento dei fenomeni alluvionali sono gli stessi, ovvero  $T_r=30$ ,  $T_r=100$  e  $T_r=300$  anni.

In estrema sintesi, per le alluvioni a carattere torrentizio sono individuate tre classi di intensità sulla base dei seguenti criteri idraulici (come al solito,  $h$  è il tirante, in metri, e  $v$  la velocità, in m/s):

- intensità bassa:  $h < 0.5$  AND  $h*v < 0.5$ ;
- intensità media: casi rimanenti;
- intensità elevata:  $h > 2$  OR  $h*v > 2$ .

Analogamente alle alluvioni di pianura, sono individuate tre classi di pericolosità, moderata (P1), media (P2) ed elevata (P3) attraverso la matrice di BUWAL, v. Figura 2.4.

Per le aree di nuova classificazione, la metodologia suindicata, basata sulla matrice di tipo BUWAL, potrà essere integrata con valutazioni della pericolosità legata a processi di dinamica morfologica, quali ad esempio erosione delle sponde ed avulsione.

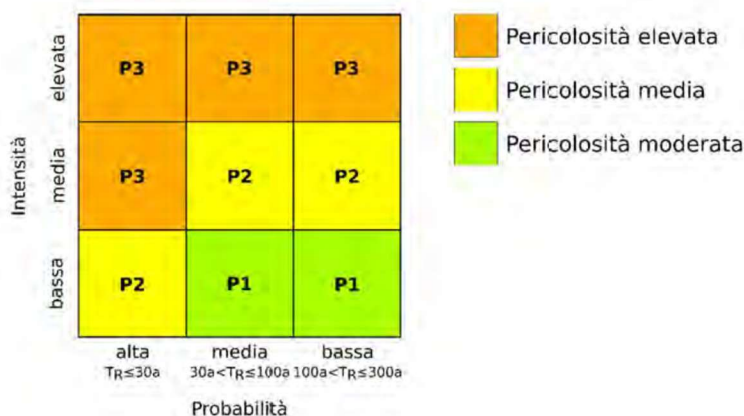


Figura 2.4 Matrice di BUWAL per la classificazione della pericolosità per alluvioni torrentizie.

## 2.2.4 Mappe di rischio

La Direttiva Alluvioni stabilisce che in corrispondenza di ciascuno scenario di probabilità, siano redatte mappe del rischio di alluvioni, in cui devono essere rappresentate le potenziali conseguenze avverse in termini di:

- numero indicativo di abitanti potenzialmente interessati;
- tipo di attività economiche insistenti nell'area potenzialmente interessata;

- impianti di cui alla Direttiva 96/51/CE che potrebbero provocare inquinamento accidentale in caso di alluvioni e aree protette (di cui all'allegato IV, paragrafo 1, punti i), iii) e v) della Dir. 2000/60/CE) potenzialmente interessate;
- altre informazioni considerate utili, come l'indicazione delle aree in cui possono verificarsi alluvioni con elevato trasporto solido e colate detritiche e informazioni su altre fonti notevoli di inquinamento.

Il D.Lgs 49/2010 prevede che le mappe del rischio rappresentino le 4 classi rischio R1-R4 di cui al D.P.C.M. del 29 settembre 1998, espresse in termini di:

- numero indicativo di abitanti potenzialmente interessati;
- infrastrutture e strutture strategiche (autostrade, ferrovie, ospedali, scuole, ecc.);
- beni ambientali, storici e culturali di rilevante interesse presenti nell'area potenzialmente interessata;
- distribuzione e tipologia delle attività economiche insistenti sull'area potenzialmente interessata;
- impianti di cui all'allegato I del D.Lgs 59/2005 che potrebbero provocare inquinamento accidentale in caso di alluvione e aree protette di cui all'allegato 9 alla parte III del D.Lgs 152/2006;
- altre informazioni considerate utili dalle autorità distrettuali, come le aree soggette ad alluvioni con elevato volume di trasporto solido e colate detritiche o informazioni su fonti rilevanti di inquinamento.

La preparazione delle mappe inoltre deve essere coordinata con i riesami effettuati ai sensi dell'art. 5 della Direttiva Quadro sulle Acque 2000/60/CE (WFD), in modo da assicurare che le informazioni condivise siano consistenti, in un'ottica di miglioramento dell'efficienza, dello scambio di informazioni e del raggiungimento di comuni sinergie e benefici rispetto agli obiettivi ambientali della WFD e di mitigazione del rischio della FD.

In questo ciclo di gestione le revisioni hanno riguardato sia il grado di dettaglio e aggiornamento delle informazioni utilizzate, che il grado di omogeneizzazione delle procedure applicate per il calcolo degli elementi a rischio.

Per quanto concerne la determinazione del grado di rischio a cui una determinata area è soggetta, quest'ultimo è stato valutato ai sensi del D.Lgs 49/2010 in termini di classe di rischio da R1 (moderato) a R4 (molto elevato).

## 2.3 Le mappe per la zona di interesse

In questa sezione sono riportate le mappe derivanti dall'aggiornamento del PGRA 2021-2027 con riferimento alla zona oggetto di approfondimento. Come descritto precedentemente, le mappe sono relative alla pericolosità, al rischio e alle caratteristiche del deflusso (in termini di tiranti idraulici). In particolare, la zona territoriale oggetto di approfondimento è interessata dalle mappe aventi il codice O36.

Le cartografie assumono inoltre, nel codice identificativo, i seguenti suffissi: PI (pericolosità idraulica), Figura 2.5; RI (rischio idraulico), Figura 2.6; HPH (*High Probability water Height*), Figura 2.7; MPH (*Medium Probability water Height*), Figura 2.8; LPH (*Low Probability water Height*), Figura 2.9, queste ultime tre relative rispettivamente ai tiranti idrici riferiti ai tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni.

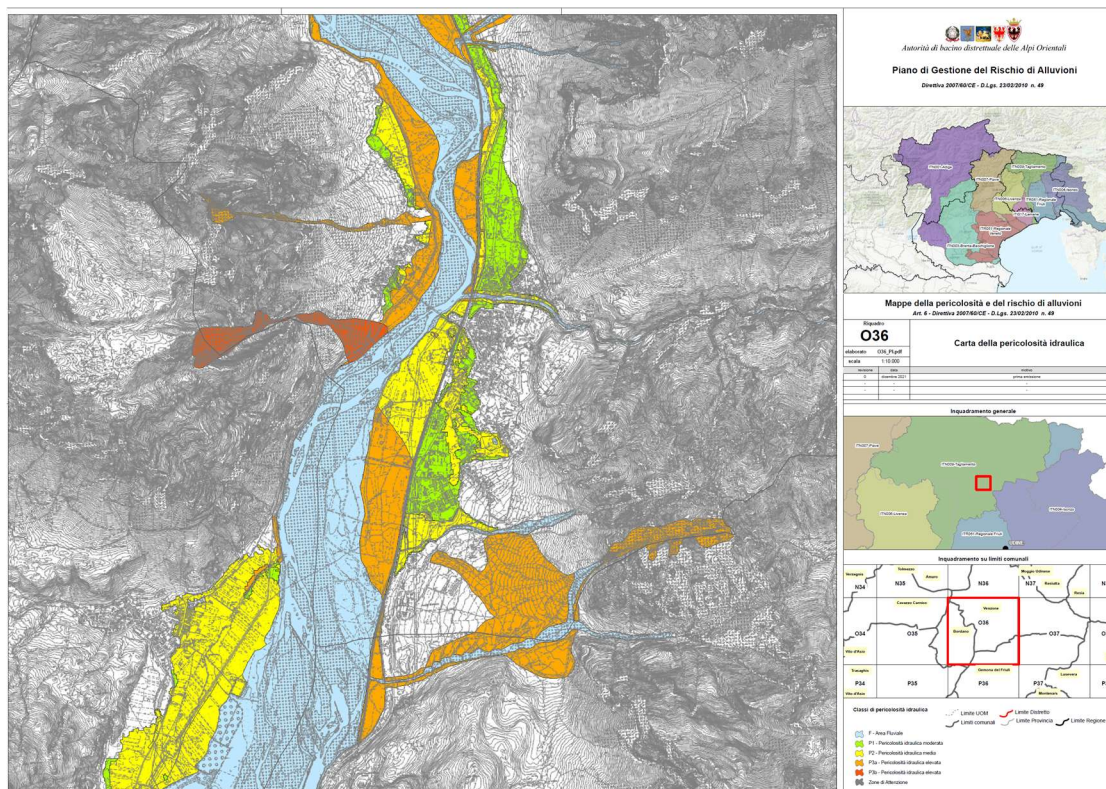


Figura 2.5 Tavola O36-PI del PGRA 2021-2027.

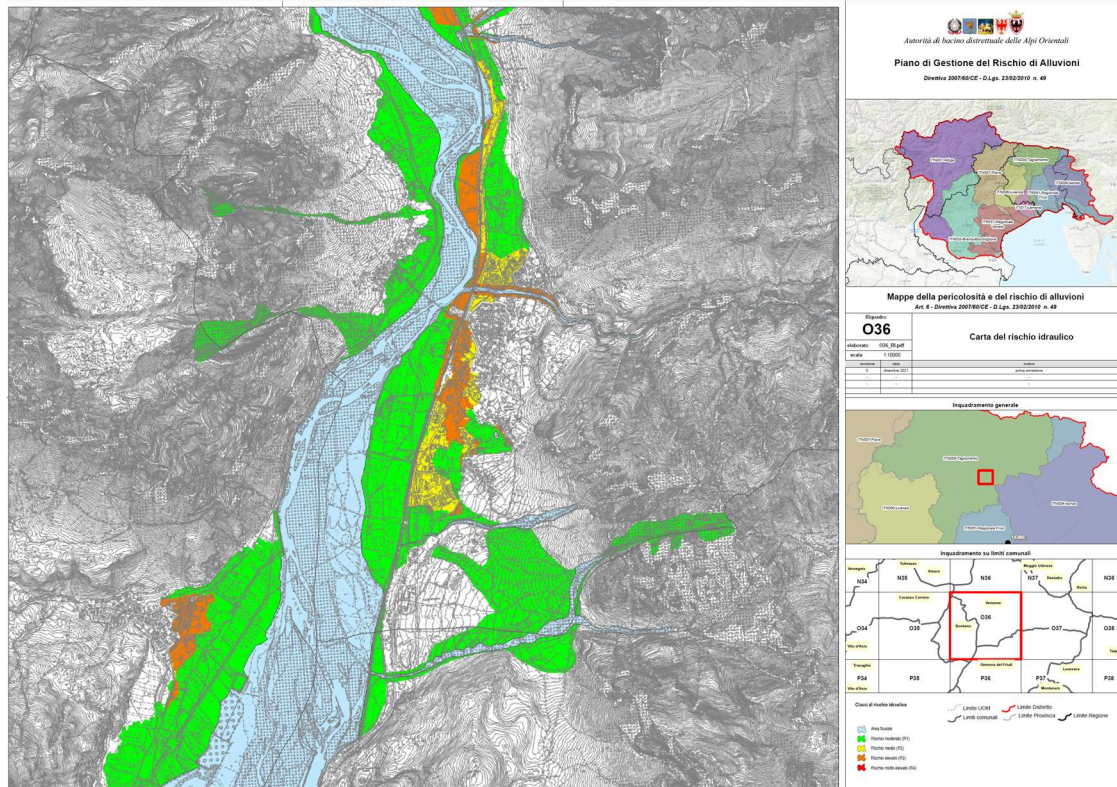


Figura 2.6 Tavola O36-RI del PGRA 2021-2027.

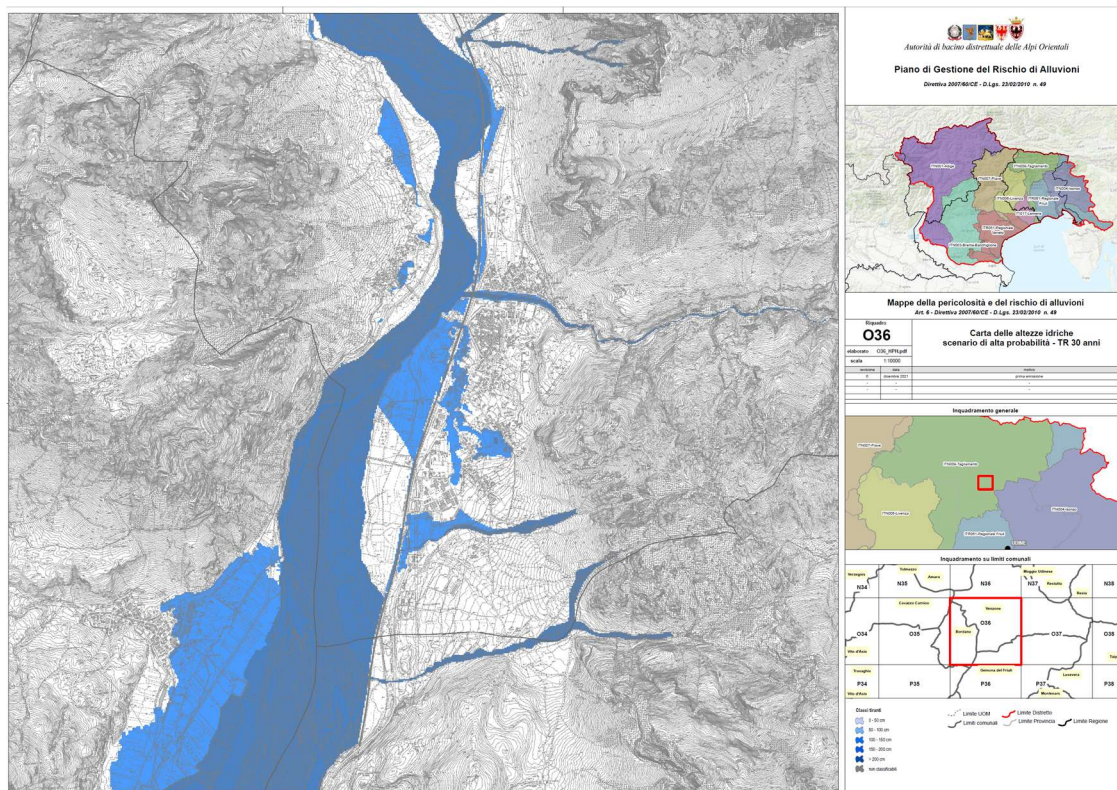


Figura 2.7 Tavola O36-HPH (Tr = 30 anni) del PGRA 2021-2027.

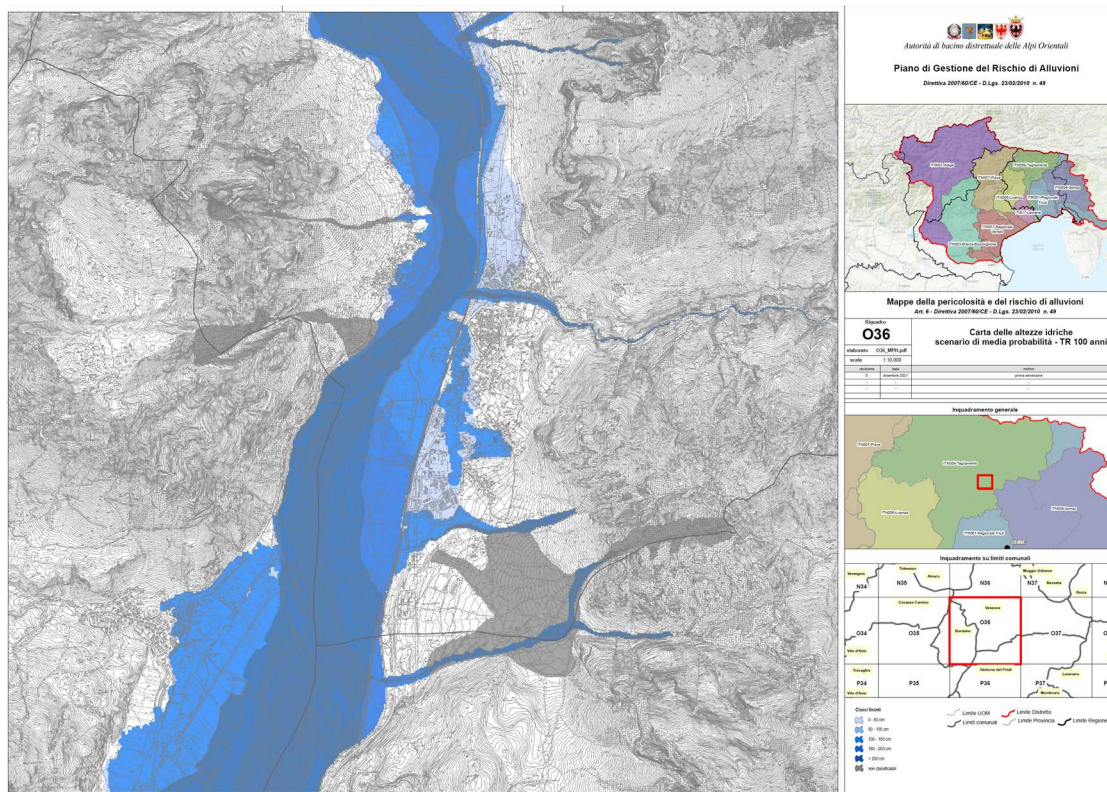


Figura 2.8 Tavola O36-MPH (Tr = 100 anni) del PGRA 2021-2027.

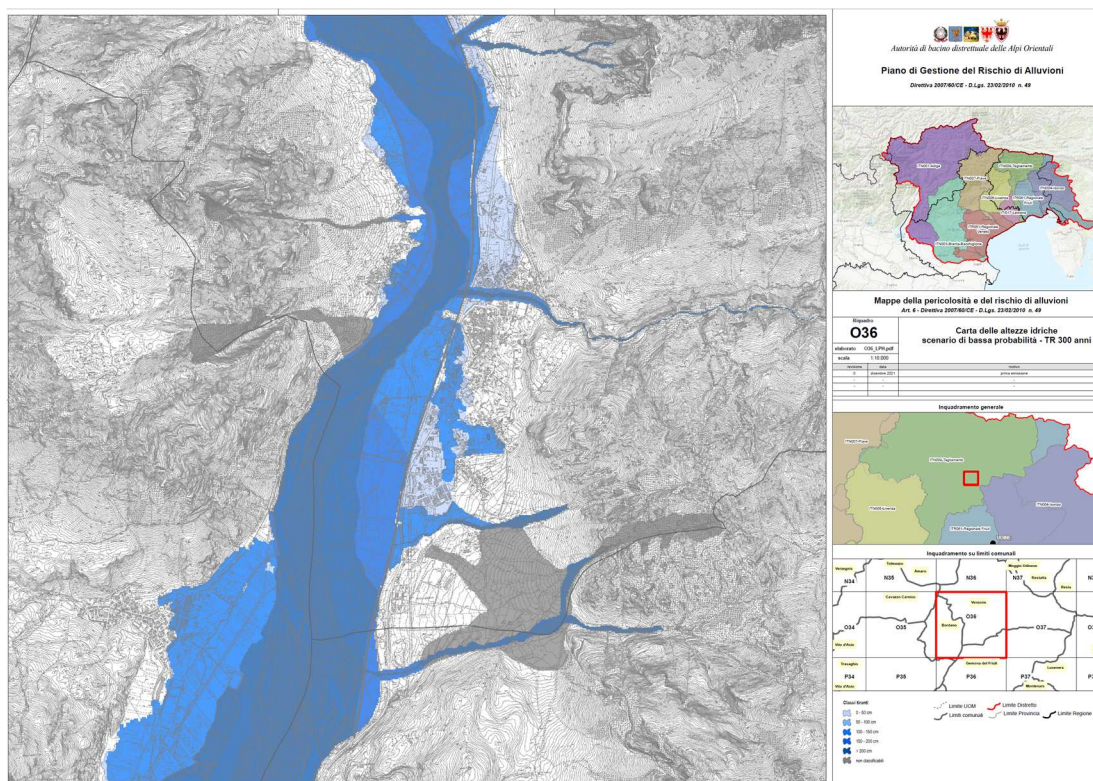


Figura 2.9 Tavola O36-LPH (Tr = 300 anni) del PGRA 2021-2027.

### 3 Caratteristiche dell'area oggetto di analisi

#### 3.1 Il bacino idrografico del Tagliamento

Il fiume Tagliamento nasce nei pressi del Passo della Mauria (1298 m s.l.m.) al confine tra le regioni Friuli Venezia Giulia e Veneto, nelle Dolomiti friulane. L'asta principale si sviluppa complessivamente per circa 178 km, suddivisibili in tre segmenti principali: Alto, Medio e Basso Tagliamento (Figura 3.1). Il tratto montano, parte dell'Alto Tagliamento, attraversa la porzione orientale delle Alpi meridionali, la fascia prealpina carnica e l'Anfiteatro morenico tilaventino; il Medio Tagliamento si apre nell'alta pianura friulana all'altezza di Pinzano e scende fino a Latisana; il Basso Tagliamento sfocia infine in Adriatico nei pressi di Lignano Sabbiadoro. Le municipalità nel bacino sono 88, di cui una in provincia di Venezia, tre in provincia di Belluno, sedici in provincia di Pordenone e le restanti 68 in provincia di Udine: la Figura 3.2 riporta le 36 lungo l'asta principale.

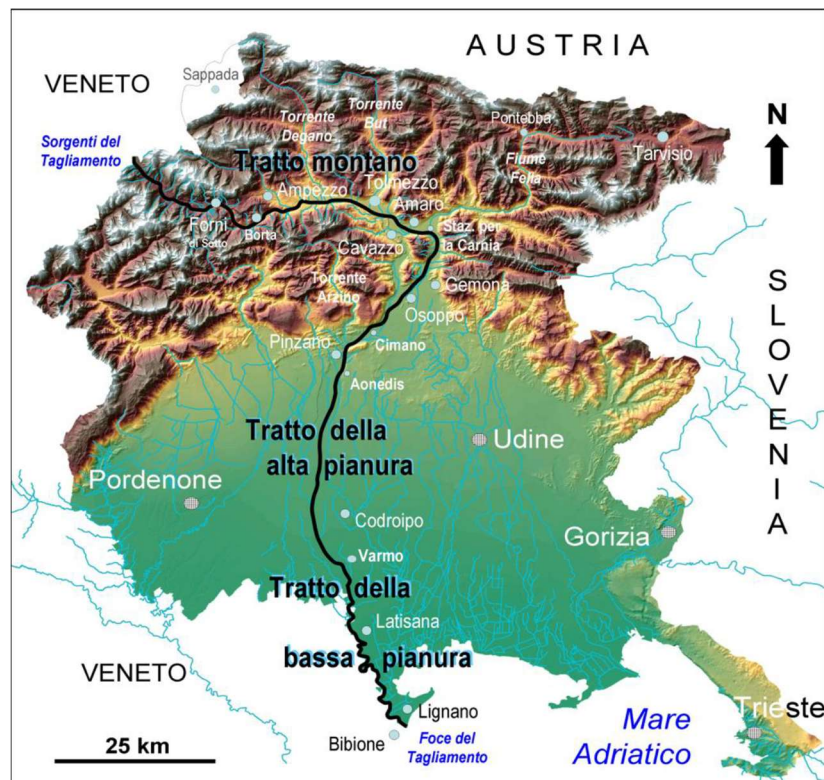


Figura 3.1 Inquadramento geografico del fiume Tagliamento.

Il bacino idrografico (Figura 3.3) ha un'estensione complessiva di 2871 km<sup>2</sup> e la forma di un caratteristico imbuto, con un largo recipiente nella fascia montana, una strettoia nella fascia prealpina ed un lungo e sinuoso canale in pianura. Il bacino montano comprende circa 2433 km<sup>2</sup> di superficie, dei quali circa 1870 km<sup>2</sup> si trovano a monte della confluenza con il Fella ed i rimanenti 563 km<sup>2</sup> nella zona pedemontana, che si estende a monte della confluenza con il torrente Cosa.

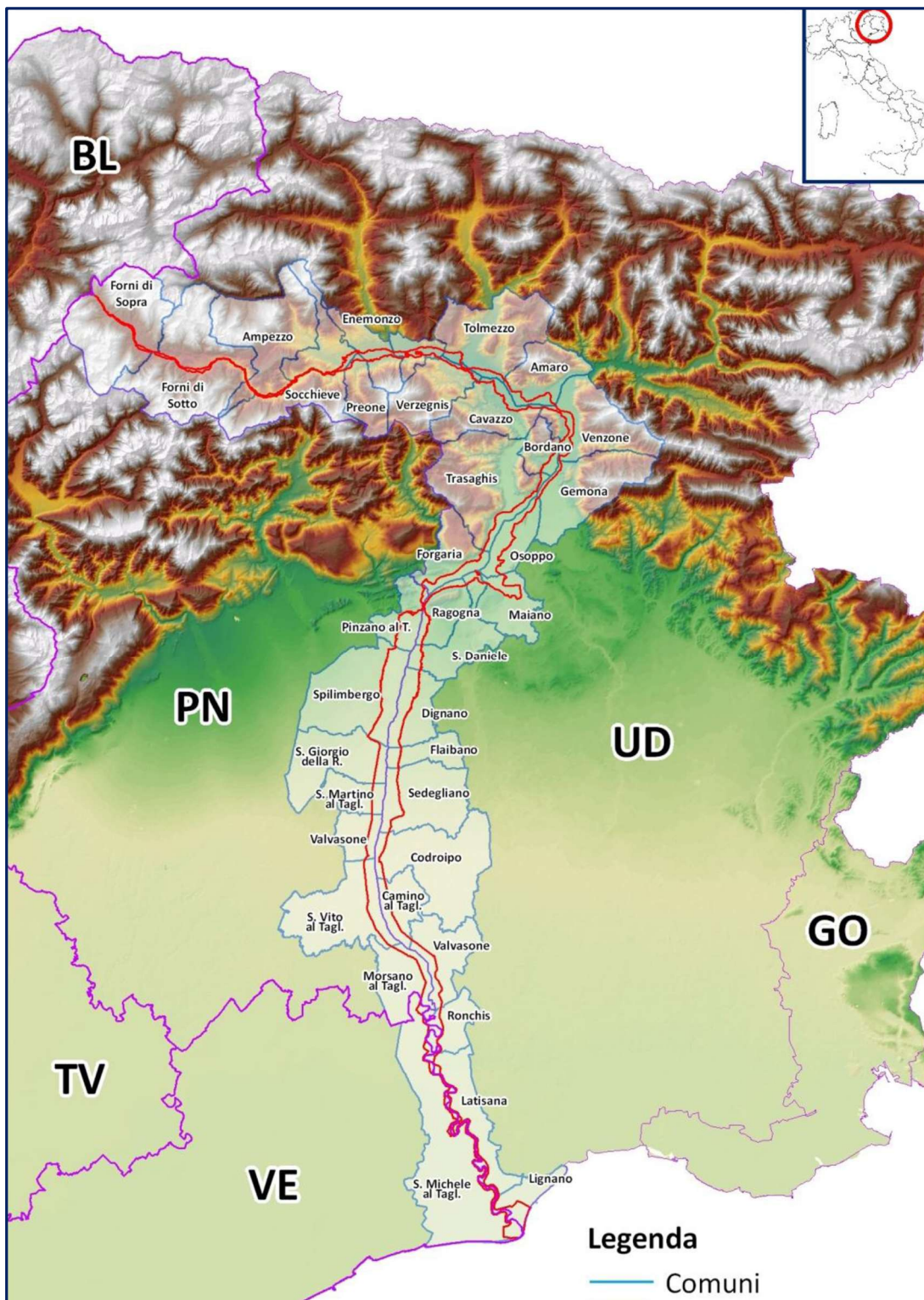


Figura 3.2 Mappa dei 36 comuni rivieraschi sull'asta principale del fiume Tagliamento (da C. Francescato: Paesaggi vegetali, biodiversità cenotica e funzionalità fluviale, Tesi di Dottorato, Università di Trieste, 2012).

Nella regione montana, che si può identificare con la parte di bacino a monte di Venzone, a valle della confluenza con il fiume Fella, l'andamento dei rilievi permette di fissare con

precisione la linea dello spartiacque. A valle della stretta di Pinzano, il Tagliamento raggiunge la pianura; il bacino imbrifero si riduce ad una stretta fascia intorno all'asta fluviale che assume un andamento via via più meandriforme fino a sfociare nella zona perilagunare della laguna di Marano.

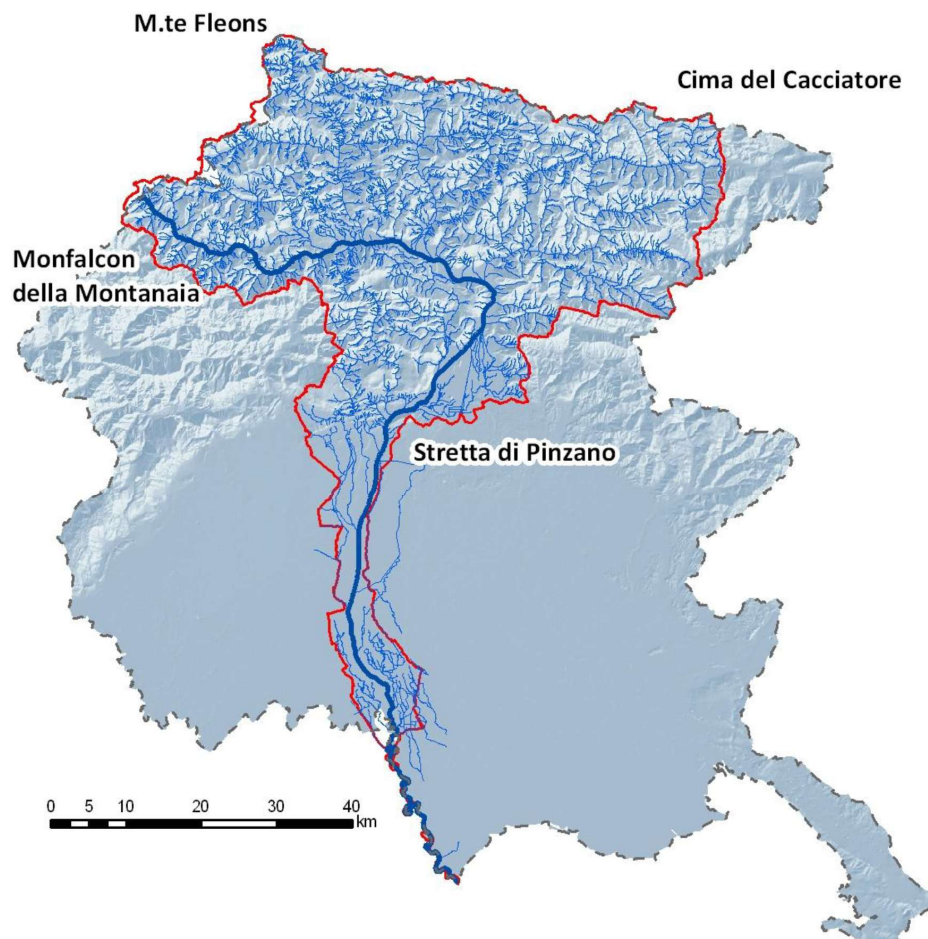


Figura 3.3 Bacino idrografico del Tagliamento.

La Figura 3.4 illustra la parte alta del bacino, con i principali affluenti (le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 3.1).

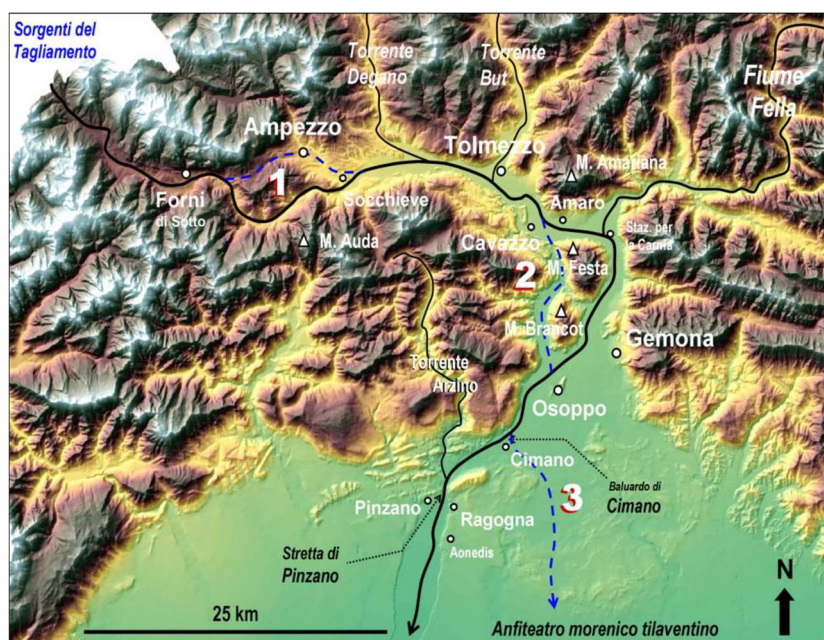


Figura 3.4 Bacino montano del Tagliamento con i suoi principali affluenti. La linea blu tratteggiata indica i tre antichi percorsi oggi abbandonati per altrettante catture fluviali. Sono rispettivamente quello di Ampezzo (1), di Cavazzo (2) e di Cimano (3).

Tabella 3.1 Caratteristiche dei principali sottobacini del Tagliamento (le estensioni indicano le aree di afflusso diretto o attraverso corsi minori con sottobacini afferenti di 2° ordine di estensione > 35 km<sup>2</sup>).

Nome affluente	Lunghezza (km)	Estensione bacino (km <sup>2</sup> )
Arzino	28.3	118.7
But	35.0	325.5
Cosa	31.9	111.8
Degano	37.8	325.6
Fella	53.1	710.6
Leale	16.0	88.9
Lumiei	24.1	125.7
Venzonassa	9.8	38.8
Tagliamento a monte di Pinzano	83.5	504.1
Tagliamento a valle di Pinzano	94.5	250.8

Il bacino del Tagliamento rappresenta una delle regioni più piovose d'Italia, con un valore medio stimato pari a circa 2150 mm/anno, associato ad una forte variabilità intra-regionale condizionata da fattori orografici che inducono massimi cumulati nella fascia prealpina (monti Musi), con valori compresi tra 2500 e 3100 (punte di 3600 mm/anno sono state raggiunte nel trentennio 1961 – 1990) e minimi nelle zone pianeggianti e costiere, con piovosità prossima a quella media nazionale (1000 mm/anno).

Il regime pluviometrico sulla maggior parte del bacino è tipicamente alpino, con due picchi stagionali corrispondenti alle stagioni autunnale (massimo principale di ottobre-novembre) e primaverile (massimo secondario maggio-giugno).

Osservando complessivamente l'andamento delle precipitazioni annuali, si osserva un forte aumento dalla zona alpina interna verso quella prealpina dove si possono avere picchi massimi che superano i 2000 mm. Dal momento in cui ci si affaccia sulla pianura le piogge diminuiscono sensibilmente mano a mano che ci si avvicina al mare scendendo sotto i 1000 mm annui (Figura 3.5, a sinistra). Per quanto riguarda le temperature medie annuali (Figura 3.5, a destra), si ha una forte crescita dall'area alpina a quella dell'avanterra alpino, mentre nella pianura gli incrementi sono meno bruschi via via che ci si avvicina alla foce.

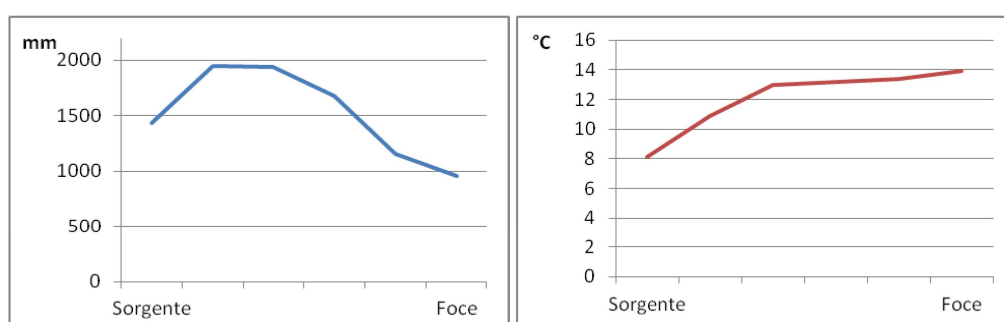


Figura 3.5 Andamento delle precipitazioni annuali (a sinistra) e delle temperature medie (a destra) lungo l'asta principale del fiume.

A titolo di esempio, la Figura 3.6 riporta i climadiagrammi delle stazioni di Forni di Sopra (a sinistra) e di Tolmezzo (a destra), per mostrare la notevole variabilità delle piogge cumulate nella zona della Carnia.

Il regime dei deflussi rispecchia l'andamento stagionale delle piogge, con una distribuzione degli eventi di piena più significativi in autunno e in tarda primavera, periodo questo in cui ai deflussi contribuisce anche lo scioglimento nivale.

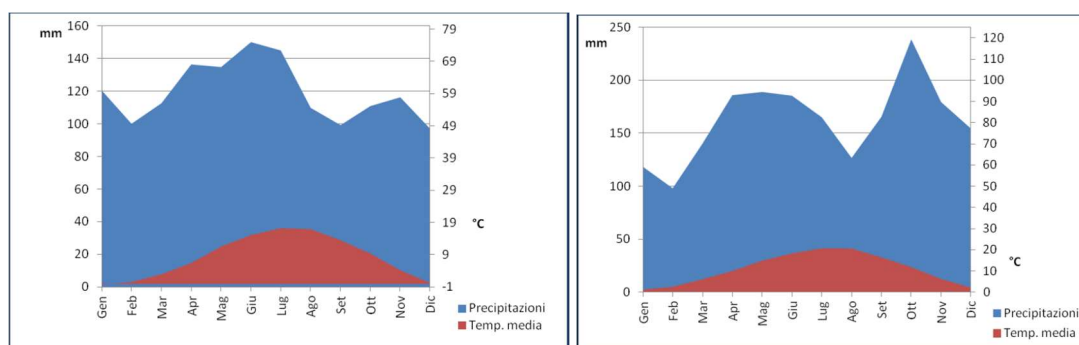


Figura 3.6 Climadiagrammi della stazione di Forni di Sopra (a sinistra) e di Tolmezzo (a destra).

Le linee che compongono il sistema di drenaggio del Tagliamento presentano due aspetti peculiari: la disposizione delle valli lungo direzioni preferenziali ortogonali e la posizione asimmetrica dell'asta fluviale principale, situata nella porzione meridionale del bacino.

Per quanto riguarda il primo aspetto, la gran parte delle valli di 4° ordine sono disposte in direzione Est-Ovest, mentre quelle principali di 5° ordine hanno direzione Nord-Sud. Le prime (longitudinali) seguono le principali linee di cresta delle Alpi centro-orientali; le seconde (trasversali) tagliano con direzione all'incirca meridiana gli assi delle catene montuose. Questa geometria riflette i caratteri geologico-strutturali della regione: infatti le più importanti linee tettoniche presentano uno sviluppo Est-Ovest. L'asimmetria del bacino, invece, è controllata dalla linea tettonica del Tagliamento, sul cui decorso si imposta l'asta fluviale sulla quale confluiscono da nord i principali affluenti: Lumiei, Degano, Vinadia e But.

La struttura del bacino idrografico può essere più oggettivamente analizzata con il criterio proposto da Strahler (1975). Con questo metodo ai vari corsi d'acqua che compongono un bacino idrografico viene assegnato un valore che è tanto più elevato quanto più "importante" è il tratto considerato. Di primo ordine sono i tratti che dalla sorgente arrivano alla prima confluenza e via via gli ordini aumentano a ogni successiva confluenza di segmenti dello stesso ordine. Lo sviluppo del reticolo idrografico è di tipo dendritico, dove i segmenti più piccoli sono i più numerosi e al crescere dell'ordine il numero diminuisce in modo esponenziale fino ad aversi un unico segmento d'ordine massimo (VII) che corrisponde al tratto inferiore del Tagliamento (Tabella 3.2)

Tabella 3.2 Classificazione delle aste del bacino idrografico secondo il criterio di Strahler.

<b>Ordine</b>	<b>Numero di segmenti</b>
I	2184
II	532
III	114
IV	24
V	6
VI	2
VII	1

Analizzando gli affluenti principali (di ordine V e VI) e la percentuale delle superfici dei loro sottobacini rispetto a quello complessivo del Tagliamento, risulta che il Fella ha il valore più alto (Tabella 3.3), seguito per estensione da quello del Degano (si veda anche la Tabella 3.1).

Tabella 3.3 Percentuale della superficie dei bacini più importanti rispetto al bacino del Tagliamento.

<b>Sottobacino</b>	<b>% rispetto al totale</b>
Torrente Arzino	5
Torrente Degano	13.5
Torrente But	7
Torrente Chiarsò	5.5
Fiume Fella	29

### 3.2 La zona oggetto di studio

La zona oggetto di studio (Figura 3.7 e Figura 3.8), per la quale viene effettuata la verifica di compatibilità idraulica (VCI), si situa a valle della confluenza del Fella e del Tagliamento. In particolare, la zona di interesse, interamente contenuta nel territorio comunale di Venzone, si estende per poco più di 3 km dall'abitato di Portis Vecchio a circa 700 m a valle del ponte di Pioverno.

In particolare, la Figura 3.7 illustra la mappa storica del Von Zach (1805) relativamente alla zona oggetto di studio, dalla quale sono visibili i centri abitati di Cavazzo, Amaro e, più a valle, Venzone.

La Figura 3.8 mostra la rappresentazione della pericolosità del vigente PGRA, con evidenziata la zona di interesse, mentre la Figura 3.9 riporta alcune immagini tratte da Google Earth con riferimento all'evoluzione dell'area negli ultimi vent'anni circa.

L'attuale classificazione prevede un'ampia porzione di territorio mappata come P3 in adiacenza all'area fluviale, all'esterno della quale sono presenti zone classificate come P2 e P1. A valle dell'immissione del torrente Venzonassa, l'area P3 rimane in destra idrografica, mentre in sinistra vi è un'estesa area P2 che, poco più a valle, riprende la classificazione P3.

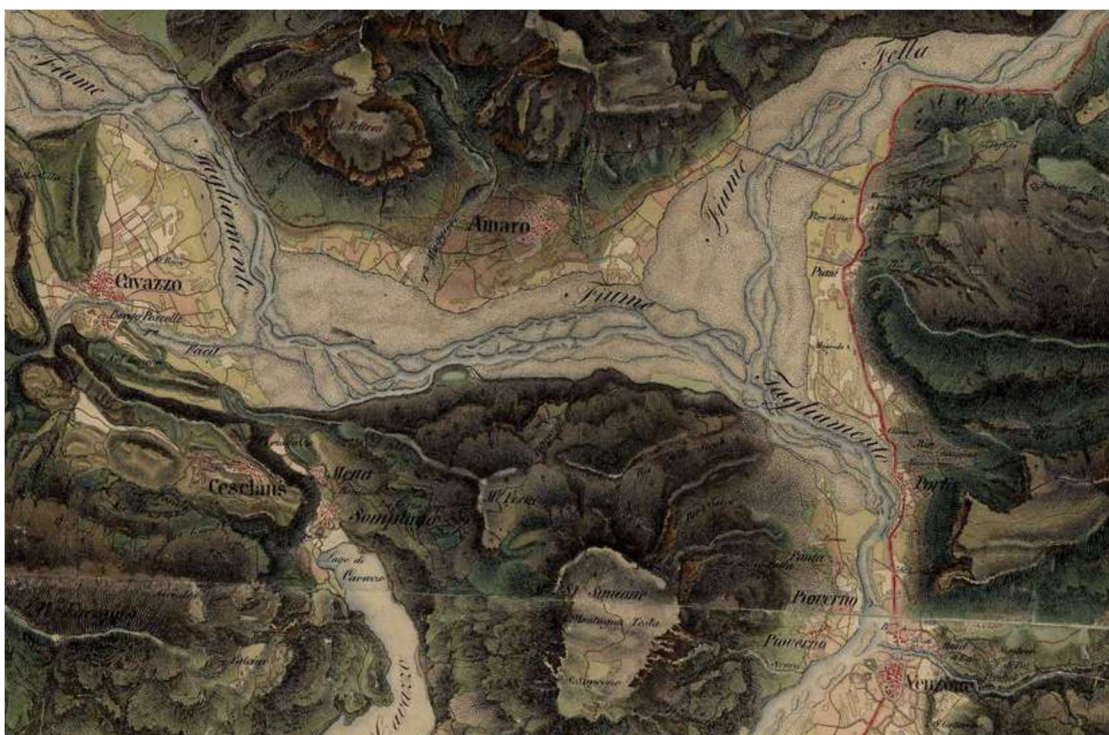


Figura 3.7 Mappa del Von Zach (1805) relativa a Tagliamento e Fella a monte e a valle della confluenza, fino a Venzone.

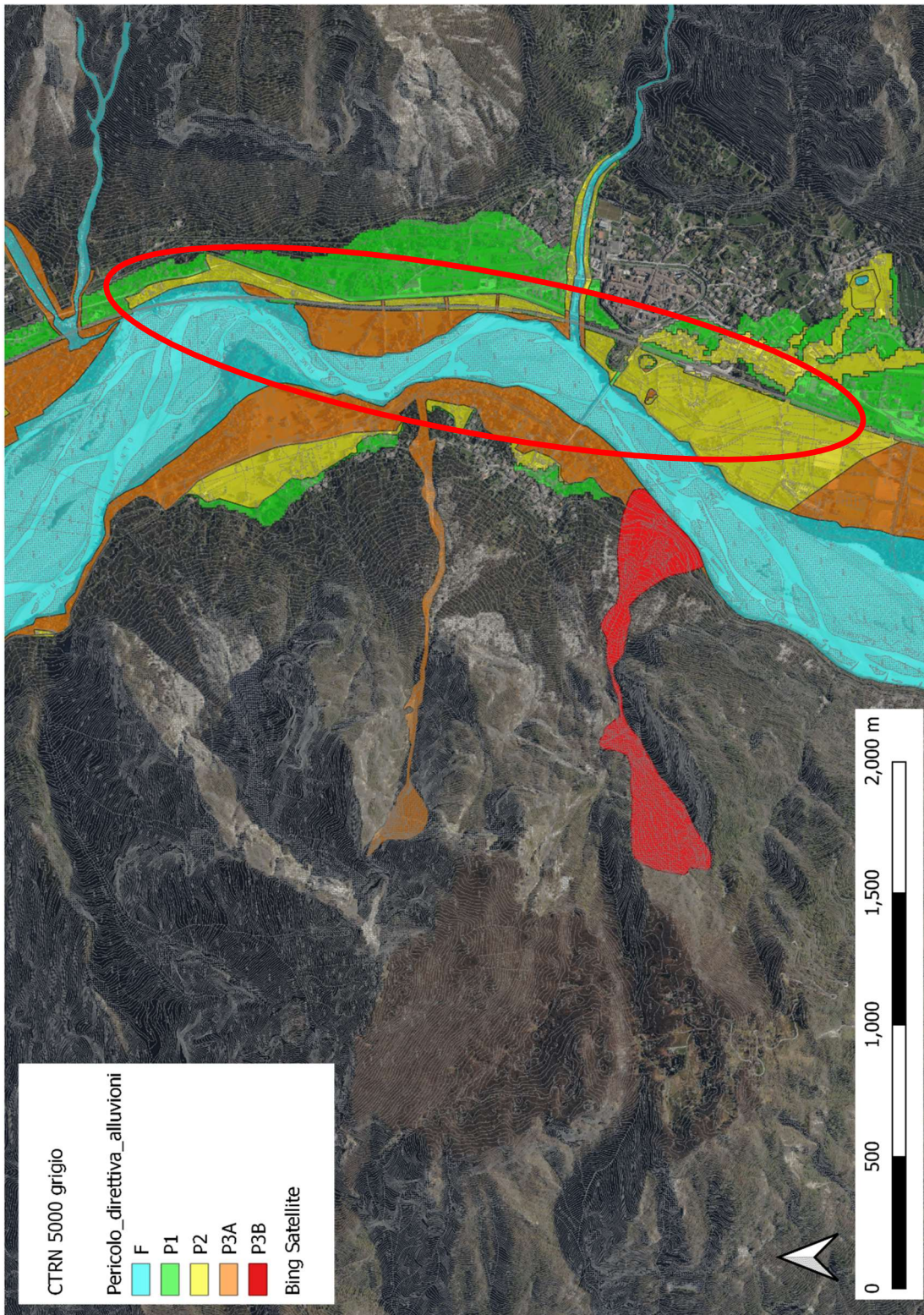


Figura 3.8 Inquadramento generale su mappa della pericolosità del PGRA, con evidenziata la zona di interesse oggetto di verifica di compatibilità idraulica.

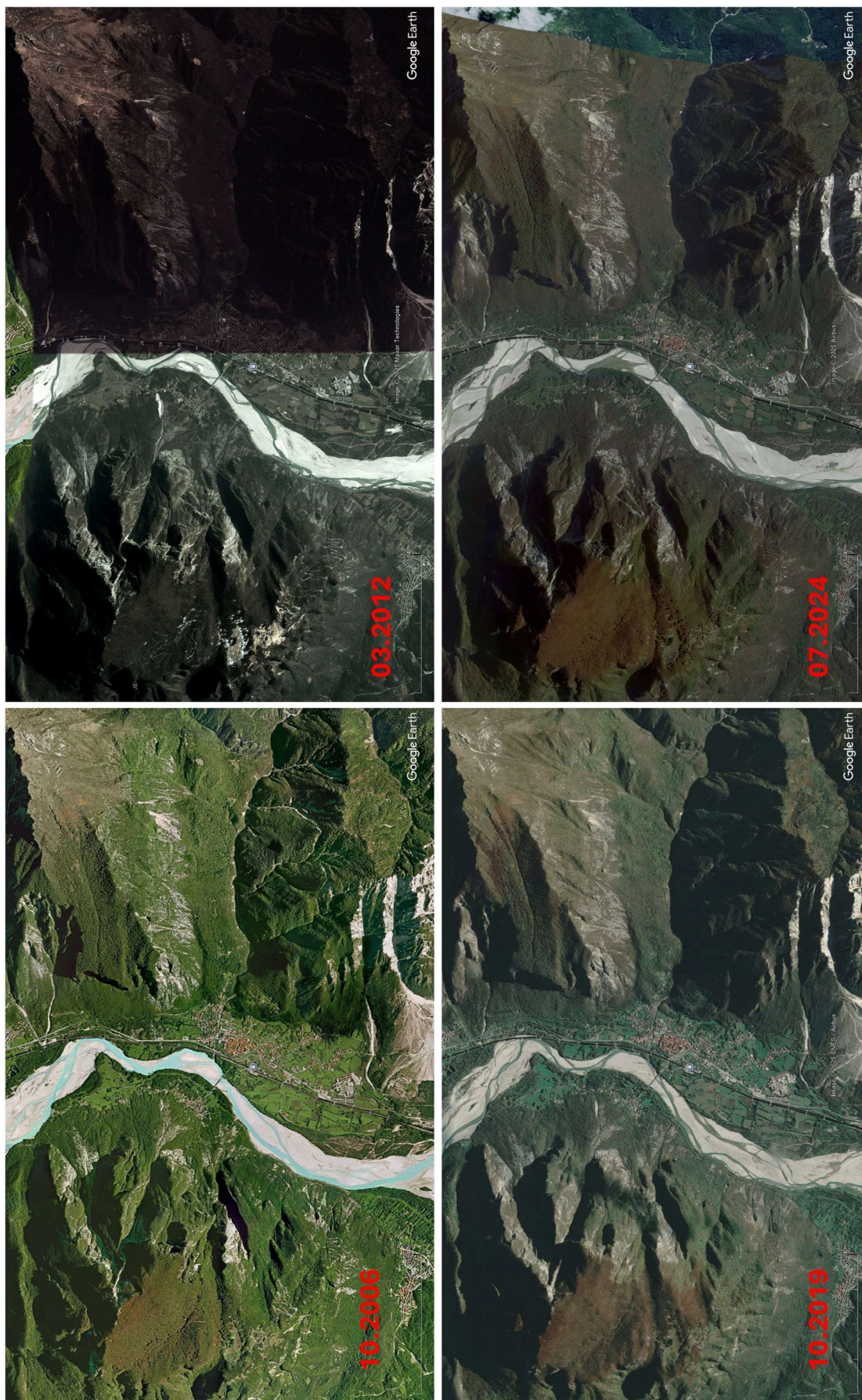


Figura 3.9 Evoluzione 2006-2024 dell'area di interesse in ambito di Venzone (ortofoto Google).

## 4 Sviluppo del modello idrologico

### 4.1 Dati disponibili dalla piattaforma SIGMA

La tipologia di alluvione rientra nella classe ‘torrentizia’, e le analisi idrodinamiche sono state effettuate a scala di evento, in modo da determinare le tendenze evolutive a fronte di una singola piena. Per quel che attiene alla parte idrologica, si sono assunte quali forzanti gli idrogrammi di piena per il tempo di ritorno pari a 100 anni, calcolati a partire dalle elaborazioni effettuate dall’Autorità distrettuale del bacino idrografico delle Alpi Orientali nell’ambito della redazione dell’aggiornamento del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni 2021-2027.

In particolare, gli idrogrammi di piena disponibili direttamente dalla piattaforma SIGMA sono illustrati nella Figura 4.1 ( $T_r = 100$  anni): per quanto riguarda il fiume Tagliamento (curva in arancione), i dati si riferiscono alle portate a monte della confluenza con il Fella, mentre per quest’ultimo è disponibile il relativo idrogramma di piena poco prima della immissione (curva in blu). Se si considera la somma dei due contributi, si ha una portata di picco pari a circa 3600  $m^3/s$  (curva in grigio).

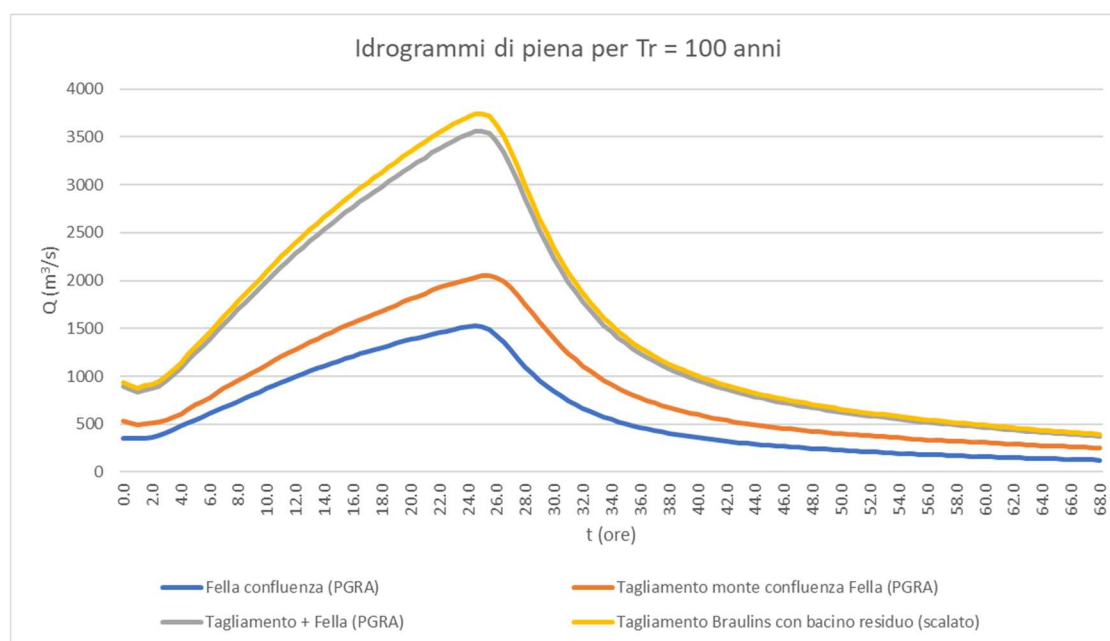


Figura 4.1 Idrogrammi di piena di Tagliamento e Fella per il tempo di ritorno di 100 anni (PGRA 2021-2027).

Le sezioni di ingresso del modello idrodinamico sono in linea con gli idrogrammi di piena illustrati nella Figura 4.1. La sezione di uscita del modello, invece, che è stata posta poco a monte del ponte di Braulins, presenta un bacino contribuente aggiuntivo di circa il 5% rispetto a quello relativo alla confluenza di Fella e Tagliamento. L’idrogramma di piena che si ottiene amplificando del 5% la somma dei primi due è anch’esso indicato nella Figura 4.1, con la curva di colore giallo.

## 4.2 Identificazione bacini idrografici principali per la zona di interesse in relazione alla modellazione idrodinamica

Ai fini delle analisi per la zona di stretto interesse, i principali bacini idrografici sono due, ovvero:

- 1) fiume Tagliamento chiuso a valle della immissione del Fella;
- 2) fiume Tagliamento chiuso a valle di Venzone, incluso il contributo del torrente Venzonassa.

Con riferimento a tali sezioni di chiusura, oltre agli idrogrammi di piena riportati nella sezione precedente, dalla piattaforma SIGMA sono disponibili altri due idrogrammi (si veda la Figura 4.2):

- l'idrogramma relativo all'interbacino fra la confluenza Fella-Tagliamento e il torrente Venzonassa;
- l'idrogramma di piena del t. Venzonassa stesso.

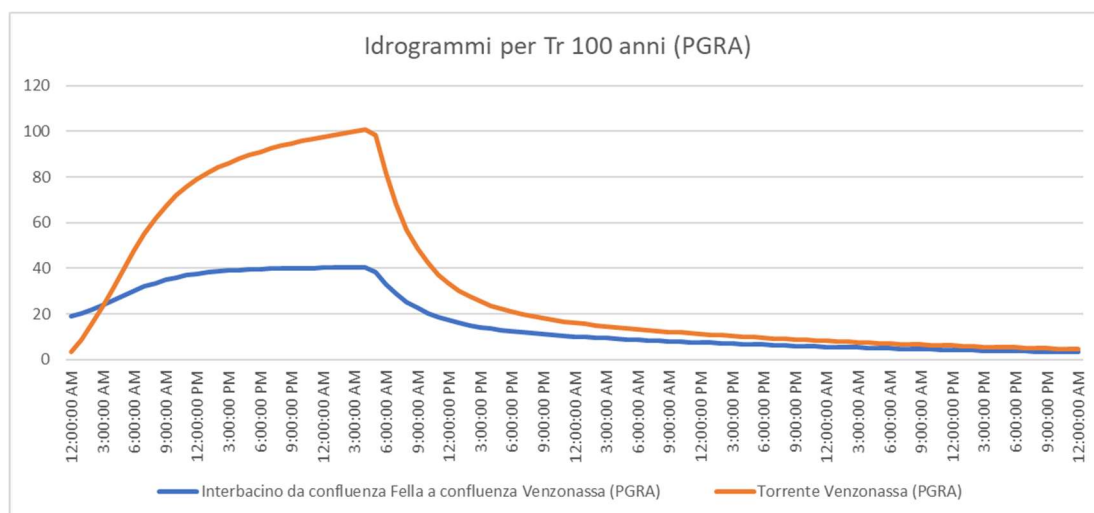


Figura 4.2 Idrogrammi di piena dai dati idrologici della piattaforma SIGMA per il tempo di ritorno di 100 anni (PGRA 2021-2027).

La Figura 4.3 e la Figura 4.4 illustrano l'interfaccia grafica del software Lekan, adottato per le analisi idrologiche, con indicato il contorno e le relative caratteristiche morfometriche principali dei due bacini idrografici del fiume Tagliamento chiusi, rispettivamente, poco a valle dell'immissione del Fella e a monte del ponte di Braulins. In particolare, la sezione poco a monte del ponte di Braulins è stata scelta a fronte della esigenza di porre la condizione al contorno di chiusura molto a valle di Venzone, onde non risentire degli effetti numerici delle condizioni al contorno.

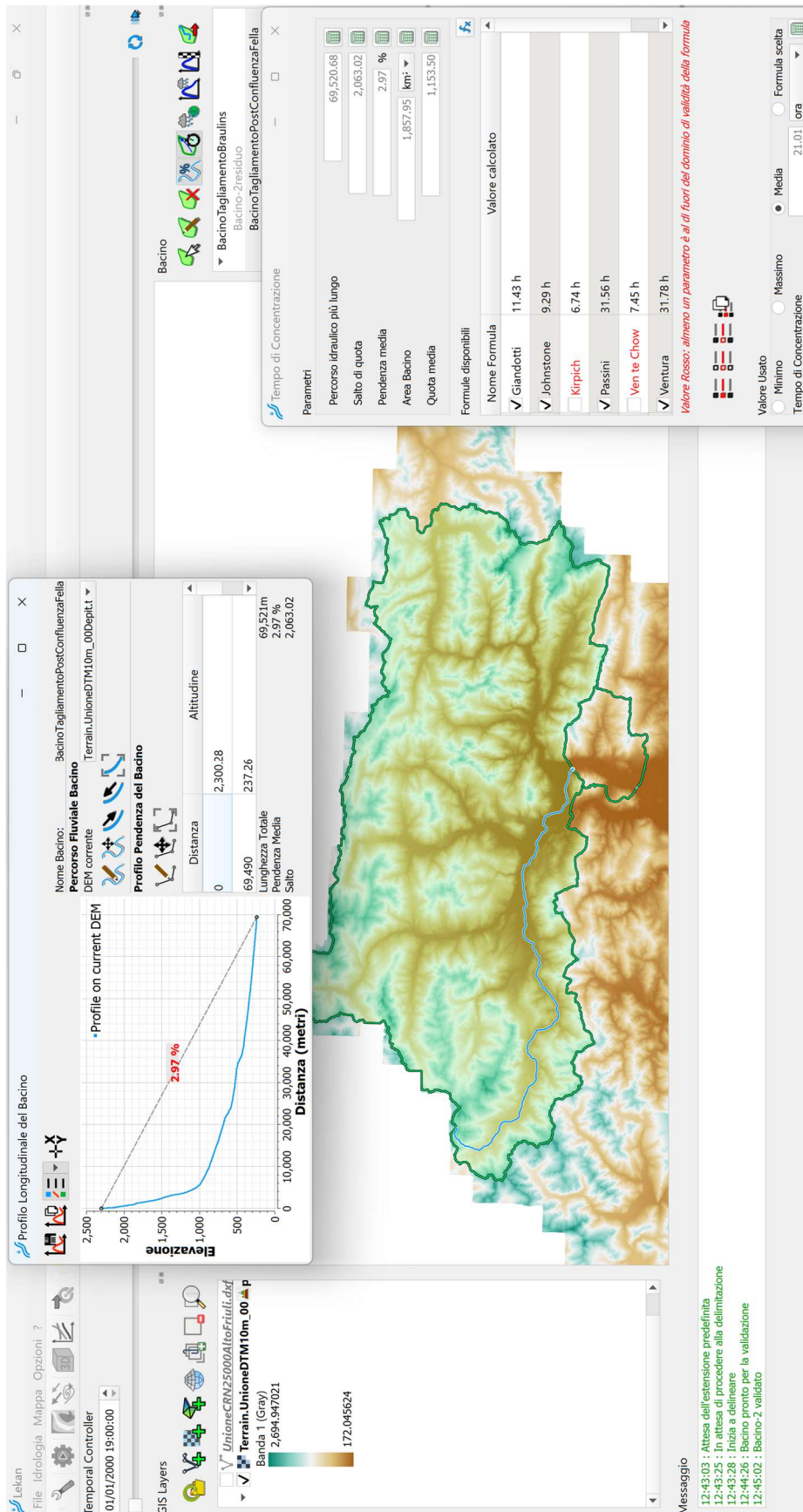


Figura 4.3 Interfaccia grafica del software Lekan con evidenziato il contorno e le relative caratteristiche principali del bacino idrografico del fiume Tagliamento chiuso poco a valle dell'immissione del torrente Fella.

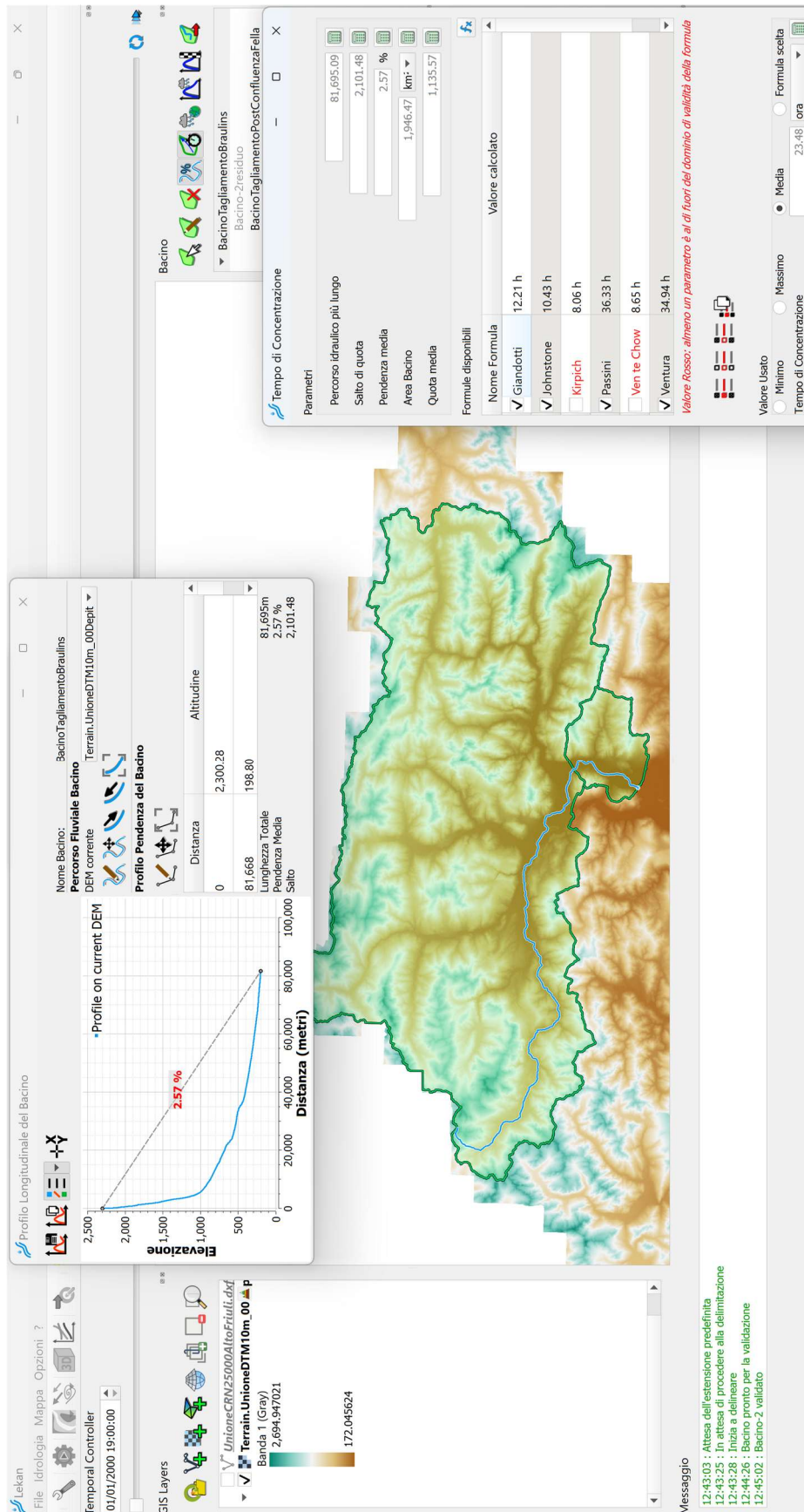


Figura 4.4 Interfaccia grafica del software Lekan con evidenziato il contorno e le relative caratteristiche principali del bacino idrografico del fiume Tagliamento chiuso a monte del ponte di Braulins.

Dalle figure precedenti si può notare come il bacino più a monte ha una superficie di 1858 km<sup>2</sup>, mentre quello a valle 1946 km<sup>2</sup>, con un incremento quindi del 4.73%. Sono anche indicati i rispettivi tempi di corrvazione, calcolati con alcune formule empiriche tipicamente usate in letteratura. E' infine riportato il profilo longitudinale dell'asta principale.

L'esigenza computazionale di far partire il modello idrodinamico a monte della confluenza di Fella e Tagliamento, sempre per non risentire degli effetti numerici delle condizioni al contorno, ha reso necessario valutare anche le caratteristiche dei bacini di Fella e Tagliamento in corrispondenza della rispettiva confluenza. In particolare, l'estensione delle superfici è pari a 1159 km<sup>2</sup> per il Tagliamento e a 699 km<sup>2</sup> per il Fella. La Figura 4.5 riporta tali bacini idrografici e l'ubicazione delle stazioni pluviometriche. Nella figura è inoltre indicata l'estensione spaziale del dominio di calcolo, ovvero della mesh computazionale sulla quale si basa il modello idrodinamico di simulazione.

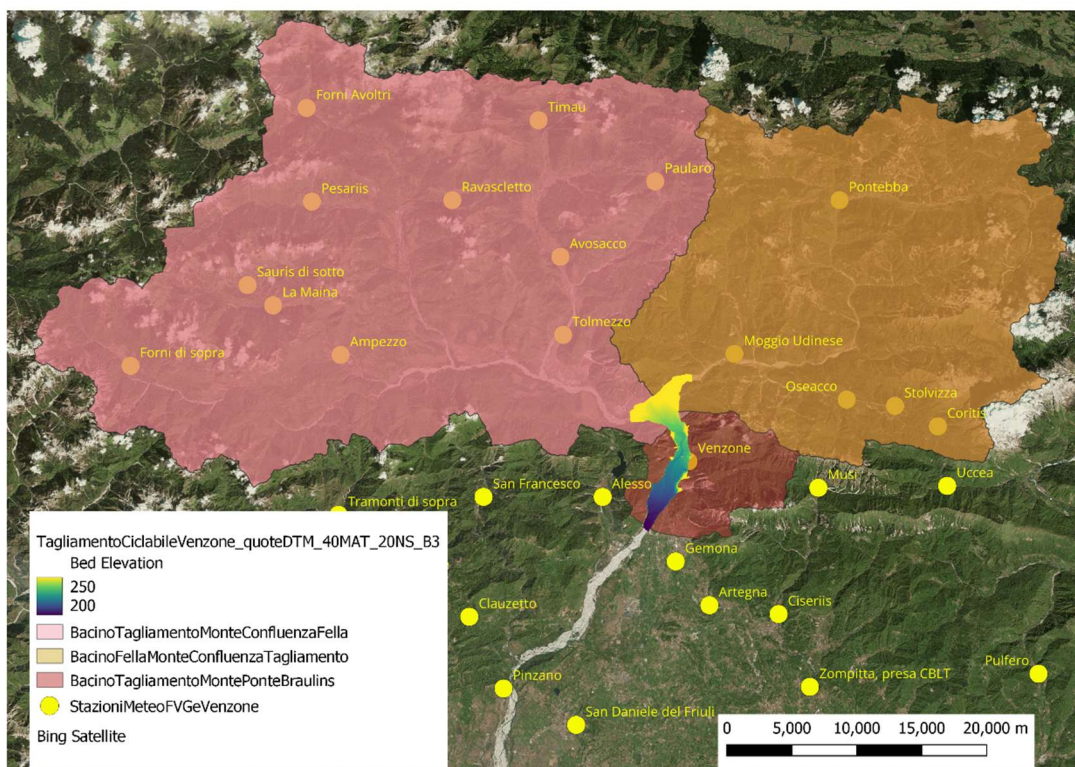


Figura 4.5 Bacini idrografici principali di Fella e Tagliamento, con indicata l'ubicazione delle stazioni pluviometriche e l'area interessata dal dominio di calcolo (mesh computazionale).

## 4.3 Modellazione idrologica

### 4.3.1 Approccio metodologico

Pur essendo disponibili sulla piattaforma SIGMA i dati in corrispondenza di alcune sezioni appartenenti all'area ricoperta dal dominio di calcolo (in particolare Fella e Tagliamento), è stato comunque necessario sviluppare una modellazione idrologica al fine di determinare gli idrogrammi di piena sia per le sezioni in ingresso al modello, che per i principali affluenti che si immettono lungo il tratto di fiume Tagliamento analizzato (torrente Venzonassa).

La modellazione idrologica è stata inoltre fondamentale per individuare idrogrammi di piena maggiormente cautelativi rispetto a quelli presenti in SIGMA, e anche per determinare le portate di picco derivanti da diverse durate di precipitazione e da diverse forme degli idrogrammi, utili per le successive analisi degli eventi *pmax* e *vmax*.

E' bene infatti evidenziare che la somma delle portate di picco di Fella e Tagliamento a monte della confluenza, come desumibili dalla piattaforma SIGMA, è pari a 3563 m<sup>3</sup>/s, mentre l'amplificazione del 5% fornisce il valore di 3741 m<sup>3</sup>/s, con un incremento di circa 180 m<sup>3</sup>/s. Tale approccio fornisce portate di piena leggermente superiori a quelle che si ottengono sommando i due contributi, anch'essi riportati su SIGMA, e derivanti dall'interbacino fra la confluenza del Fella e il Venzonassa e quello del torrente Venzonassa stesso, i cui picchi sono pari rispettivamente a 40 e 100 m<sup>3</sup>/s (si veda la Figura 4.2). La portata aggiuntiva di circa 180 m<sup>3</sup>/s tiene infatti in considerazione anche il contributo dell'interbacino compreso fra il torrente Venzonassa e la sezione di Braulins.

Ciononostante, tutti gli idrogrammi di piena per il bacino del fiume Tagliamento presenti su SIGMA derivano da valutazioni idrologiche fondate sull'ipotesi di idrogramma costante. Lo sviluppo del modello idrologico, basato sul software Lekan, ha quindi permesso di individuare forme di idrogramma maggiormente cautelative.

Il modello idrologico è stato 'calibrato' in modo tale da riprodurre al meglio l'idrogramma di piena (in particolare, la portata di picco) determinabile dalla piattaforma SIGMA e riferito alla sezione di chiusura subito a valle della confluenza del Fella con il Tagliamento.

Le principali caratteristiche del modello idrologico possono essere così riassunte:

- 1) Il modello è di tipo concentrato, dal momento che ai fini dello studio interessa il solo idrogramma di piena nella sezione di chiusura, e che la disponibilità dell'idrogramma SIGMA ne permette la calibrazione.
- 2) La curva di possibilità pluviometrica è stata definita per un 'pluviometro equivalente', i cui parametri statistici *a* e *n* sono stati ricavati effettuando una media pesata dei relativi parametri sui vari pluviometri appartenenti al bacino del Tagliamento e a quello del Fella (Figura 4.6).

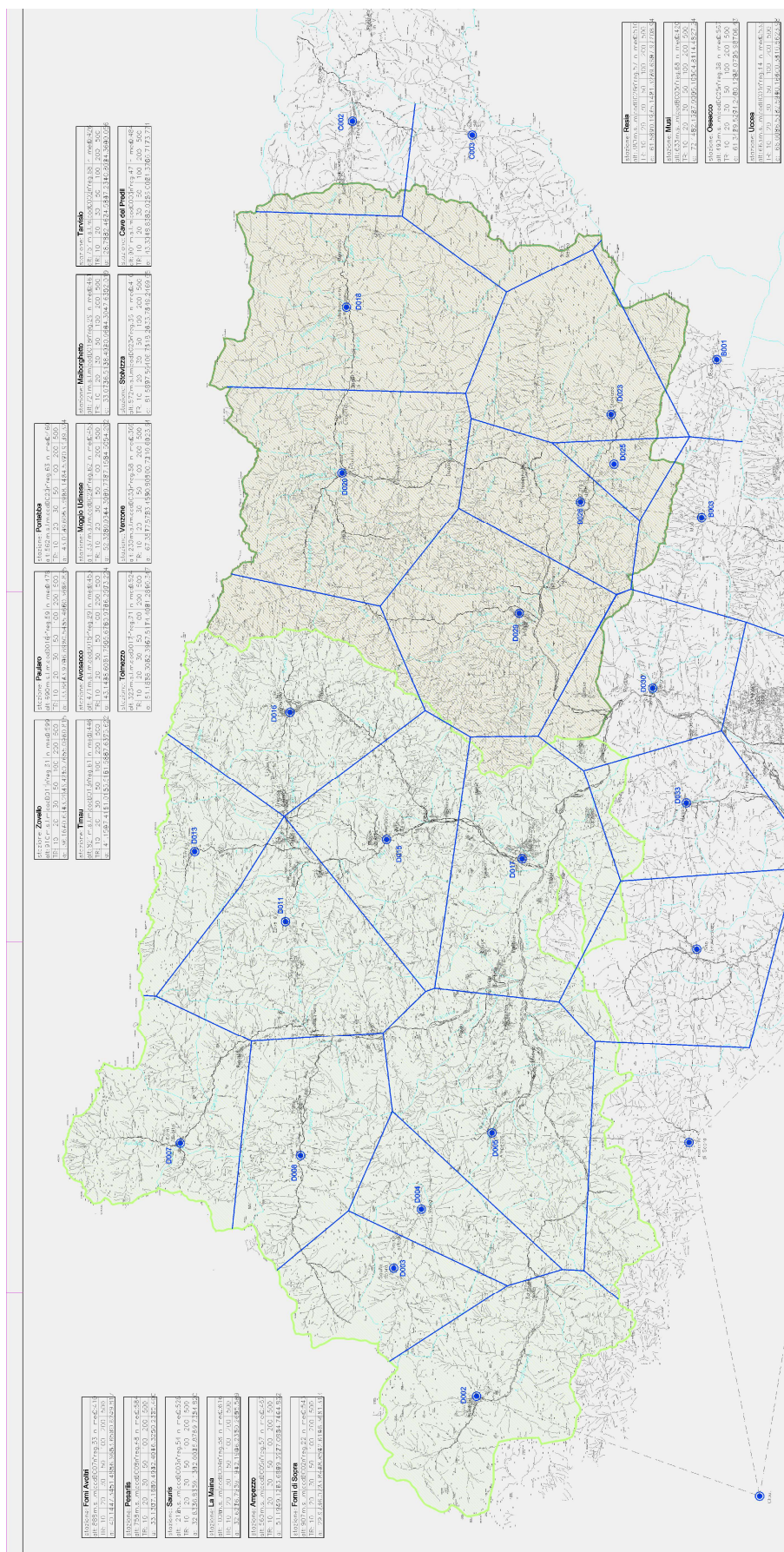


Figura 4.6 Stazioni pluviometriche e topiети del bacino idrografico dell'alto Tagliamento e del Fella.

- 3) Ai fini della sola calibrazione, gli eventi pluviometrici fanno riferimento a ietogrammi costanti, in linea con quelli adottati per le elaborazioni dall'Autorità di Distretto.
- 4) Sempre ai fini di calibrazione, la determinazione delle perdite idrologiche viene effettuata basandosi sul metodo del CN, il cui valore medio è stato assunto pari a 45.
- 5) Il metodo di trasformazione afflussi-deflussi si basa sull'idrogramma istantaneo unitario del Soil Conservation Service (IUH-SCS).

La Figura 4.7 riporta l'andamento altimetrico, mentre la Figura 4.8 la mappa dei valori del coefficiente CN di classe 2.

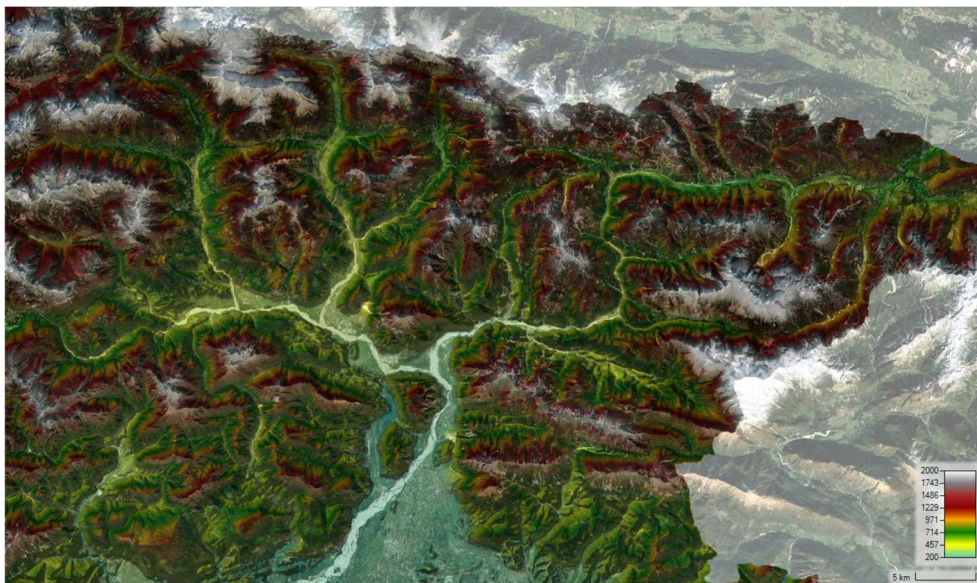


Figura 4.7 Inquadramento generale del DTM dell'alto Tagliamento.

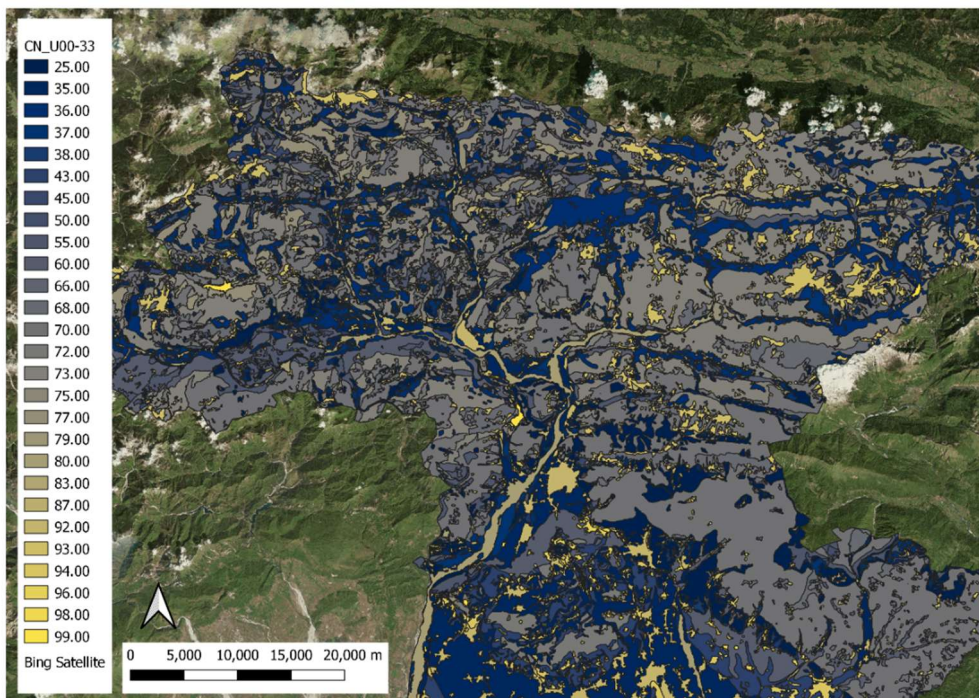


Figura 4.8 Mappa del coefficiente CN-II nella zona dell'alto Tagliamento e Fella.

### 4.3.2 Calibrazione del picco di piena e individuazione della forma di ietogramma più cautelativo

La calibrazione del modello idrologico fa riferimento alla sezione di chiusura a valle della confluenza fra Fella e Tagliamento, il cui idrogramma è stato ottenuto sommando i contributi dei due idrogrammi presenti in SIGMA (si veda anche la Figura 4.1).

La calibrazione deve essere intesa come la ricerca dei parametri dell'IUH-SCS che meglio permettano di riprodurre il valore di picco dell'idrogramma SIGMA, fermo restando la durata della pioggia e la forma di ietogramma. Questo significa che il volume di piena dell'idrogramma, posto che il picco ne venga riprodotto, non può essere inferiore a quello SIGMA.

La Figura 4.9 riporta il confronto fra l'idrogramma PGRA (in grigio) e quelli determinati con il modello idrologico implementato ad hoc, a partire da precipitazioni caratterizzate da diversa forma dello ietogramma. In particolare, sono stati analizzati quello costante (rappresentato in verde), quello monotono crescente (in azzurro) e quello a blocchi alterni (in viola).

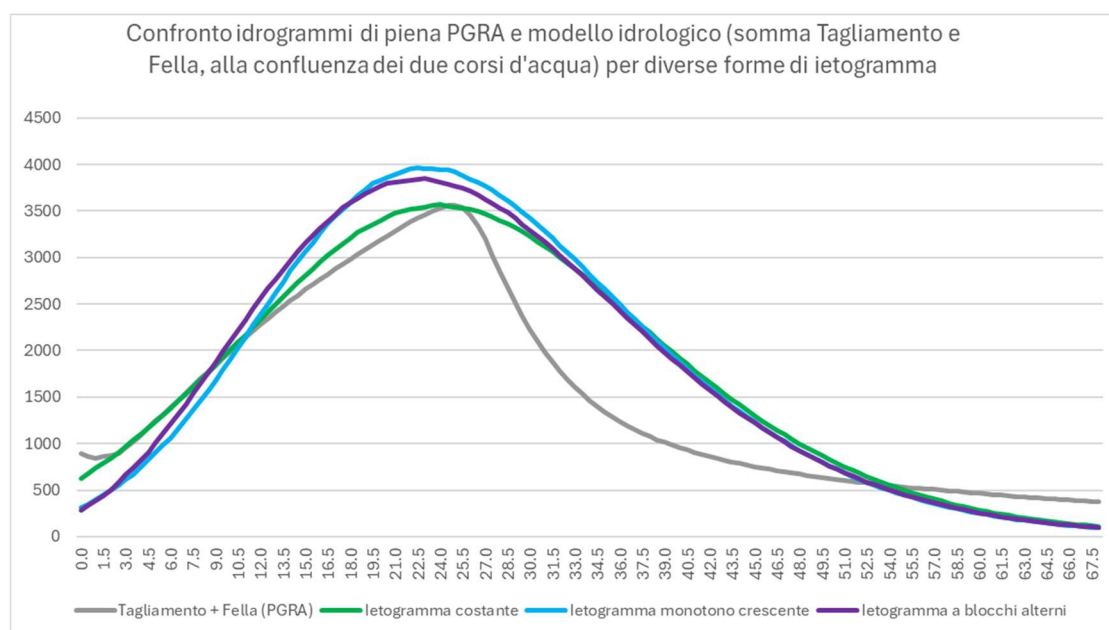


Figura 4.9 Idrogrammi di piena per  $T_r = 100$  anni in corrispondenza della confluenza Fella-Tagliamento: con il colore grigio rappresentato quello desumibile dalla piattaforma SIGMA, mentre quelli con i colori verde, azzurro e viola sono stati ottenuti con il modello idrologico a partire da diverse forme di ietogramma, rispettivamente, costante, monotono crescente e a blocchi alterni

Dalla figura si può quindi dedurre come l'idrogramma di piena derivante da una precipitazione costante sia in grado di riprodurre il picco di quello del PGRA, mentre l'idrogramma di piena derivante dallo ietogramma monotono crescente determini le condizioni maggiormente cautelative, per lo meno per il caso in esame.

### 4.3.3 Campionamento per sedimentogrammi

Preliminarmente alla identificazione degli eventi  $p_{max}$  e  $v_{max}$ , è necessario disporre dei dati relativi alla granulometria dell'alveo. A tal fine, è stato effettuato un campionamento ubicato come indicato nella Figura 4.10, a valle della confluenza fra Fella e Tagliamento, finalizzato all'analisi del materiale del letto.



Figura 4.10 Ubicazione del punto di campionamento a valle della confluenza fra Fella e Tagliamento.

Tale attività è stata eseguita in accordo con il cosiddetto “metodo numerale di campionamento in linea (*transect line*)”, consistente nel campionare lungo un transetto di 50 m un sedimento ogni 0.5 m, e registrando la dimensione intermedia<sup>1</sup> del grano, come indicato in Figura 4.11.



Figura 4.11 Esempio di misura di un sedimento in alveo.

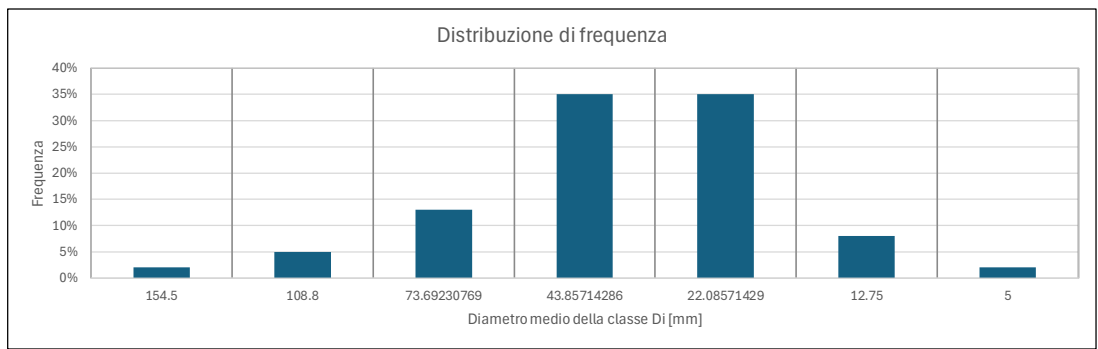
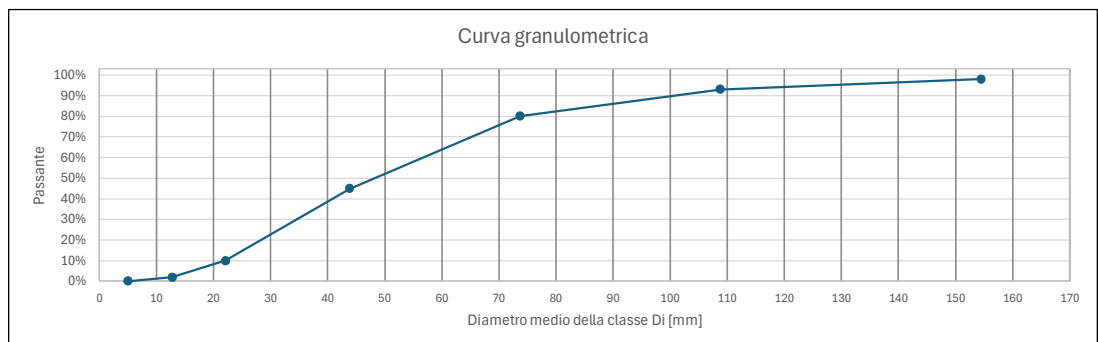
La Figura 4.12 riporta i risultati ottenuti dal campionamento.

<sup>1</sup> Si approssima la forma del ciottolo a quella di un ellissoide di dimensioni  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Si indicano convenzionalmente con "a" il diametro massimo, con "b" quello intermedio e con "c" quello minore. Il diametro di riferimento per la classificazione granulometrica è il diametro intermedio "b".

**Tagliamento confluenza Fella  
(a valle dell'immissione)**

Classificazione	Lim. Sup. [mm]	Lim. Inf. [mm]	N°	Diametro medio della classe D <sub>i</sub> [mm]	N° ciottoli trattenuti NT	N° ciottoli passanti NP	Passante	Frequenza relativa	Prodotti
Massi molto grossi	<4096	>=2896	0	-	0	100	100.00%	0.00%	-
Massi molto grossi	<2896	>=2048	0	-	0	100	100.00%	0.00%	-
Massi grossi	<2048	>=1448	0	-	0	100	100.00%	0.00%	-
Massi grossi	<1448	>=1024	0	-	0	100	100.00%	0.00%	-
Massi medi	<1024	>=724	0	-	0	100	100.00%	0.00%	-
Massi medi	<724	>=512	0	-	0	100	100.00%	0.00%	-
Massi piccoli	<512	>=362	0	-	0	100	100.00%	0.00%	-
Massi piccoli	<362	>=256	0	-	0	100	100.00%	0.00%	-
Ciottoli grossi	<256	>=181	0	-	0	100	100.00%	0.00%	-
Ciottoli grossi	<181	>=128	4	146	4	96	96.00%	4.00%	5.82
Ciottoli piccoli	<128	>=90	11	113	15	85	85.00%	11.00%	12.38
Ciottoli piccoli	<90	>=64	16	73	31	69	69.00%	16.00%	11.76
Ghiaia molto grossa	<64	>=32	26	44	57	43	43.00%	26.00%	11.45
Ghiaia grossa	<32	>=16	29	24	86	14	14.00%	29.00%	6.89
Ghiaia media	<16	>=8	10	12	96	4	4.00%	10.00%	1.20
Ghiaia fine	<8	>=4	1	5	97	3	3.00%	1.00%	0.05
Ghiaia molto fine	<4	>=2	3	2	100	0	0.00%	3.00%	0.06
Sabbia molto grossa	<2	>=1.4	0	-	100	0	0.00%	0.00%	-
Sabbia grossa	<1.4	>=0.5	0	-	100	0	0.00%	0.00%	-
Sabbia da media a molto fine	<0.5	>=0.06	0	-	100	0	0.00%	0.00%	-
Limo	<0.06	>=0.004	0	-	100	0	0.00%	0.00%	-
Argilla	<0.04	>=0.002	0	-	100	0	0.00%	0.00%	-
		NC	100				OK	100.00%	
		OK							

**D<sub>m</sub> [mm]= 49.6**



n	d (mm)	n	d (mm)	n	d (mm)	n	d (mm)	n	d (mm)	n	d (mm)	n	d (mm)	n	d (mm)
1	34	16	46	31	112.5	46	50	61	23	76	105	91	105		
2	12	17	11	32	126	47	15	62	79	77	49	92	5		
3	22	18	29	33	46	48	22.5	63	20	78	12	93	29		
4	30	19	87.5	34	120	49	57	64	92	79	73	94	24		
5	18.5	20	22	35	54	50	43	65	29	80	60	95	21		
6	78.5	21	44	36	145	51	121.5	66	56	81	36.5	96	25.5		
7	146	22	38	37	92	52	19.5	67	16	82	64.5	97	64.5		
8	12	23	29.5	38	20	53	38.5	68	71	83	9	98	20		
9	15	24	23.5	39	24.5	54	16	69	151	84	27	99	11		
10	32.5	25	33	40	2	55	89.5	70	124	85	64	100	59		
11	140	26	52	41	16	56	45.5	71	42	86	46				
12	31.5	27	2	42	69	57	88	72	40.5	87	12				
13	21	28	29	43	71	58	35.5	73	69.5	88	64.5				
14	122	29	41.5	44	66	59	117.5	74	28	89	2				
15	76	30	21.5	45	32	60	33.5	75	11	90	30.5				

Figura 4.12 Risultati del campionamento in alveo per il fiume Tagliamento a valle della immissione del Fella.

#### 4.3.4 Determinazione degli idrogrammi $p_{max}$ e $v_{max}$

Nella successiva fase di identificazione degli idrogrammi  $p_{max}$  e  $v_{max}$  è stato adottato un approccio maggiormente cautelativo, assumendo la metodologia basata sul coefficiente di afflusso in luogo di quella del CN ai fini della determinazione delle perdite idrologiche.

La Figura 4.13 riporta l'insieme dei risultati ottenuti. In particolare, con i tratti a spessore sottile sono riportati gli idrogrammi di piena determinati a partire dallo ietogramma monotono crescente (in particolare l'idrogramma  $p_{max}$ , in rosso, e quello  $v_{max}$ , in verde, che sono maggiormente evidenziati), mentre con tratti a spessore grosso quelli ricavati a partire dallo ietogramma a blocchi alterni.

Nella parte alta della figura sono indicati sia i valori della portata di picco che quelli del volume solido complessivamente movimentato, in funzione della durata dell'evento (si veda anche la Tabella 4.1).

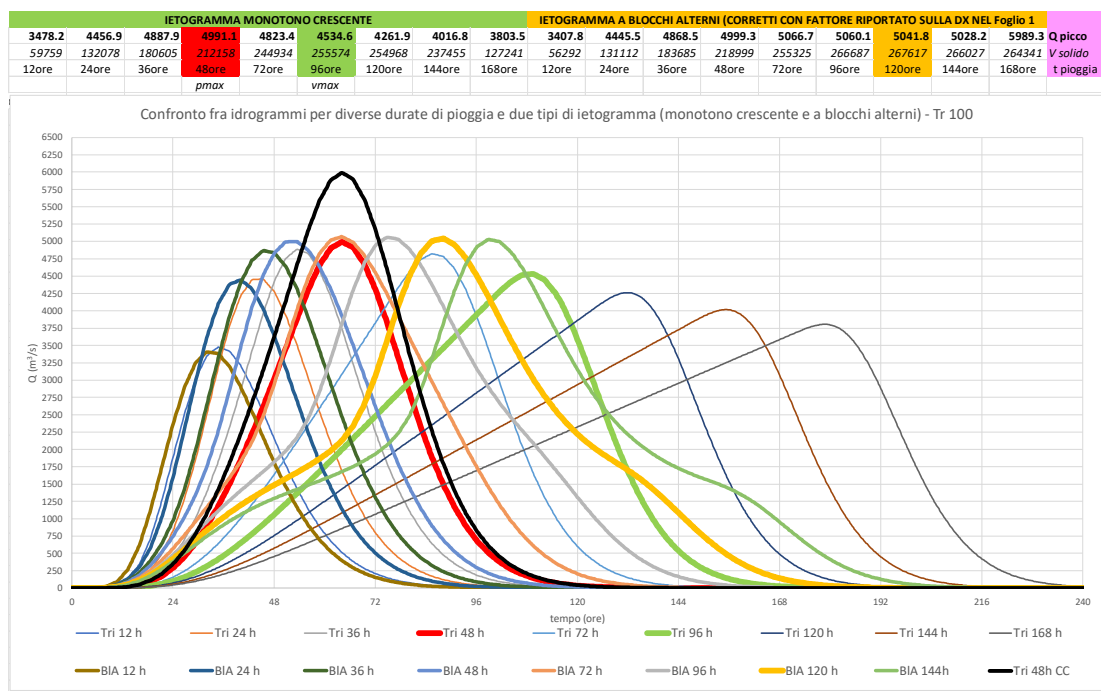


Figura 4.13 Idrogrammi di piena per  $Tr = 100$  anni per la sezione di chiusura a valle della confluenza fra Fella e Tagliamento e per diverse durate di precipitazione: con i tratti sottili sono indicati quelli ottenuti a partire dallo ietogramma monotono crescente (eccezione fatta per quello  $p_{max}$  e  $v_{max}$ , evidenziati in rosso e in verde), mentre con i maggiori spessori sono indicati quelli ottenuti a partire dallo ietogramma a blocchi alterni. L'idrogramma rappresentato con il colore nero è quello  $p_{max}$  ottenuto dallo ietogramma monotono crescente amplificato del 20%, per tenere in considerazione gli effetti del cambiamento climatico in atto.

Il modello idrodinamico ha inizialmente assunto quali eventi  $p_{max}$  e  $v_{max}$  gli idrogrammi derivanti dallo ietogramma monotono crescente riportati in rosso e in verde nella Figura 4.13.

La Tabella 4.1 riporta sinteticamente i risultati ottenuti, dai quali si può desumere come l'evento associato all'idrogramma  $v_{max}$  sia quello avente durata pari a 96 ore.

Tabella 4.1 Ietogramma monotono crescente: risultati sintetici per la determinazione degli idrogrammi  $p_{max}$  e  $v_{max}$ .

Durata evento (ore)	Portata di picco (m <sup>3</sup> /s)	Volume trasportato (m <sup>3</sup> )	Durata evento (ore)	Portata di picco (m <sup>3</sup> /s)	Volume trasportato (m <sup>3</sup> )
12	3478.2	59'759	96	4534.6	255'574
24	4456.9	132'078	120	4261.9	254'968
36	4887.9	180'605	144	4016.8	237'455
48	4991.1	212'158	168	3803.5	127'241
72	4823.4	244'934			

A fronte della calibrazione effettuata con il modello idrodinamico a fondo mobile, in base al confronto con le mappe dei tiranti e della pericolosità del PGRA, è però successivamente emerso come l'idrogramma  $p_{max}$  che meglio riproduce tali tavole è quello derivante dal precedente con un incremento del 20%, valore che può essere giustificato per via degli inevitabili incrementi delle forzanti idrologiche a causa dei cambiamenti climatici in atto.

Anche ai fini cautelativi, nelle simulazioni è stato quindi assunto, con riferimento all'evento  $p_{max}$ , l'idrogramma rappresentato in nero nella Figura 4.13. Dal momento che gli effetti conseguenti ai cambiamenti climatici si ripercuotono sugli eventi di durata inferiore, l'idrogramma  $v_{max}$  non è stato invece amplificato.

#### 4.3.5 Sintesi dei risultati ottenuti

Ai fini della modellazione idrodinamica, è stato necessario ripartire l'idrogramma di piena 'complessivo' nei principali contribuenti, cioè Tagliamento e Fella, nonché del contributo del Venzonassa.

Tale operazione è stata effettuata scalando proporzionalmente l'idrogramma totale in relazione all'estensione dei rispettivi bacini idrografici, ovvero, 59.56 % (Tagliamento), 35.92 % (Fella) e 4.52 % (Venzonassa, incluso il bacino residuo).

La Figura 4.14 e la Figura 4.15 riportano gli idrogrammi di piena così ottenuti con riferimento agli eventi  $p_{max}$  e  $v_{max}$  per il tempo di ritorno di 100 anni per il Tagliamento, Fella e Venzonassa. Si noti che nella Figura 4.14 sono presenti anche gli idrogrammi con il suffisso 'CC' (*climate change*), ovvero quelli di tipo  $p_{max}$  incrementati del 20%, che sono quelli impiegati quali condizioni al contorno per il modello idrodinamico a fondo mobile.

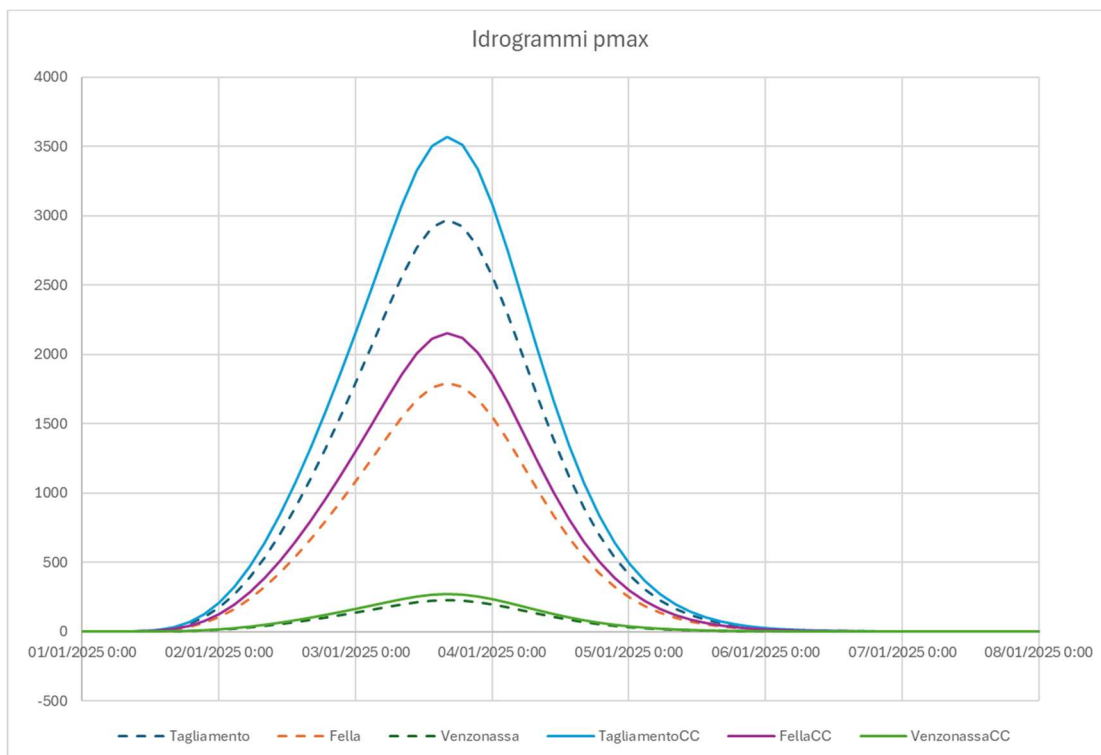


Figura 4.14 Idrogrammi  $p_{max}$  di Tagliamento, Fella e Venzonassa: quelli con il suffisso 'CC' (*climate change*) sono stati adottati quali condizioni al contorno della modellazione idrodinamica a fondo mobile per  $Tr = 100$  anni, contemplando l'effetto dei cambiamenti climatici.

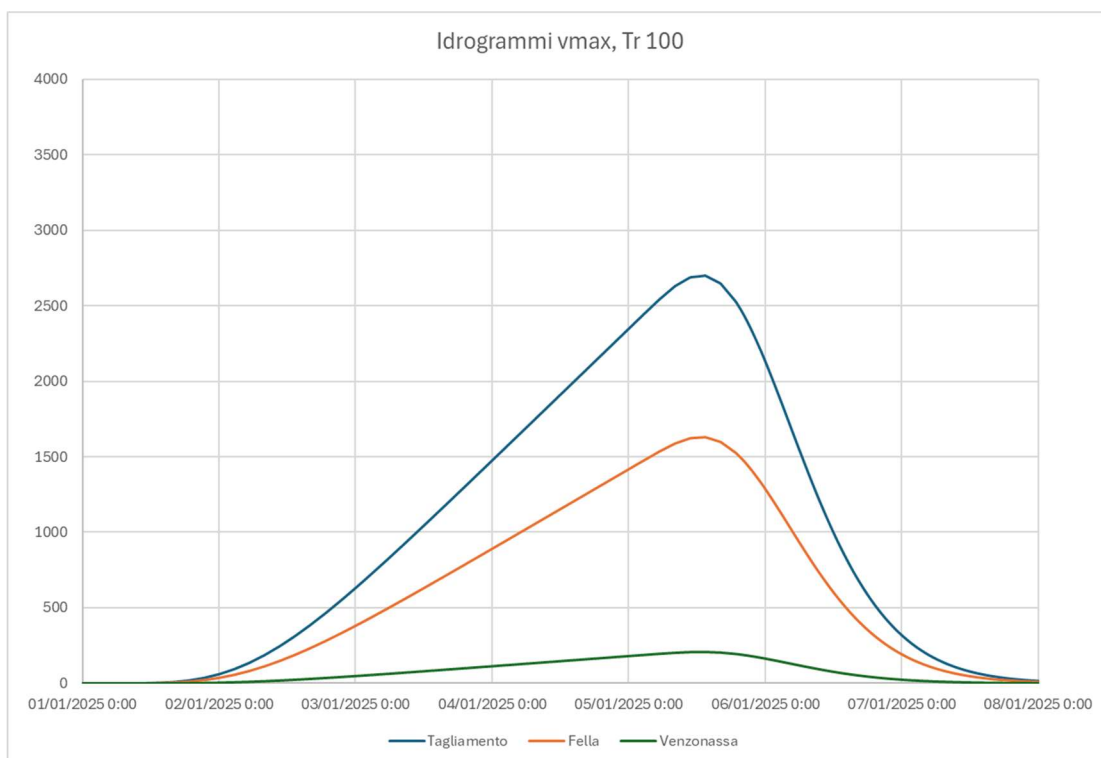


Figura 4.15 Idrogrammi  $v_{max}$  di Tagliamento, Fella e Venzonassa, adottati quali condizioni al contorno della modellazione idrodinamica a fondo mobile per  $Tr = 100$  anni.

## 5 Sviluppo del modello idrodinamico di simulazione

In questa sezione è descritta la procedura adottata per la realizzazione del modello idrodinamico bidimensionale sviluppato con il software BASEMENT<sup>2,3</sup>, un ambiente di modellazione numerica ai volumi finiti messo a punto dal laboratorio di Idraulica del Politecnico di Zurigo. La versione sviluppata inizialmente, ovvero la 2.8 del maggio 2018, pur essendo caratterizzata da maggiore versatilità nell'utilizzo (permette la gestione di mesh non strutturate e miste triangolari-quadrangolari) si è dimostrata decisamente meno performante della release 3.2 del maggio 2022: quest'ultima versione è stata infatti resa molto più efficiente dal punto di vista computazionale, permettendo l'analisi di vari scenari con tempi di calcolo molto più contenuti<sup>4</sup>.

Nei paragrafi che seguono vengono descritte la componente idrodinamica del software e le caratteristiche del dominio di calcolo; sono quindi illustrate le caratteristiche della mesh e i dati in input (idrogrammi di piena, caratteristiche dei sedimenti e coefficienti di scabrezza).

Nella sezione successiva sono invece descritte le caratteristiche delle simulazioni e le mappe relative agli involucri dei campi idrodinamici (profondità dell'acqua e velocità della corrente) con riferimento agli scenari di maggior interesse, ovvero alle situazioni conseguenti al transito della massima piena con  $Tr = 100$  anni.

### 5.1 Il modello basato sul software BASEMENT

#### Forma conservativa delle *Shallow Water Equations* (SWE)

Il modulo idrodinamico del software BASEMENT integra le SWE riscritte secondo la cosiddetta forma conservativa, nella quale le variabili indipendenti sono  $(h, uh, vh)$ , che si ottiene moltiplicando l'equazione di continuità per le componenti della velocità,  $u$  e  $v$ , mediate sulla verticale, e aggiungendo i relativi membri alle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo  $x$  e  $y$ . Questo set di equazioni si può scrivere in modo compatto come:

$$U_t + \nabla \cdot (F, G) + S = 0$$

dove  $U$ ,  $Q$  e  $S$  rappresentano i vettori delle variabili primitive, dei flussi nelle direzioni  $x$  e  $y$ , e dei termini sorgente, rispettivamente dati da:

---

<sup>2</sup> BASEMENT version 2.8: System Manuals, Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich (May 2018), <http://www.basement.ethz.ch>

<sup>3</sup> BASEMENT version 3.2: System Manuals, Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich (May 2022), <http://www.basement.ethz.ch>

<sup>4</sup> A partire dal febbraio 2023 è stata rilasciata la versione 4 del software, che integra in un'unica interfaccia grafica le funzionalità della versione 2 e della 3.

$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 - vh \frac{\partial u}{\partial x} \\ uvh - vh \frac{\partial u}{\partial y} \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} vh \\ uvh - vh \frac{\partial v}{\partial x} \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 - vh \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{fx} - S_{Bx}) \\ gh(S_{fy} - S_{By}) \end{pmatrix}$$

### Termini sorgente

Due sono le tipologie di termini sorgente: quelli dovuti all'attrito sul fondo e quelli dovuti alla pendenza dell'alveo. L'attrito al fondo rappresenta uno dei parametri fisici più importanti nelle simulazioni idrodinamiche e morfodinamiche bidimensionali: non solo questo causa la turbolenza ed è responsabile del trasporto solido, ma ha anche un effetto non-lineare di ritardo sul campo di moto. Lo sforzo tangenziale viene quasi sempre determinato ricorrendo a formule empiriche dal momento che non si può conoscere a priori la distribuzione effettiva delle velocità lungo la verticale. Nel caso monodimensionale, il termine dovuto all'attrito al fondo può essere espresso come  $gRS_f$ , dove  $R$  rappresenta il raggio idraulico e con  $S_f$  si indica la pendenza della linea dell'energia, che si può scrivere, in accordo con l'equazione di Manning del moto uniforme, come:

$$S_f = \frac{n^2 u |u|}{R^{4/3}}$$

in cui  $n$  è il coefficiente di scabrezza di Manning.

Estendendo il ragionamento al caso bidimensionale, assumendo un raggio idraulico pari alla profondità,  $R = h$ , si ottengono le componenti del termine  $S_f$  lungo le due direzioni del moto:

$$S_{fx} = n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad S_{fy} = n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3}$$

Per quel riguarda i termini sorgente relativi alla pendenza dell'alveo, questi sono dati rispettivamente da:

$$S_{B,x} = -\partial z_B / \partial x \quad S_{B,y} = -\partial z_B / \partial y$$

## Condizioni al contorno

I contorni fisici di un sistema fluido possono essere essenzialmente di due tipi: contorni di tipo chiuso ( $\Gamma_c$ ) e di tipo aperto ( $\Gamma_o$ ). Il primo tipo indica un tipo di contorno dove non c'è flusso di massa attraverso di esso, mentre il secondo tipo indica un'interfaccia immaginaria fluido-fluido e comprende due differenti tipologie di flusso in ingresso (*inflow* o *inlet*) e in uscita (*outflow* o *outlet*).

### Contorno di tipo chiuso

In un tale contorno,  $\Gamma_c$ , vengono generalmente prescritte le seguenti relazioni:

$$\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0; \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}} = 0$$

dove  $\mathbf{n}$  e  $\mathbf{u}$  rappresentano la normale diretta verso l'esterno del dominio,  $\Gamma_c$ , e il vettore velocità ( $u, v$ ).

### Contorno di tipo aperto

Dal punto di vista matematico, le equazioni alle acque basse rappresentano un sistema di equazioni alle derivate parziali quasi-lineare. Se si eliminano i termini contenenti le derivate temporali, il sistema è ellittico se il numero di Froude è inferiore a 1, iperbolico se maggiore.

Su un contorno di tipo aperto,  $\Gamma_o$ , i tipi di inflow e outflow possono essere distinti come segue:

$$\Gamma_{in} = (x \in \Gamma_o; \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} < 0)$$

$$\Gamma_{out} = (x \in \Gamma_o; \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} > 0)$$

Il numero corretto di condizioni al contorno di tipo aperto da porre quando si risolvono le SWE può essere desunto dalla seguente tabella:

Tipo di moto	Numero di condizioni al contorno	
	<i>Inflow</i>	<i>Outflow</i>
<i>Subcritico</i>	2	1
<i>Supercritico</i>	3	0

## 5.2 Dominio computazionale e creazione della mesh di calcolo

### 5.2.1 Estensione e caratteristiche del dominio di calcolo

La Figura 5.1 illustra l'inquadramento del tratto oggetto di modellazione.

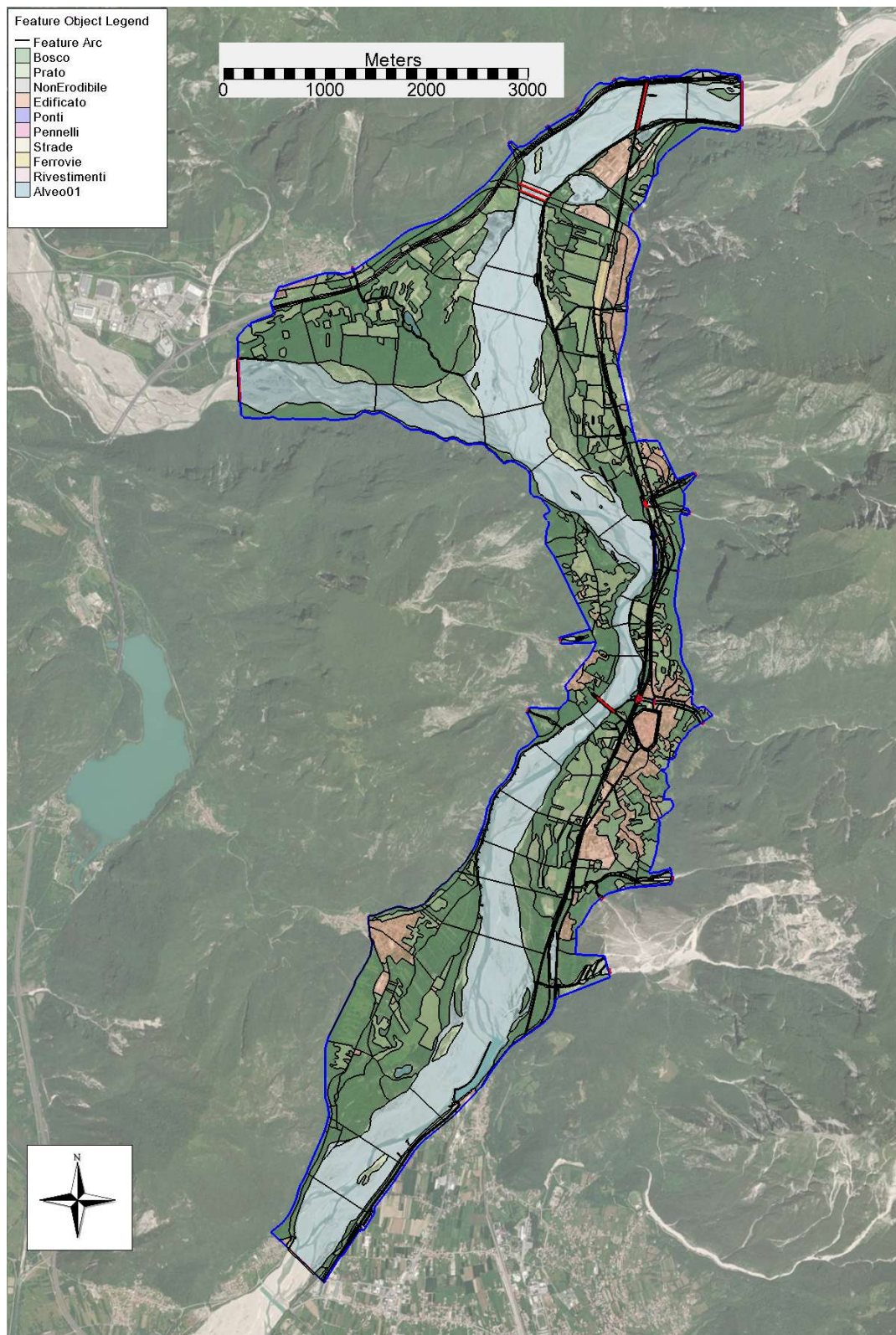


Figura 5.1 Inquadramento generale del dominio di calcolo, con evidenziati il contorno della mesh (in blu), le nodestrings (in rosso) e le principali poligonali per definire le aree a differente scabrezza.

Il dominio computazionale, oltre ai 3 km del fiume Tagliamento a monte dell'immissione del Fella, si sviluppa per 10 km dalla confluenza fino a circa 600 m a monte del ponte di Braulins. Rispetto alla zona oggetto di interesse, il dominio di calcolo è stato quindi notevolmente ampliato, al fine di evitare qualsiasi effetto derivante dalle condizioni al contorno sui risultati, soprattutto per la presenza dell'immissione del Fella, che è stato modellato per gli ultimi 5 km. L'estensione coperta complessivamente dal modello si estende per circa 21.1 km<sup>2</sup>.

Nella Figura 5.1 sono evidenziati, in blu, il contorno della mesh e, in rosso, le linee che rappresentano le *nodestrings*, utili per imporre le condizioni al contorno e per determinare alcuni risultati utili, ad esempio, in corrispondenza dei ponti. Nella figura sono anche indicati i contorni ritenuti significativi ai fini della identificazione delle poligonali fondamentali per descrivere sia le aree a differente scabrezza (aree boscate, delimitazione dell'alveo, ecc.), sia le opere presenti (ponti, opere di difesa quali briglie e repellenti, strade e ferrovie), come riportato in legenda. La Figura 5.2 riporta un ingrandimento per la zona a monte della confluenza fra Tagliamento e Fella, mentre la Figura 5.3 illustra un particolare della zona interessata dal tracciato della pista ciclabile.

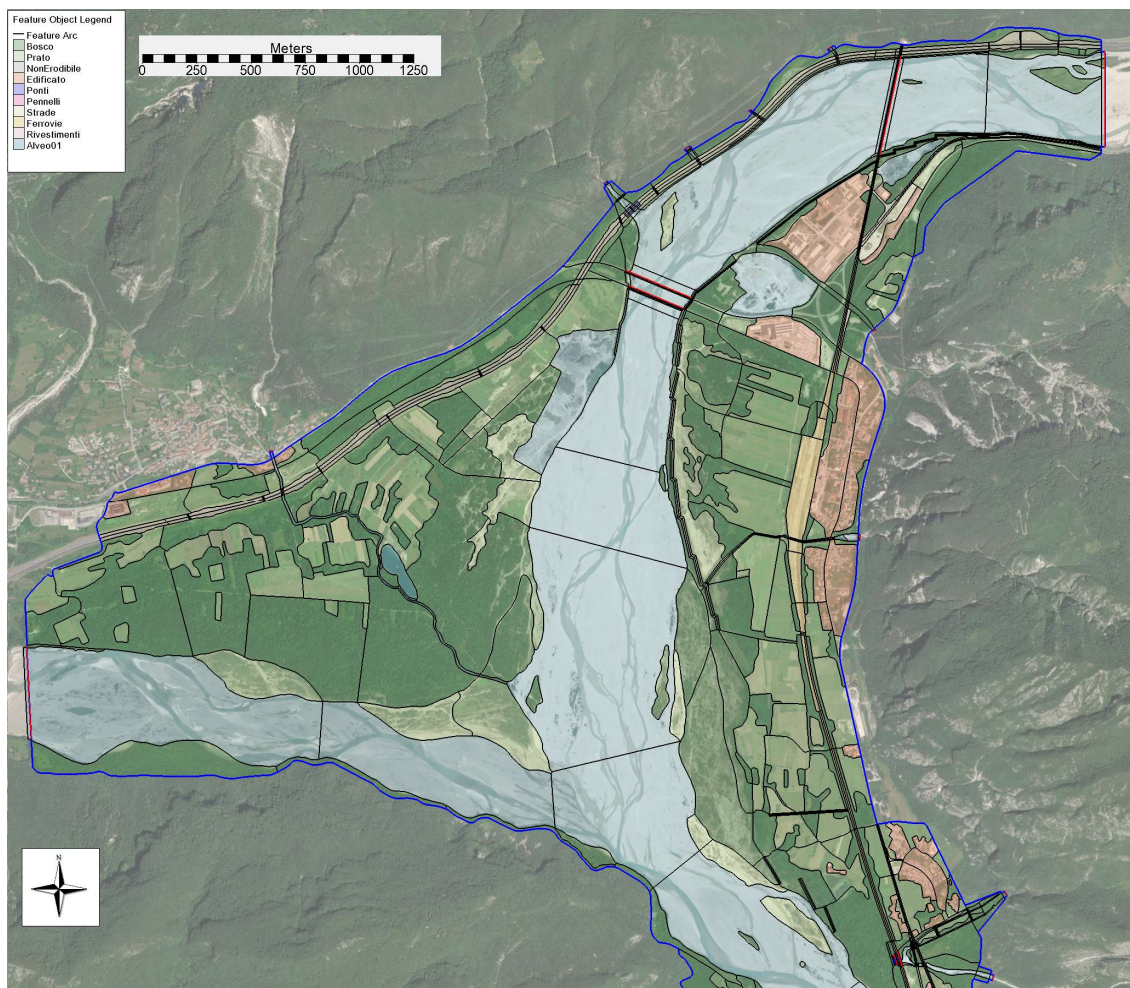


Figura 5.2 Porzione del dominio di calcolo nella zona a monte della confluenza fra Tagliamento e Fella.

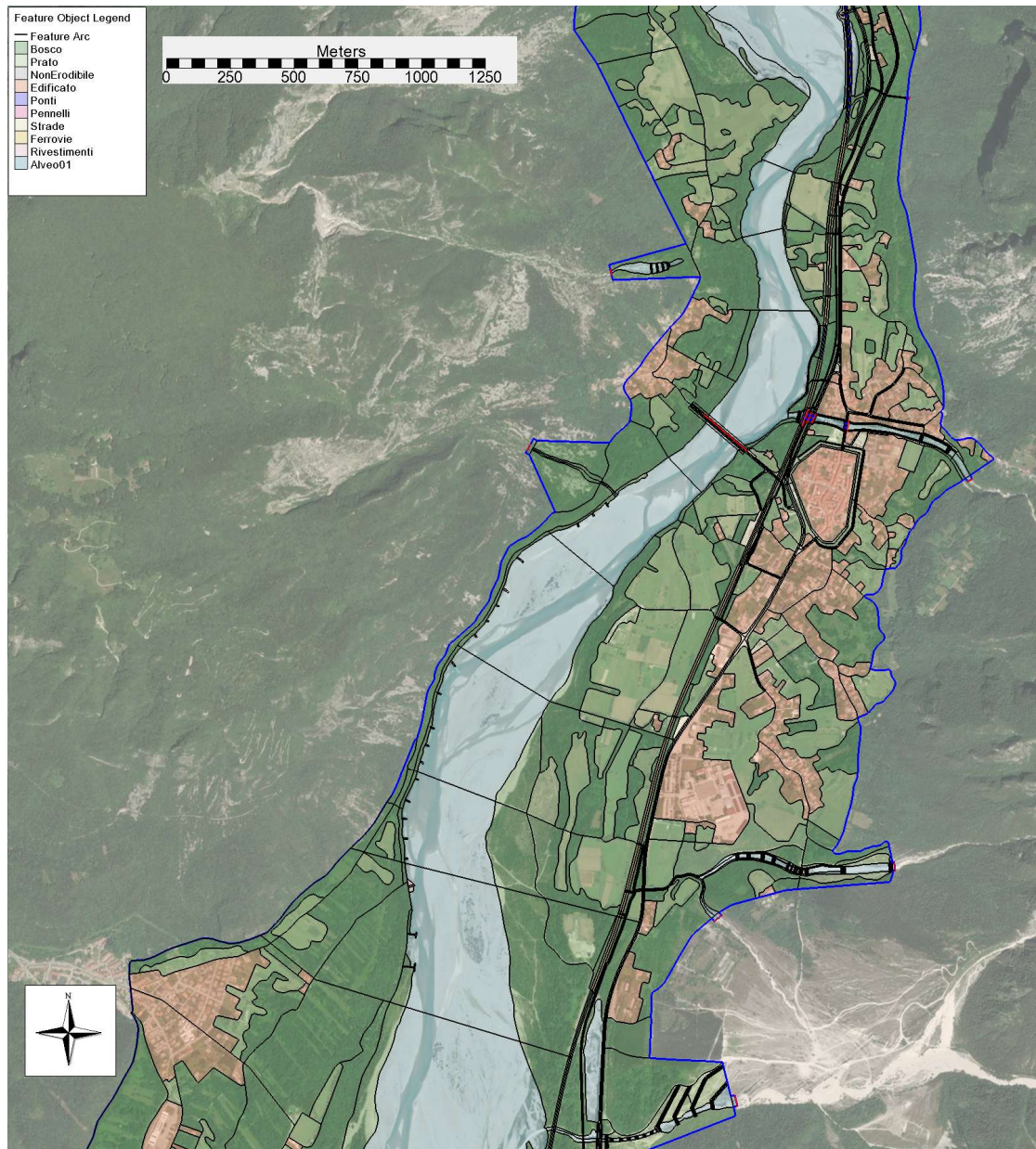


Figura 5.3 Particolare del dominio di calcolo nel tratto interessato dalla pista ciclabile.

Le Figure successive (Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7) illustrano alcuni particolari della mesh di calcolo.

Il software BASEMENT 3.x si configura con diversi moduli di calcolo, di cui i principali sono quello idrodinamico e quello relativo alla simulazione del trasporto solido e dell'evoluzione morfologica di un corso d'acqua, che vengono richiamati da tre file di input, necessari per avviare le simulazioni. Nei file di input (tutti con estensione \*.json), oltre ai principali parametri che definiscono i moduli da utilizzare (*model.json*), le caratteristiche della simulazione (*simulation.json*) e la tipologia di risultati (*results.json*), si trovano i link ad altre tipologie di file: il file della mesh (estensione \*.2dm), e i file per definire le condizioni al contorno (tipicamente, gli idrogrammi di piena in ingresso al dominio).

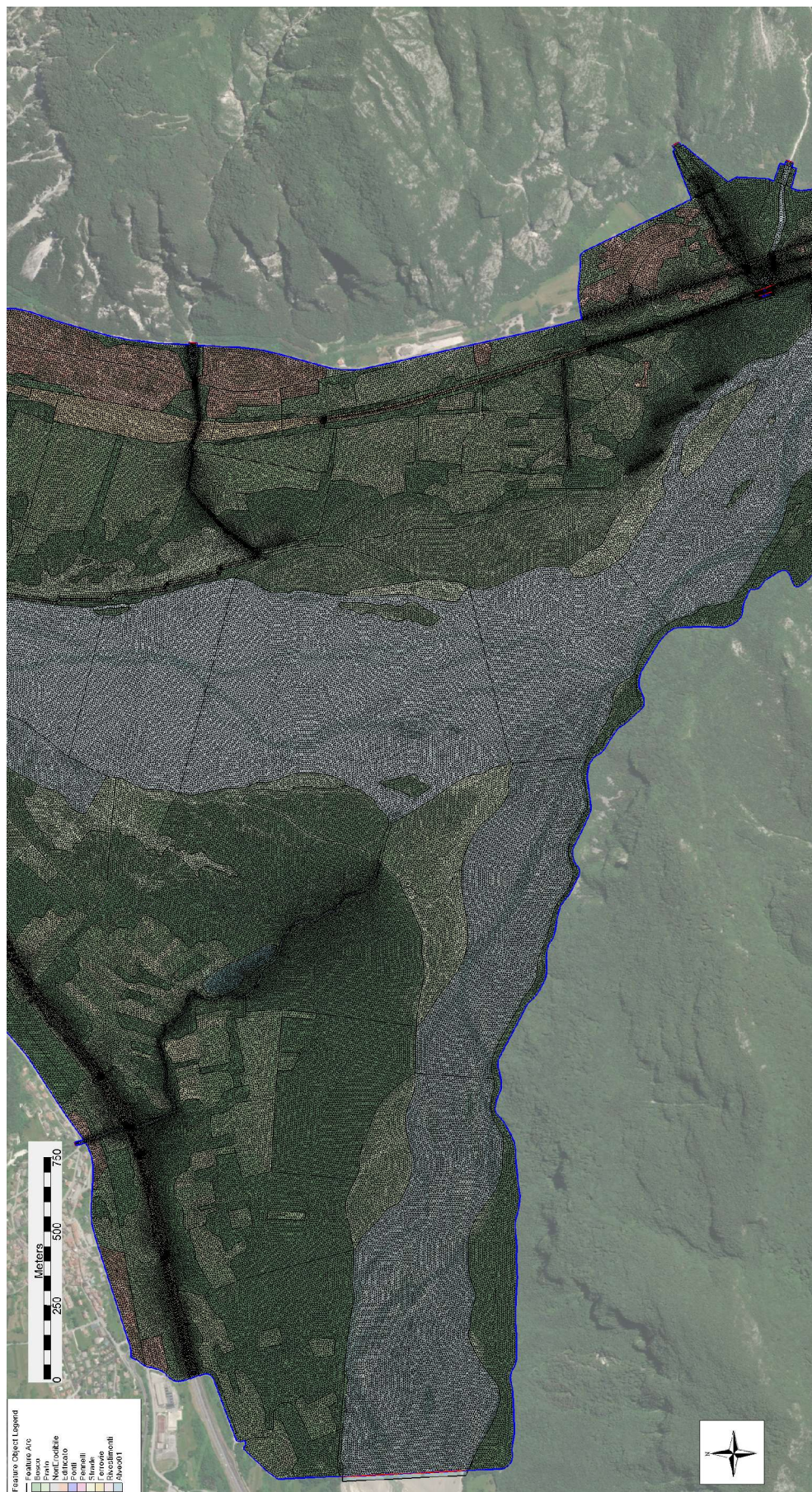


Figura 5.4 Particolare della mesh nel tratto di confluenza fra Fella e Tagliamento.



Figura 5.5 Particolare della mesh lungo il tratto iniziale della pista ciclabile.

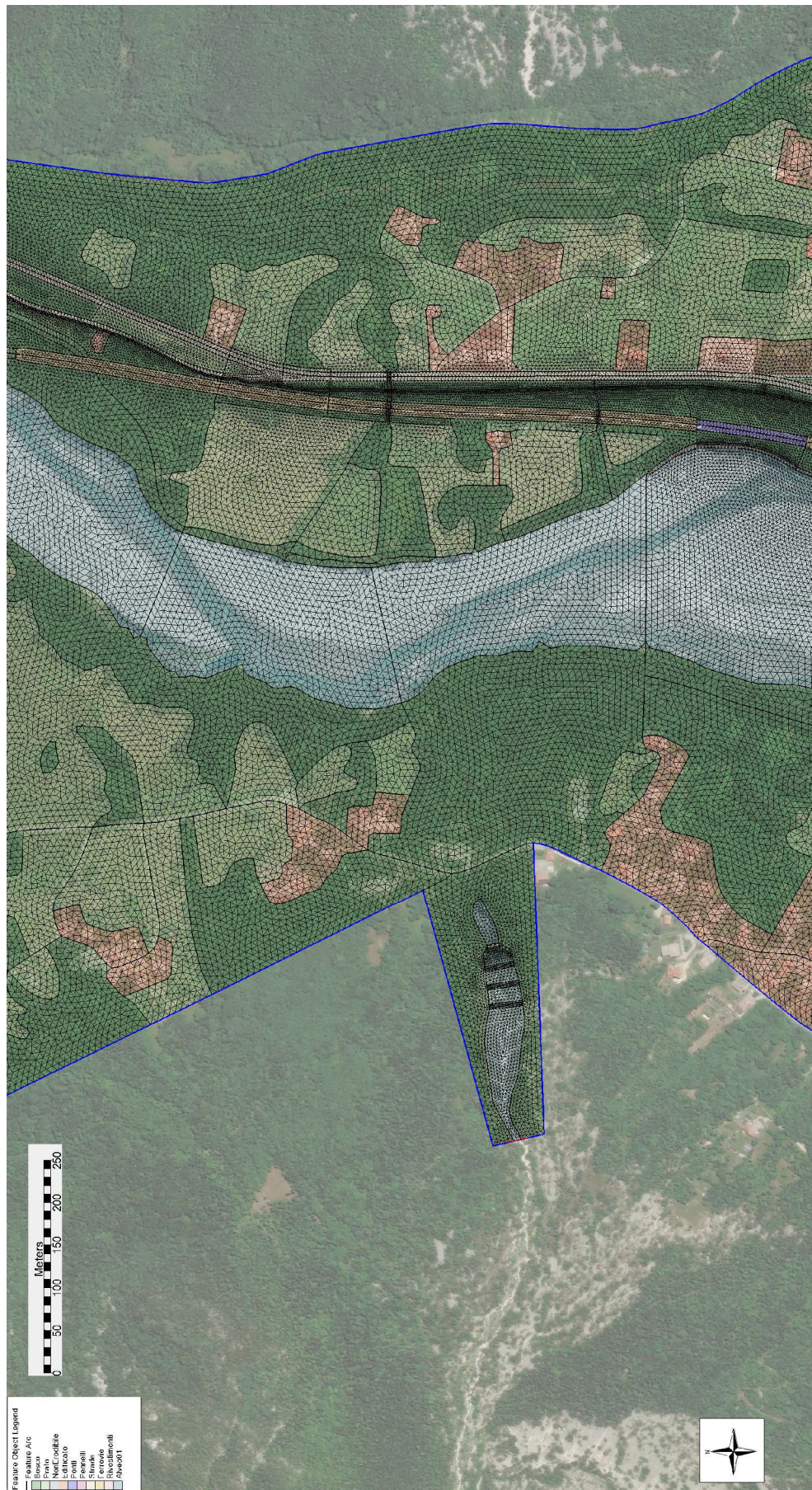


Figura 5.6 Particolare della mesh lungo il tratto centrale della pista ciclabile.



Figura 5.7 Particolare della mesh lungo il tratto finale della pista ciclabile.

Ai fini della modellazione, si è adottato anche il software SMS (Surface Modeling System), che permette la realizzazione della mesh di calcolo (di tipo triangolare non-strutturata), in base alla quale BASEMENT effettua le integrazioni numeriche.

Il software BASEMENT 3.x è un codice di calcolo essenzialmente basato sugli stessi modelli matematici della versione 2.8, con l'ulteriore possibilità di una notevole accelerazione delle performance di calcolo, potendo lanciare le simulazioni sulla GPU, e raggiungendo quindi riduzioni dei tempi di simulazione di quasi due ordini di grandezza. Per quel che riguarda la fase di post-processing si è utilizzato il software QGIS, in modo da caricare le mesh e i relativi risultati (in formato *.xdmf* e *.h5*).

### **5.2.2 Caratteristiche della mesh e quotatura dei nodi**

La mesh di calcolo è di tipo non-strutturato e formata da celle triangolari aventi dimensioni dei lati pari a 8 m, ma che diminuiscono fino a circa 1 m per descrivere nel dettaglio strutture quali le opere di difesa, pile dei ponti e opere in genere. In particolare, gli elementi più piccoli sono in corrispondenza del tracciato della pista ciclabile.

Il numero totale di nodi è pari a 548'688 e il numero totale di celle è pari a 1'092'084.

Per quanto riguarda la quotatura della mesh, si è proceduto basandosi sul rilievo laser-scan della Regione Friuli Venezia Giulia risalente al periodo 2018-2020: la Figura 5.8 illustra l'andamento altimetrico generale della mesh di calcolo, mentre la Figura 5.9 un ingrandimento per la zona di Venzone.

E' bene evidenziare che le figure si riferiscono alla condizione relativa allo stato di fatto (SDF). Per quanto riguarda la situazione allo stato di progetto (SDP), l'andamento altimetrico rimane praticamente il medesimo, eccezion fatta per la zona limitata al tracciato della pista ciclabile, la cui quota è stata ipotizzata rialzata di 1.5 m.

In accordo con gli artt. 12 e 13 delle NTA del PGRA (Allegato V), il posizionamento alla 'quota di sicurezza' dipende dal valore del tirante ivi presente. Dal momento che i tiranti variano in relazione alla classe di pericolosità e che nella zona oggetto di verifica di compatibilità idraulica il tracciato della pista ciclabile interessa per lo più aree appartenenti alle classi P2 e P3, si è deciso, cautelativamente, di effettuare un rialzo di tutto il tracciato uniforme a pari a 1.5 m, che costituisce il valore massimo delle varie classi dei tiranti che contraddistinguono tali aree.

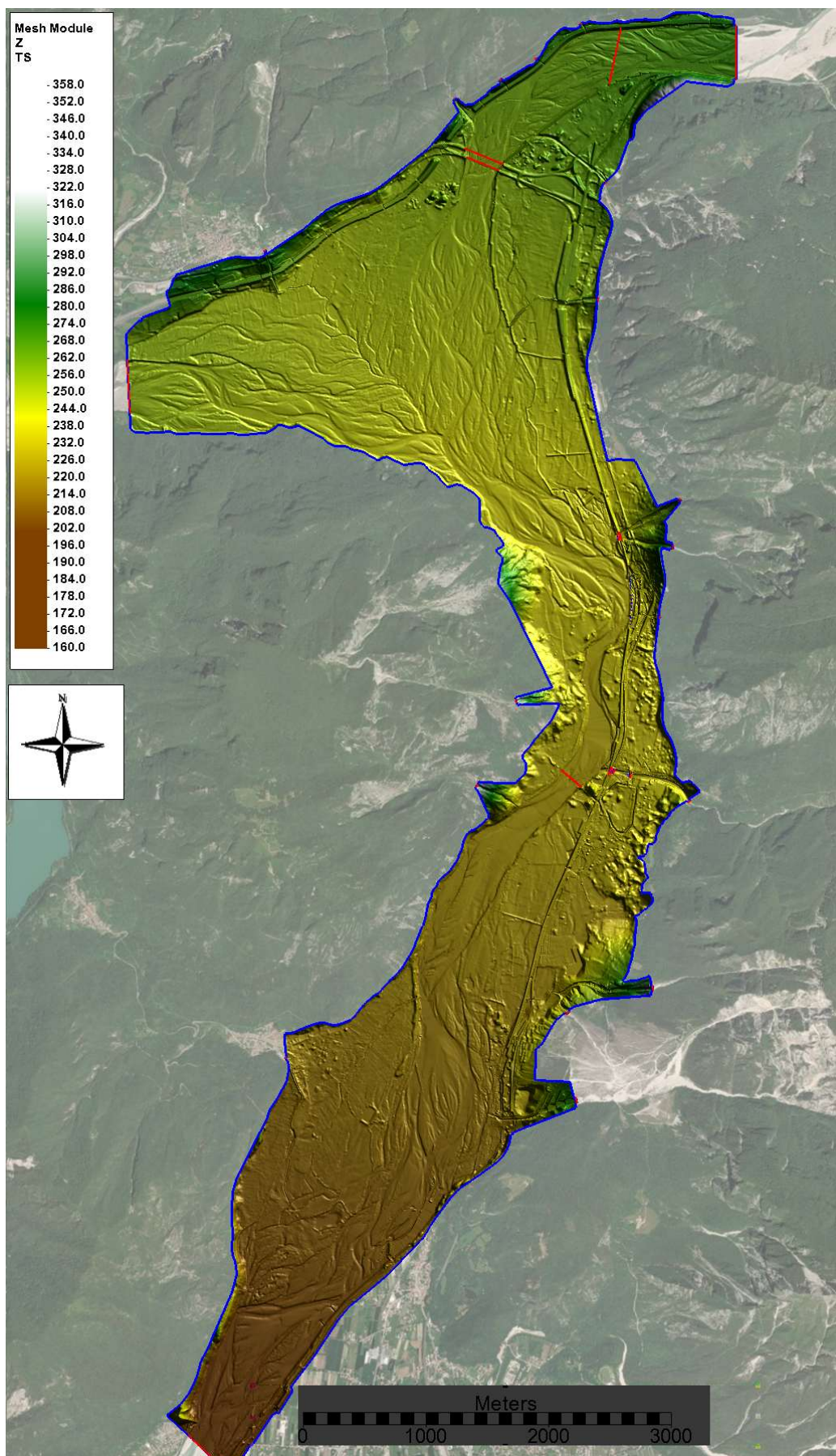


Figura 5.8 Andamento altimetrico generale della mesh di calcolo (DTM 2020).

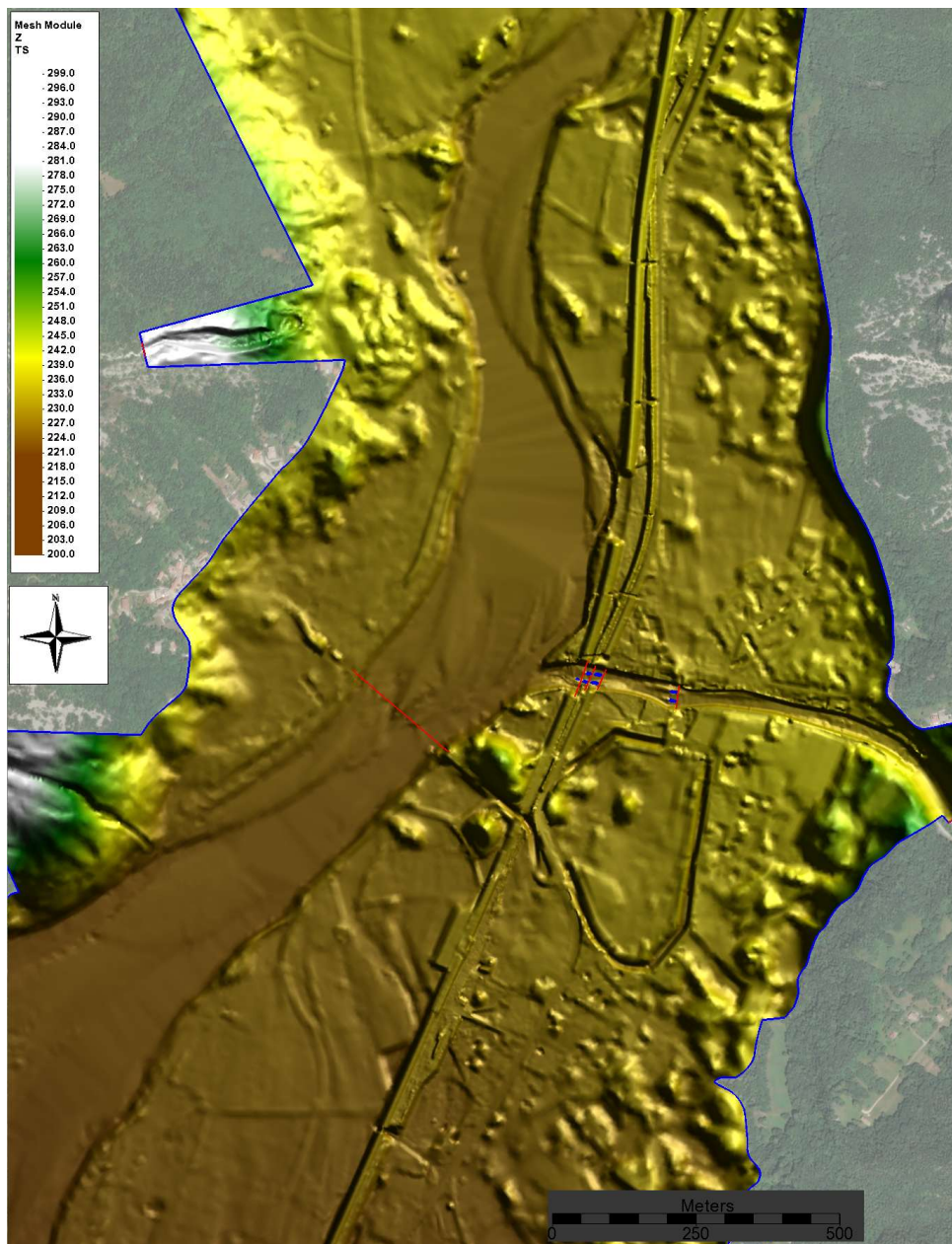


Figura 5.9 Andamento altimetrico della mesh nella zona di Venzone.

### 5.3 Dati e parametri in input

Ai fini delle simulazioni idrodinamiche, è necessario fornire al software numerosi dati e parametri modellistici, quali i flussi nelle sezioni di ingresso al dominio di calcolo, la condizione al contorno in uscita a valle, la distribuzione spaziale dei coefficienti di scabrezza e altri parametri di dettaglio puramente numerici (quali la durata dell'orizzonte temporale simulato), per eseguire i run del modello, come descritto nei paragrafi seguenti.

#### 5.3.1 Idrogrammi di piena

La Figura 4.14 e la Figura 4.15 riportano gli idrogrammi con riferimento agli eventi  $p_{max}$  e  $v_{max}$  per il tempo di ritorno di 100 anni per il Tagliamento, Fella e Venzonassa. Tali

idrogrammi, calcolati come descritto nella sezione relativa alla modellazione idrologica, sono stati impiegati quali condizioni al contorno per il modello idrodinamico a fondo mobile.

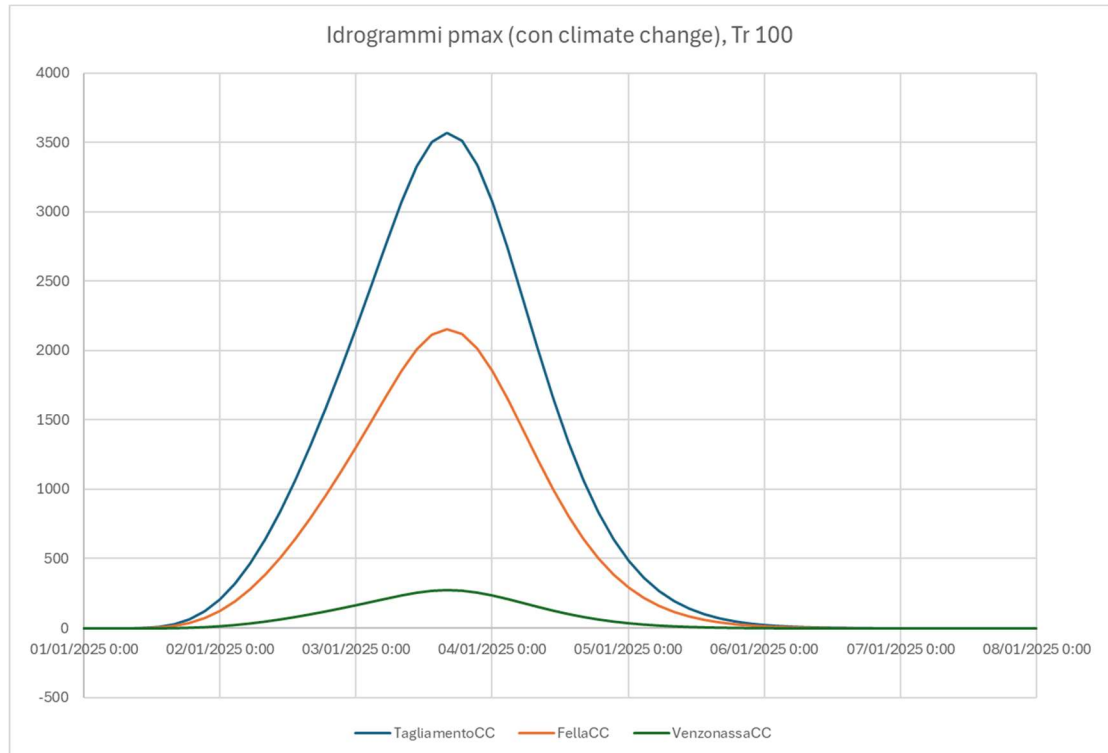


Figura 5.10 Idrogrammi  $p_{max}$  di Tagliamento, Fella e Venzonassa quali condizioni al contorno della modellazione idrodinamica a fondo mobile per  $Tr = 100$  anni, contemplando l'effetto dei cambiamenti climatici.

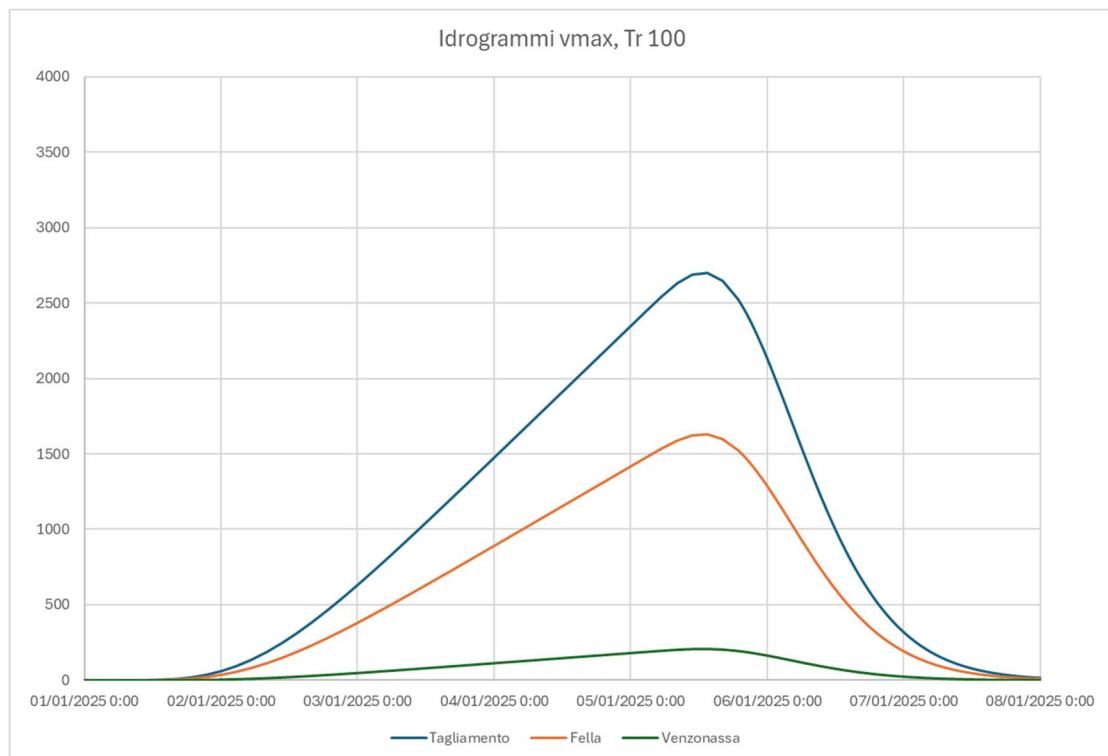


Figura 5.11 Idrogrammi  $v_{max}$  di Tagliamento, Fella e Venzonassa quali condizioni al contorno della modellazione idrodinamica a fondo mobile per  $Tr = 100$  anni.

### 5.3.2 Sedimentogrammi assunti nelle simulazioni

I sedimentogrammi assunti nelle simulazioni sono calcolati a partire dagli idrogeammi di piena descritti nella sezione precedente, adottando la formula di Meyer-Peter e Muller (adatta al contesto) e assumendo sempre, quale condizione al contorno in Basement, la massima capacità di trasporto (coefficiente moltiplicativo pari a 1.0).

### 5.3.3 Coefficienti di scabrezza

Per quel che riguarda i coefficienti di scabrezza, il dominio di calcolo è stato suddiviso in zone a differente uso del suolo, adottando 10 classi omogenee come già illustrato nella Figura 5.1, ovvero: alveo, zone a fitta vegetazione (boschi), aree a vegetazione rada (prati), opere non erodibili, zone edificate fuori alveo, aree in corrispondenza degli attraversamenti dei ponti, pennelli strade, ferrovie, rivestimenti.

I valori assunti per i coefficienti in termini del parametro  $K_s$  di Gauckler-Strickler sono i seguenti:  $25 m^{1/3}/s$  (alveo),  $15 m^{1/3}/s$  (aree vegetazione fitta, cioè 'bosco'),  $20 m^{1/3}/s$  (aree vegetazione rada, cioè 'prato'),  $50 m^{1/3}/s$  (per le zone non erodibili, tipicamente in calcestruzzo),  $10 m^{1/3}/s$  (per le zone edificate),  $25 m^{1/3}/s$  per le zone in corrispondenza degli attraversamenti dei ponti,  $30 m^{1/3}/s$  (per i pennelli),  $40 m^{1/3}/s$  (per le strade),  $40 m^{1/3}/s$  (per le ferrovie) e  $20 m^{1/3}/s$  (per i rivestimenti spondali).

Merita un cenno la scelta del coefficiente di scabrezza relativo agli attraversamenti, ovvero in corrispondenza dei ponti (classe 6). Il valore assunto è pari a quello dell'alveo, in quanto si è tenuto in considerazione il fatto che per la maggior parte degli attraversamenti non esistono strutture di stabilizzazione al fondo. In tutti quei casi in cui questa esista, quindi un consolidamento del fondo con scabrezze minori, l'area interessata è stata comunque inserita nella mesh con classe 4 (non erodibile).

Non si è ritenuto opportuno quindi assumere quindi coefficienti di scabrezza penalizzanti in corrispondenza degli attraversamenti, poiché le verifiche di ostruzione sono state comunque condotte e, soprattutto, perché l'assumere bassi coefficienti di Gauckler-Strickler in corrispondenza di un attraversamento, pur accentuando lievemente il fenomeno di rigurgito a monte, determina una condizione meno cautelativa per i livelli a valle, dal momento che il modello simula un parziale invaso a monte.

### 5.3.4 Analisi di erodibilità delle opere

L'erodibilità delle opere è stata affrontata in accordo con gli scenari dell'Allegato I. In particolare, con riferimento alle classi di scabrezza introdotte nella sezione precedente, si può riassumere che:

- 1) Alveo: considerato sempre erodibile.
- 2) Bosco: considerato sempre erodibile.
- 3) Prato: considerato sempre erodibile.
- 4) Zone non erodibili: per queste sono state fatte le seguenti considerazioni:
  - a. nello scenario 'Sim0', sono state considerate non erodibili;
  - b. nello scenario 'DB', ovvero 'crollo opere', sono state considerate tutte erodibili.
- 5) Edificato: considerato sempre non erodibile.
- 6) Ponti (ovvero le zone di attraversamento): considerati sempre erodibili, e assimilati al materiale 'alveo', laddove non presente alcuna protezione al fondo; altrimenti considerati non erodibili, se presenti protezioni quali soglie e/o diaframmi al piede.
- 7) Pennelli: considerati non erodibili nello scenario 'Sim0' ed erodibili nello scenario 'DB'.
- 8) Strade: considerate sempre non erodibili.
- 9) Ferrovie: considerate sempre non erodibili.
- 10) Rivestimenti: considerati non erodibili nello scenario 'Sim0' ed erodibili nello scenario 'DB'.

L'erodibilità, o meno, delle zone a differente scabrezza è stata specificata nel file di input *model.json* come 'fixed bed' della relativa classe, alla quale è stato inoltre associato il valore '0.0' del parametro '*z\_rel*' nel caso di non erodibilità.

### 5.3.5 Analisi dell'eventuale ostruzione delle luci dei ponti

Ad eccezione dei ponti molto lontani dalla zona di interesse, tutti gli attraversamenti sono stati oggetto di verifica all'eventuale ostruzione: in particolare, le verifiche si sono concentrate sugli attraversamenti del **torrente Venzonassa**.

In particolare, il tratto analizzato è interessato da 5 attraversamenti (l'ubicazione degli stessi è illustrata in Figura 5.12). Da monte verso valle sono di seguito elencati (fra parentesi sono indicati i relativi codici delle *nodestring* nel file *model.json* di input a Basement, si veda sempre la Figura 5.12):

- 1) Per il torrente Venzonassa:
  - a. ponte di Venzone di Via del Ponte (codice 26 della *nodestring*);
  - b. ponte della SS n. 13 Pontebbana (codice 27 della *nodestring*);
  - c. ponte della ciclabile, ex ferrovia (codice 28 della *nodestring*);
  - d. ponte della FF SS (codice 29 della *nodestring*).
- 2) Per il Tagliamento:

a. ponte di Venzone (Pioverno) di Via della Passerella (codice 25 della *nodestring*).



Figura 5.12 Ubicazione delle *nodestrings* del modello idrodinamico ai fini delle verifiche di eventuale ostruzione delle luci dei ponti (zona di Venzone).

Per ognuno di questi si è proceduto come da paragrafo 4.1.3 dell'Allegato 1 del PGRA. La Tabella 5.1 riporta la sintesi dei risultati ottenuti. Dalla tabella si può notare come non ci siano problemi di eventuale ostruzione, per lo meno per il tempo di ritorno di 100 anni.

Tabella 5.1 Caratteristiche degli attraversamenti analizzati e calcolo dei vari parametri per valutare l'eventualità di ostruzione degli stessi.

	Venzonassa (via del Ponte)	Venzonassa (SS n. 13 Pontebbana)	Venzonassa (nuova ciclabile, ex FF SS)	Venzonassa (FF SS)	Tagliamento (Pioverno)
<b>Coefficienti</b>					
Disponibilità di vegetazione, $K$	1	1	1	1	1
Probabilità di trasporto, $T$	1	1	1	1	1
$H_{max}$ (m)	6.00	8.00	4.00	6.00	4.67
$H_{min}$ (m)	3.50	4.50	2.50	6.00	4.67
Numero di luci $N_L$	3	3	3	2	12
Numero pile	2	2	2	1	11
Larghezza pile (m)	2.70	1.30	1.30	3.00	1.50
Interasse pile (m)	15.20	14.30	14.30	25.00	20.86
Luce netta pile (m)	12.50	13.00	13.00	22.00	19.36
Area netta singola campata ( $m^2$ )	59.38	81.25	42.25	132.00	90.41
Area netta totale disponibile ( $m^2$ )	178.13	243.75	126.75	264.00	1084.93
Lunghezza fusti vegetazione $D_R$	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Larghezza luce alla base $B_L$	12.50	13.00	13.00	22.00	19.36
Rapporto $D_R/B_L$	0.80	0.77	0.77	0.45	0.52
Caratteristiche del ponte (coeff. C da tabella)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Probabilità di occlusione, $P_0 = KTC$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fattore di riduzione, $F_R$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Sezione liquida max (Tr 100, da Basement, $m^2$ )	69.67	81.16	90.30	111.80	830.02
Attivazione scenario ostruzione	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>

## 6 Simulazioni effettuate e risultati ottenuti

### 6.1 Premesse

Trattandosi di analisi nell'ambito di procedura di VCI di tipo 'torrentizio' delle NTA del PGRA, le simulazioni sono state effettuate con il modello idrodinamico a fondo mobile per il tempo di ritorno di 100 anni.

Le simulazioni effettuate sono tutte a scala di evento; in altri termini, le analisi condotte hanno come condizioni al contorno idrogrammi di piena di eventi della durata complessiva pari a 6 giorni, così come già descritto nella sezione relativa alla modellazione idrologica.

Riassumendo, gli scenari contemplati sono i seguenti:

- PCV\_Tr100\_pmaxCC\_Sim0\_SDF;      PCV\_Tr100\_pmaxCC\_Sim0\_SDP;
- PCV\_Tr100\_pmaxCC\_DB\_SDF;      PCV\_Tr100\_pmaxCC\_DB\_SDP;
- PCV\_Tr100\_vmax\_Sim0\_SDF;      PCV\_Tr100\_vmax\_Sim0\_SDP;
- PCV\_Tr100\_vmax\_DB\_SDF;      PCV\_Tr100\_vmax\_DB\_SDP;

Le codifiche attribuite ai vari scenari sono autoesplicanti, in particolare il significato delle singole codifiche è il seguente:

- pmaxCC rappresenta la simulazione dell'evento *pmax*, contemplando gli effetti del cambiamento climatico;
- vmax rappresenta la simulazione dell'evento *vmax*;
- Sim0 è la simulazione 'base', ovvero considerate le opere non erodibili;
- DB rappresenta lo scenario con l'erodibilità delle opere;
- SDF e SDP sono le simulazioni relative alle configurazioni allo stato di fatto e a quello di progetto.

Le figure successive, riportate alle pagine seguenti, illustrano i risultati ottenuti per il tempo di ritorno di 100 anni, direttamente sotto forma di involuppo dei campi idrodinamici di massima profondità dell'acqua (in metri) e massima velocità della corrente (in m/s).

Vengono dapprima riportate la Figura 6.1 e la Figura 6.2, che rappresentano, rispettivamente, la panoramica generale delle massime profondità dell'acqua e delle velocità della corrente sull'intero dominio di calcolo, a fini di confronto con la mappatura della cartografia dell'attuale PGRA. Nelle sezioni successive sono invece riportati i risultati relativi alla zona di interesse per la verifica di compatibilità idraulica. A tal fine, sono anche riportate le mappe differenziali di massima profondità dell'acqua, velocità della corrente e quota del pelo libero.

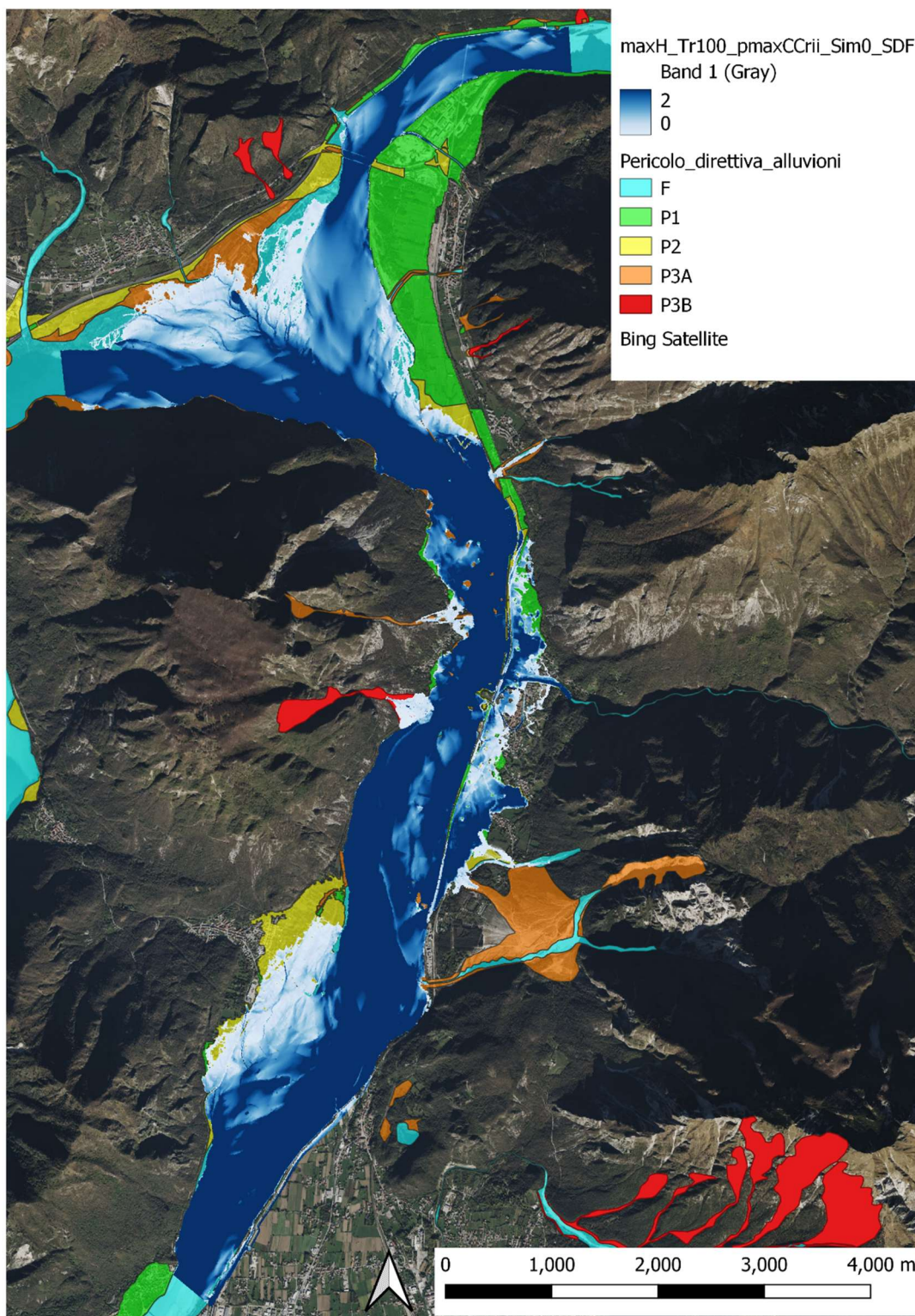


Figura 6.1 Mappa generale delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), sovrapposta alla cartografia della pericolosità del PGRA.

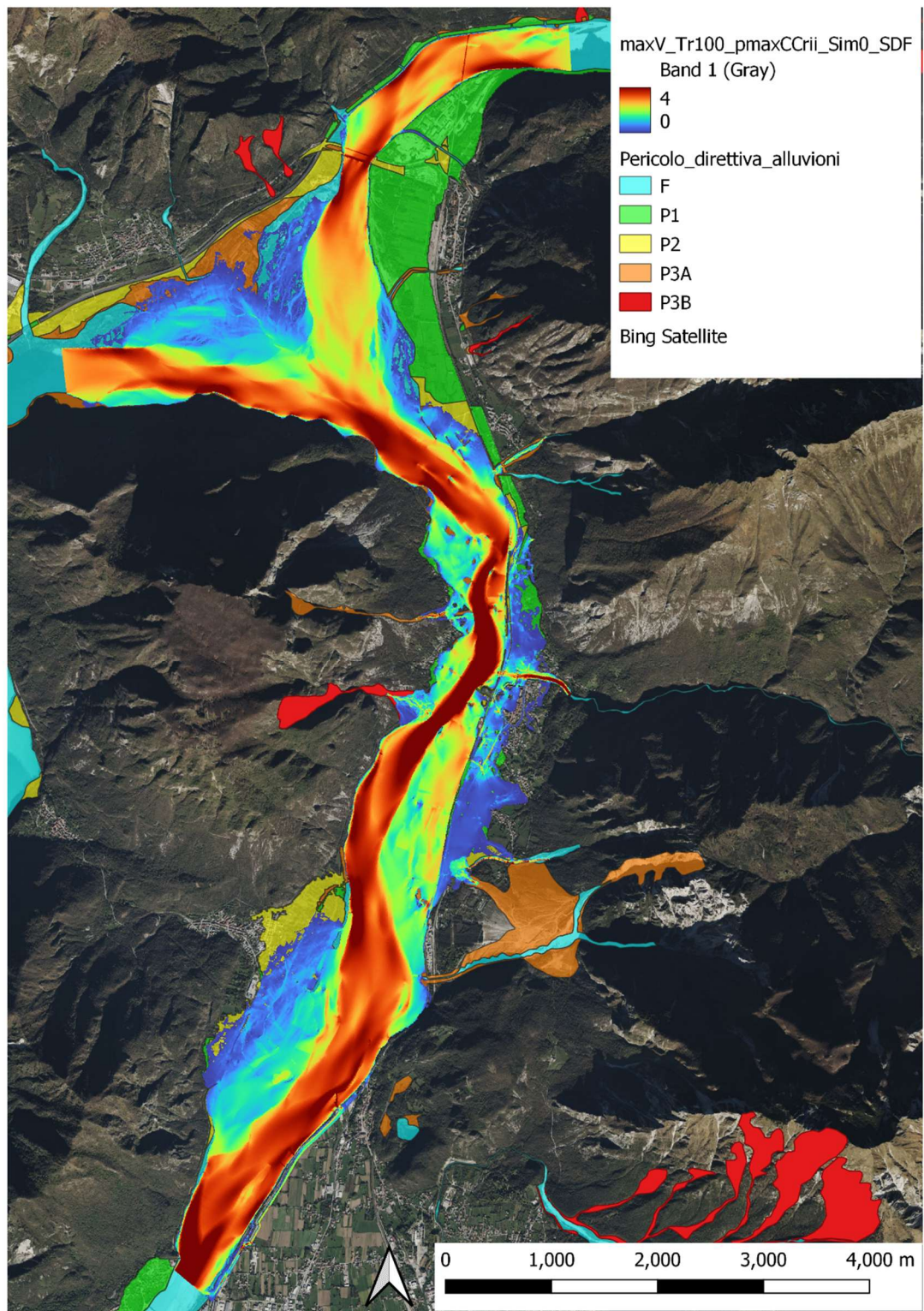


Figura 6.2 Mappa generale delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), sovrapposta alla cartografia della pericolosità del PGRA.

## 6.2 Risultati ottenuti (SDF e SDP): mappe di inviluppo delle variabili idrodinamiche

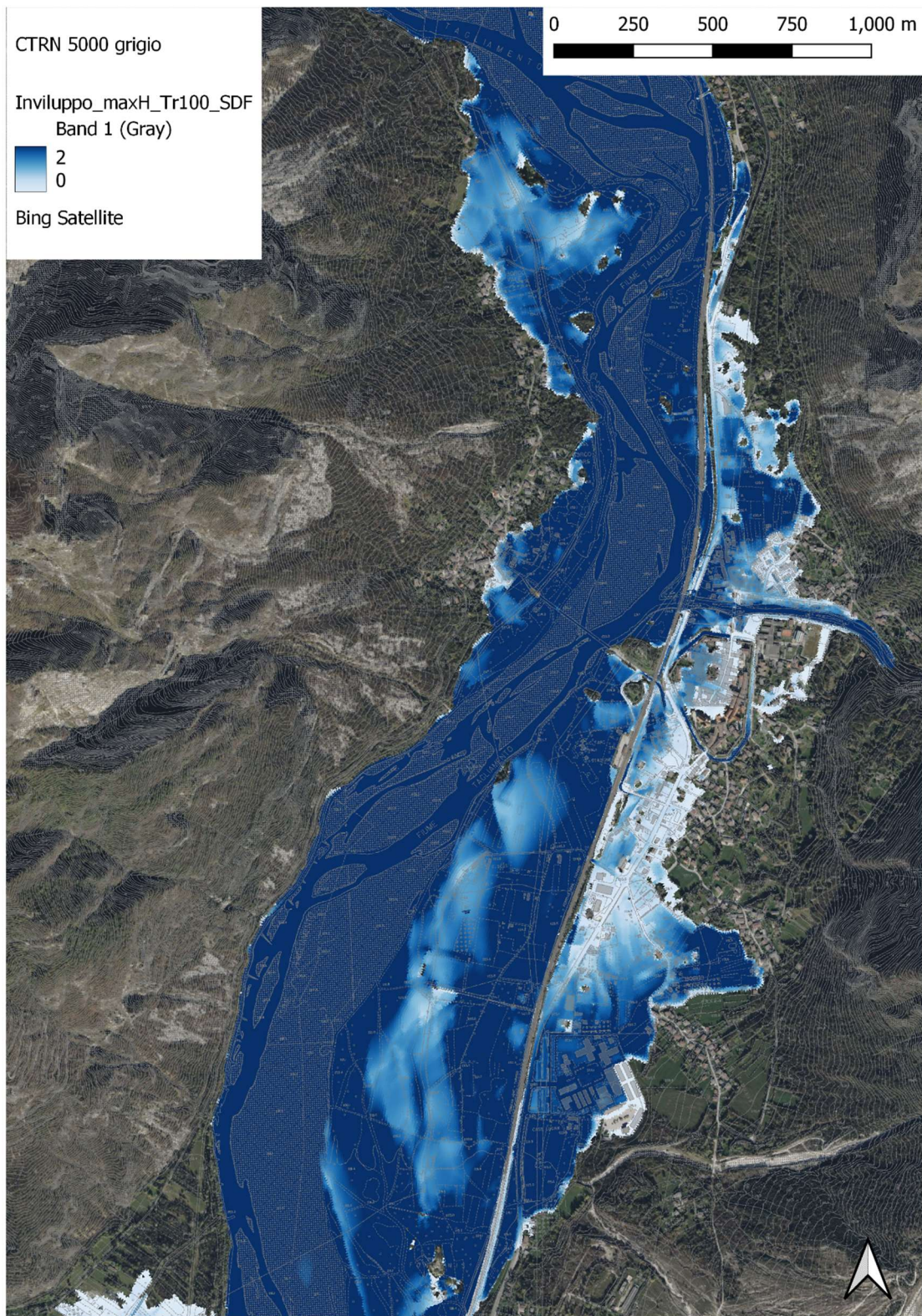


Figura 6.3 Mappa di inviluppo delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), allo SDF.

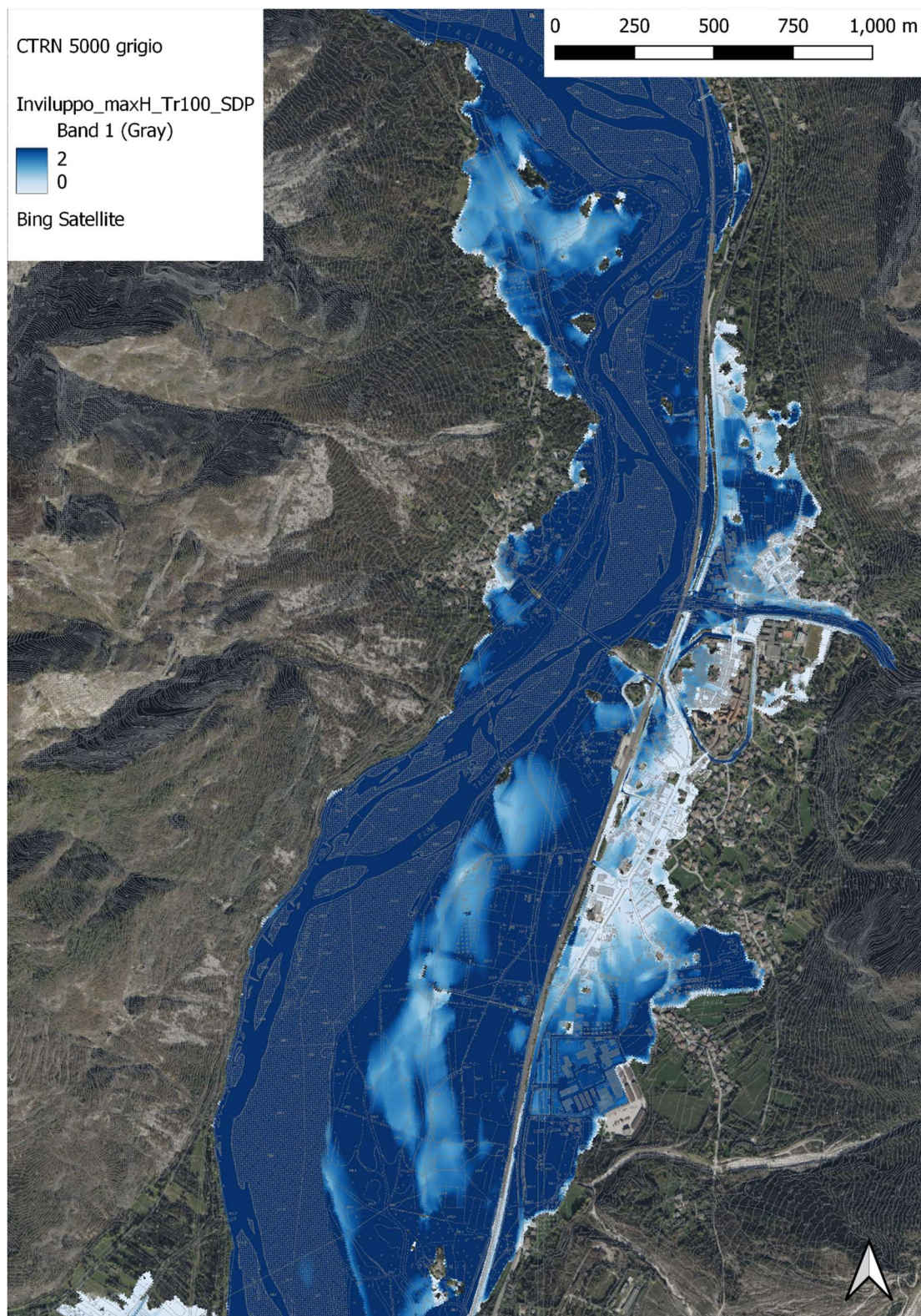


Figura 6.4 Mappa di inviluppo delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), allo SDP.

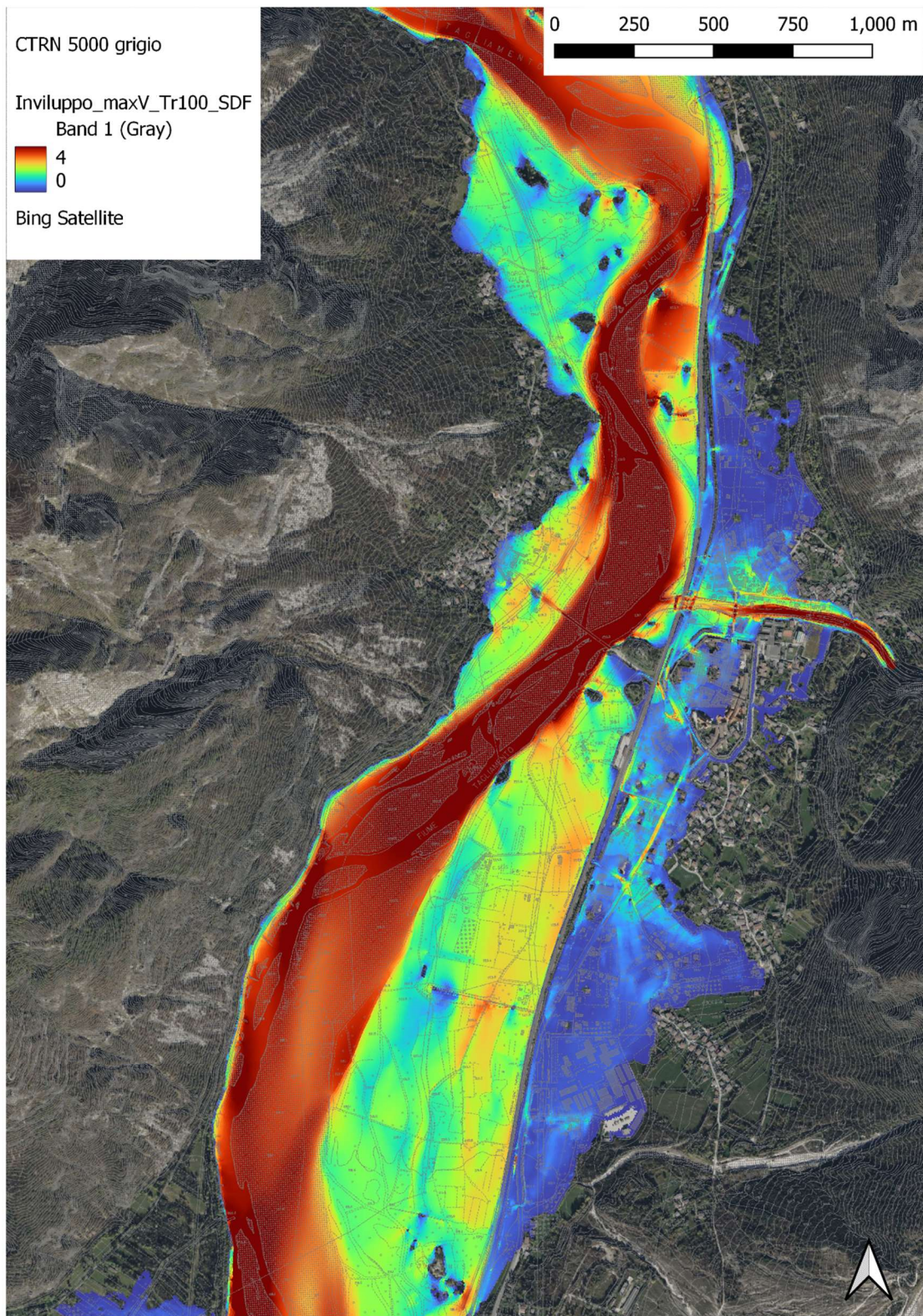


Figura 6.5 Mappa di inviluppo delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), allo SDF.

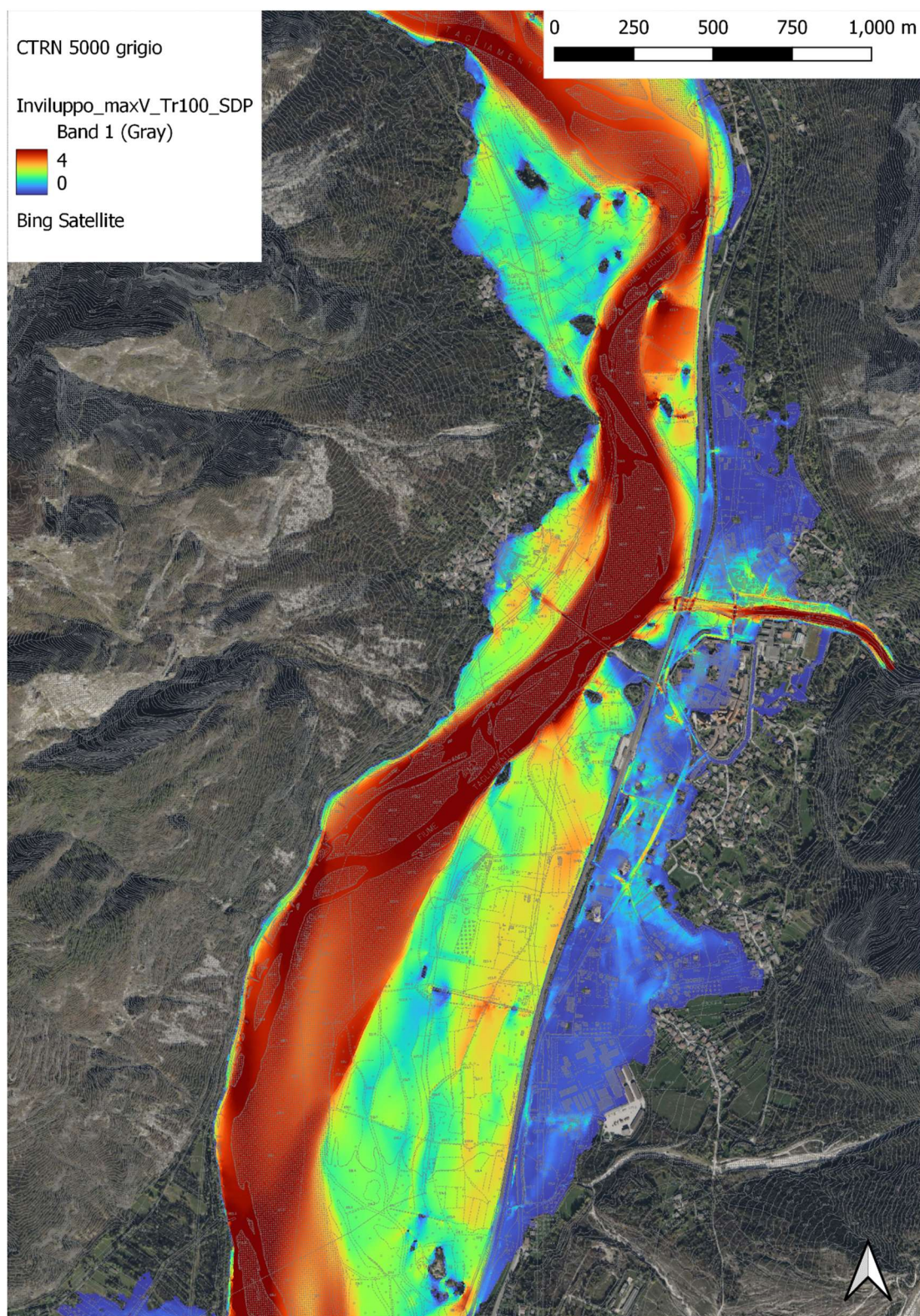


Figura 6.6 Mappa di inviluppo delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), allo SDP.

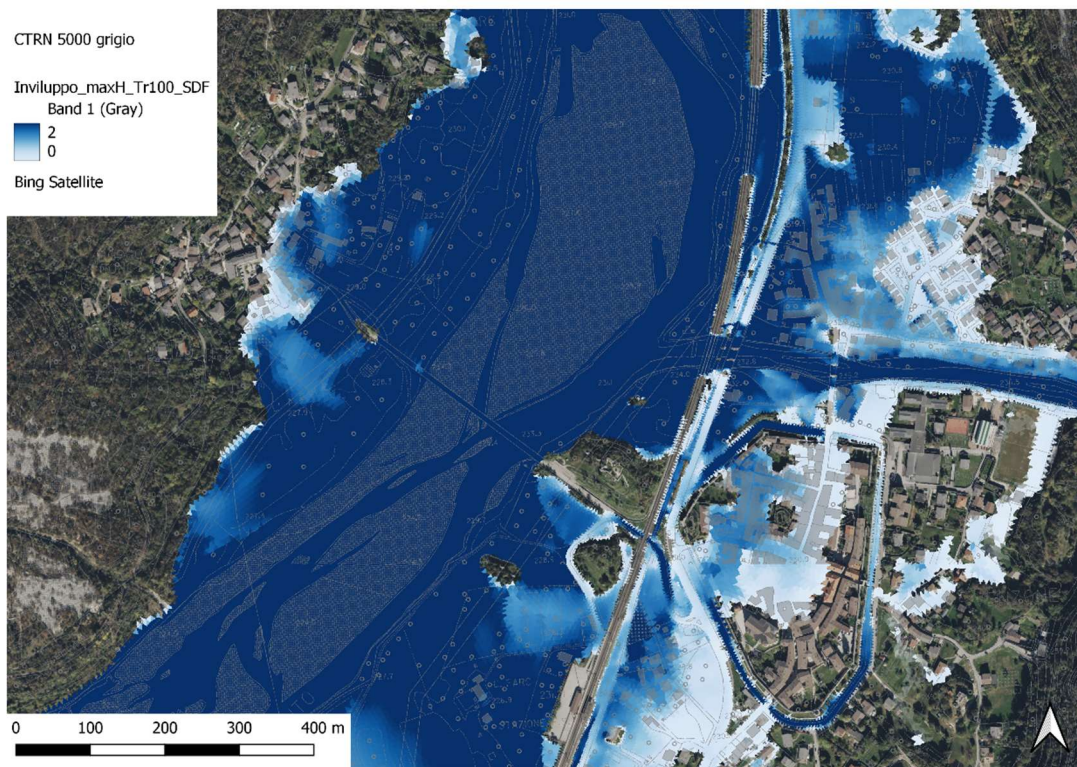


Figura 6.7 Mappa di inviluppo delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), allo SDF; particolare per la zona di Venzone.

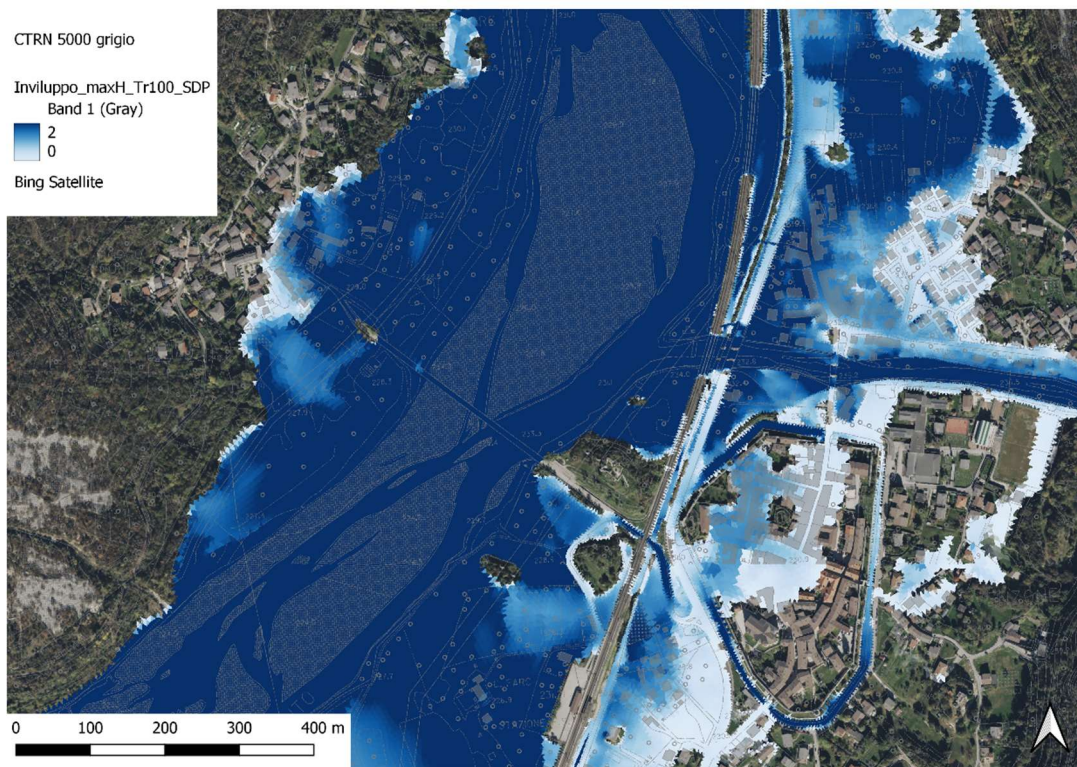


Figura 6.8 Mappa di inviluppo delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), allo SDP; particolare per la zona di Venzone.

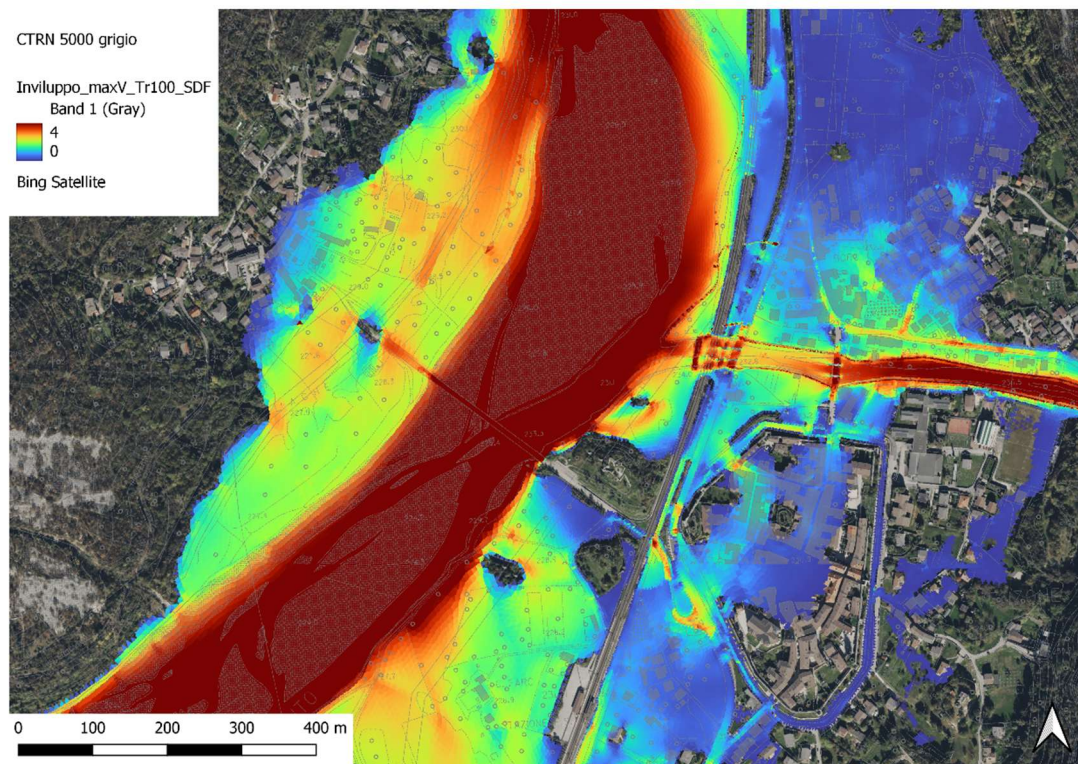


Figura 6.9 Mappa di inviluppo delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), allo SDF; particolare per la zona di Venzone.

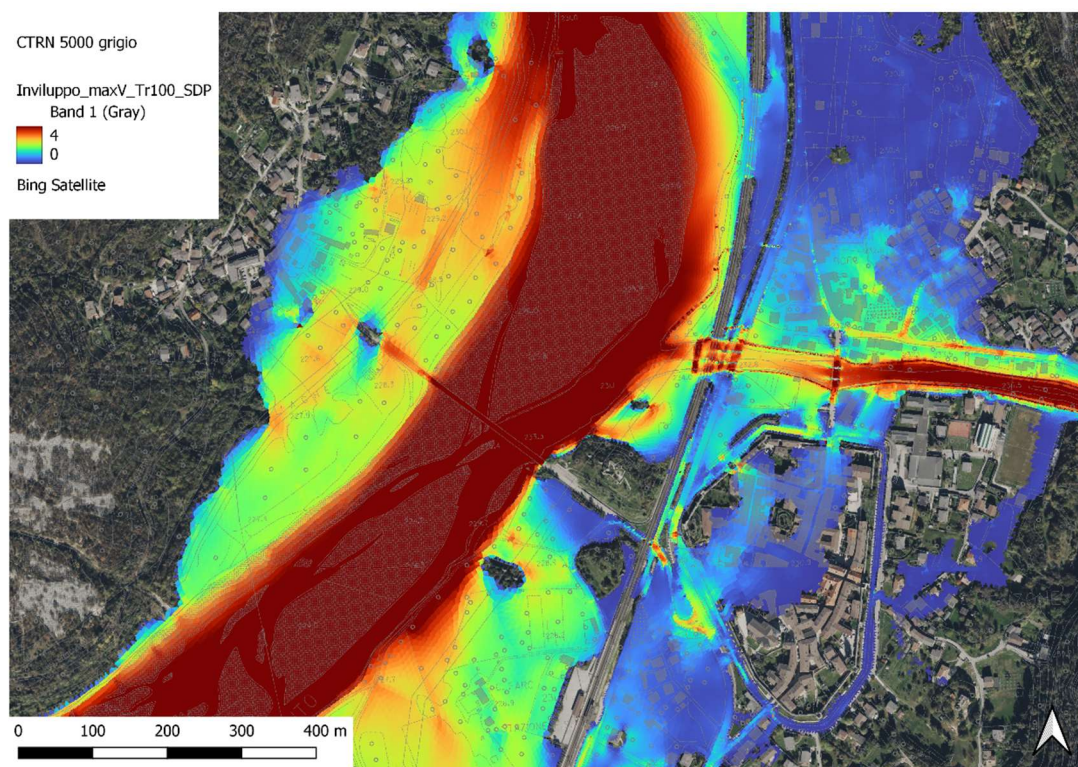


Figura 6.10 Mappa di inviluppo delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), allo SDP; particolare per la zona di Venzone.

### 6.3 Risultati ottenuti (SDF e SDP): mappe differenziali delle variabili idrodinamiche

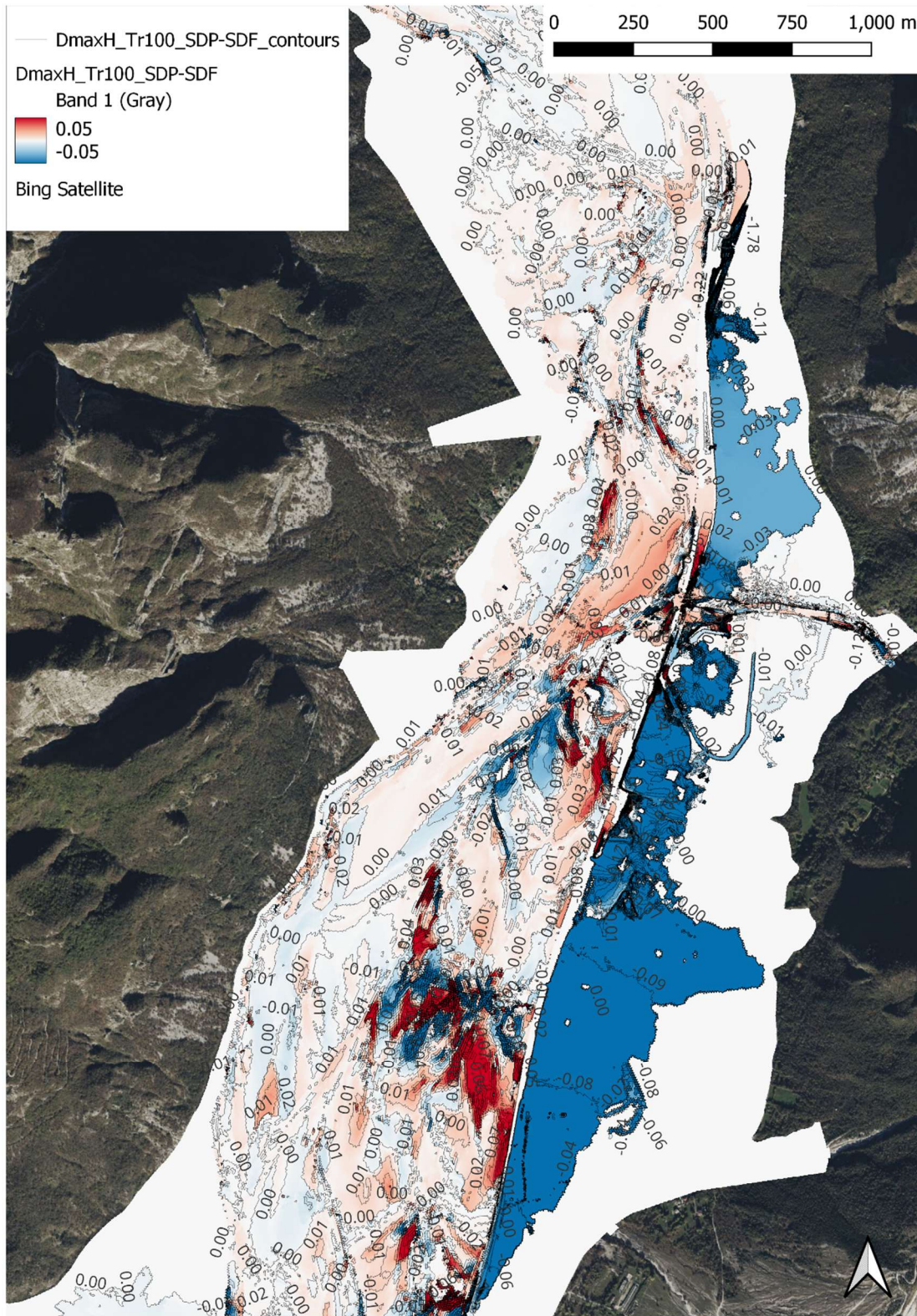


Figura 6.11 Mappa differenziale delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), SDP-SDF.

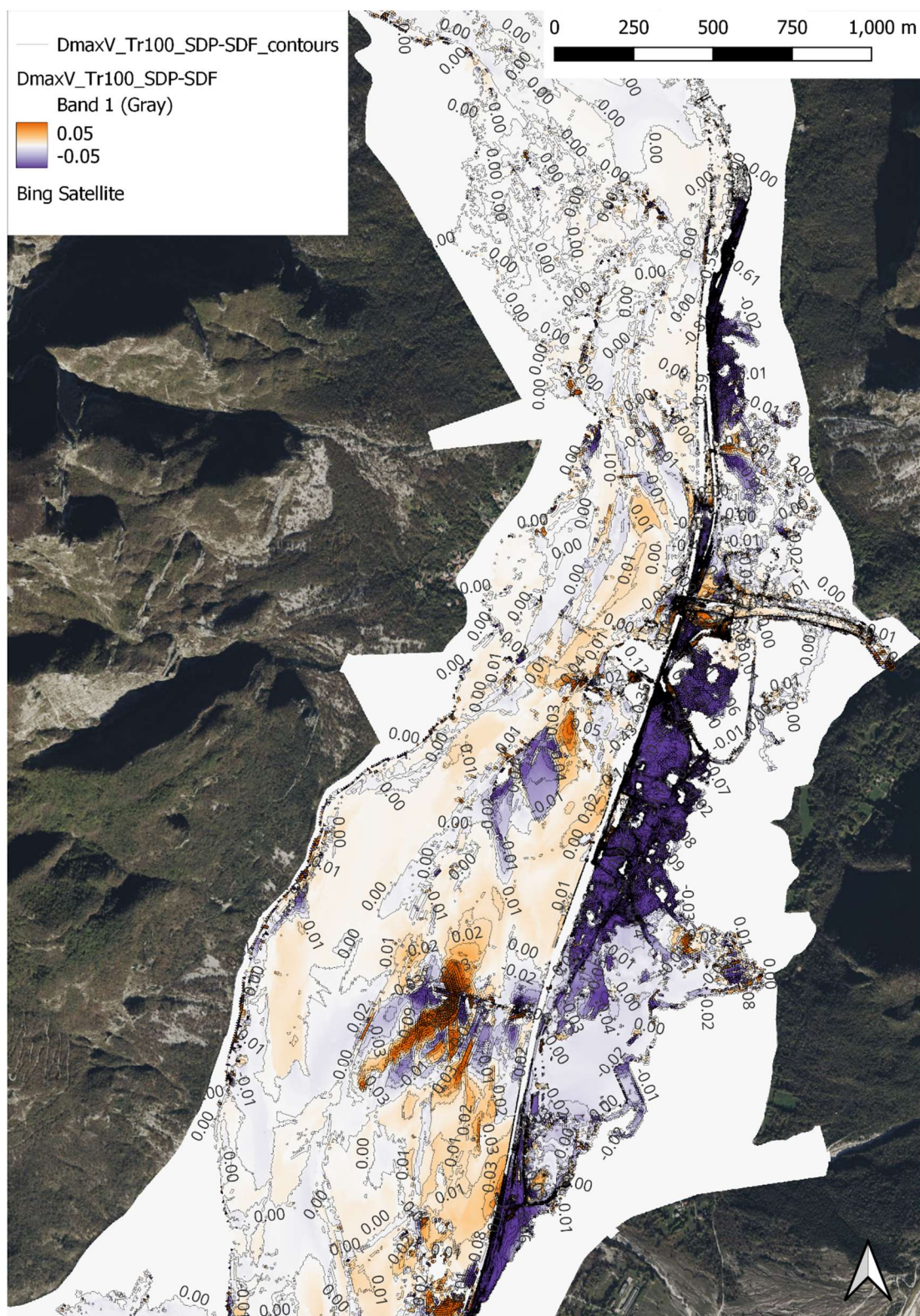
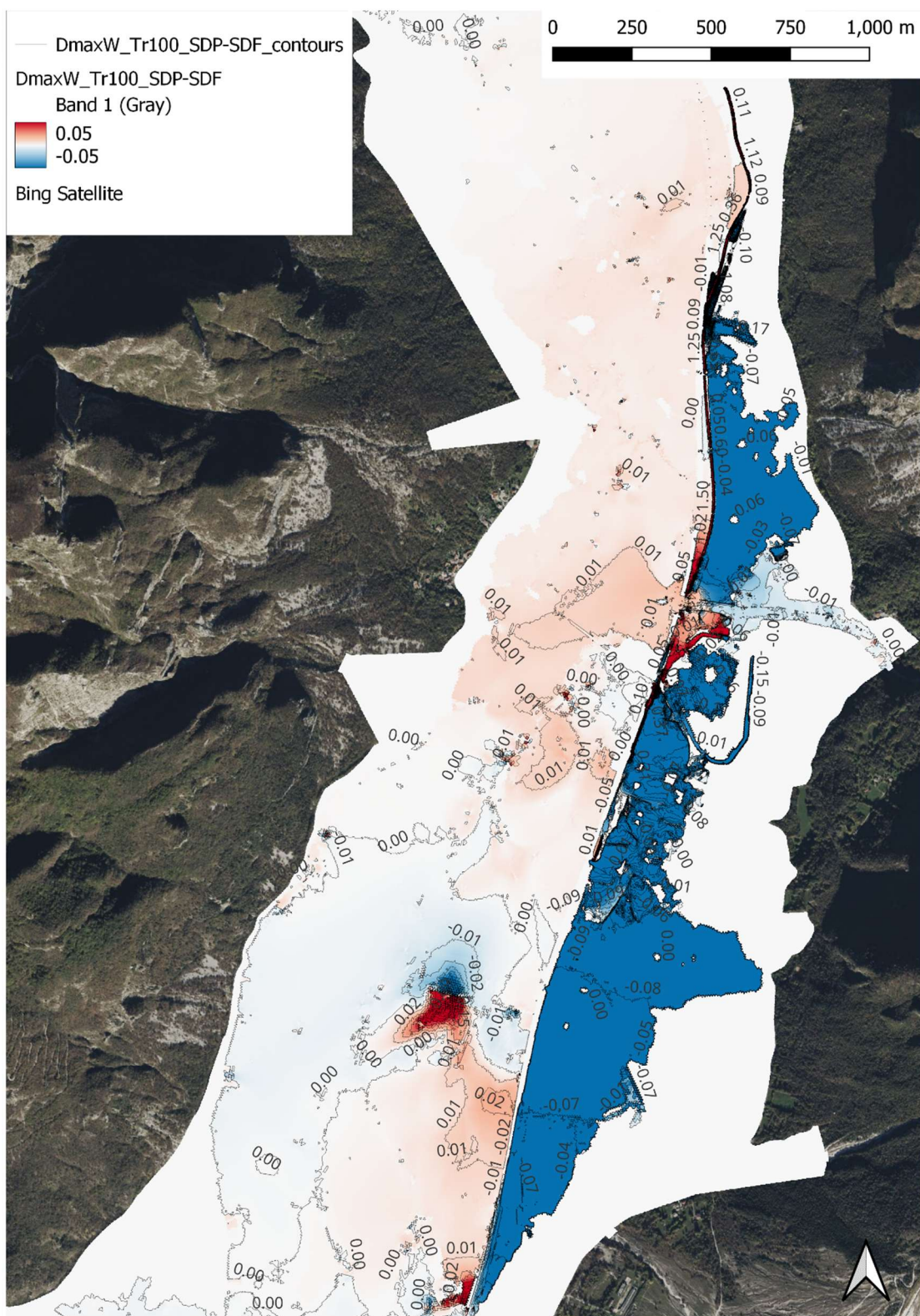


Figura 6.12 Mappa differenziale delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), SDP-SDF.



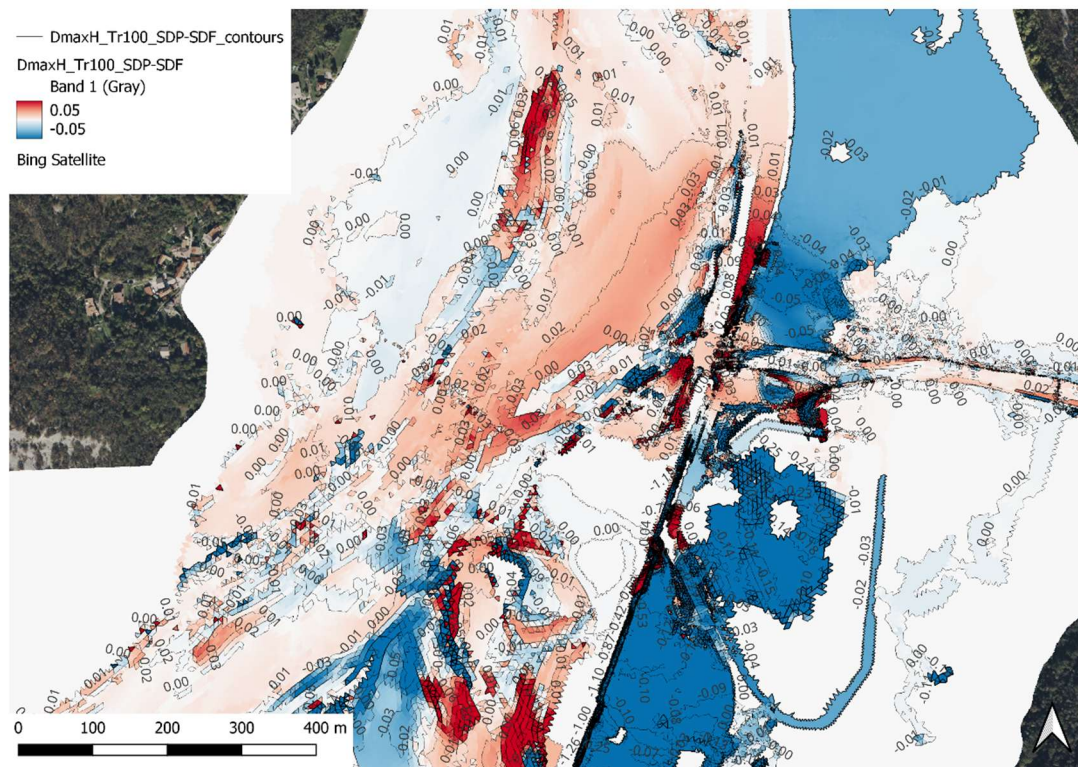


Figura 6.14 Mappa differenziale delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), SDP-SDF; particolare per la zona di Venzone.

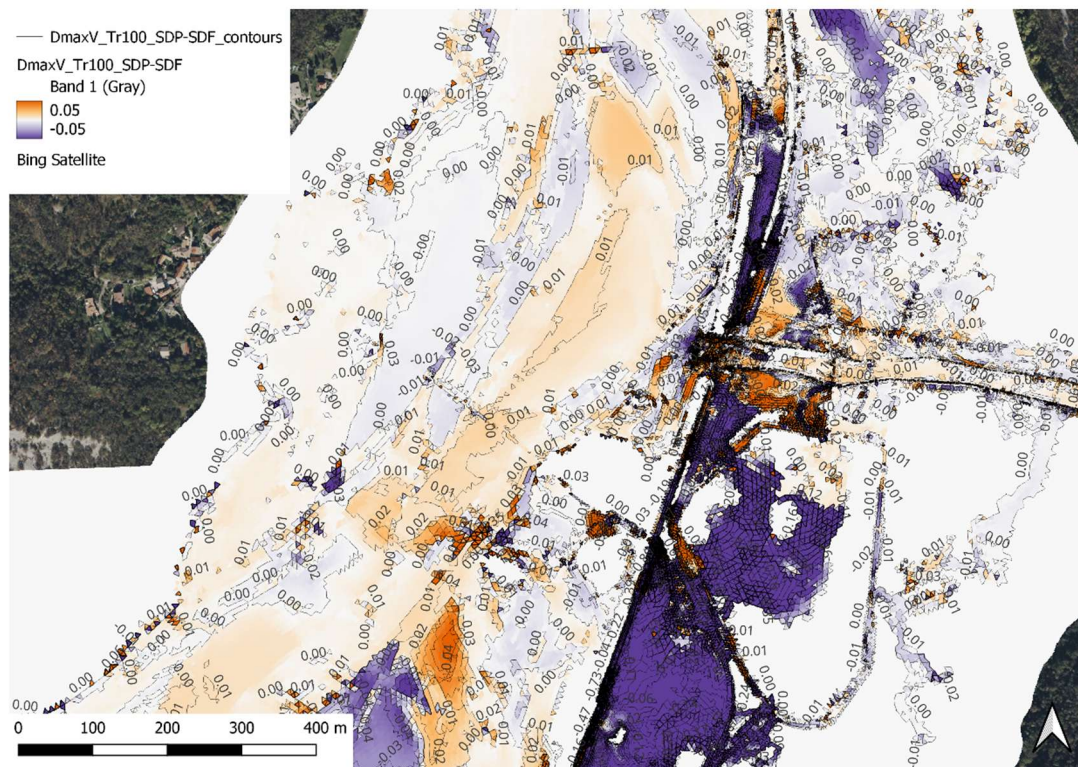


Figura 6.15 Mappa differenziale delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), SDP-SDF; particolare per la zona di Venzone.

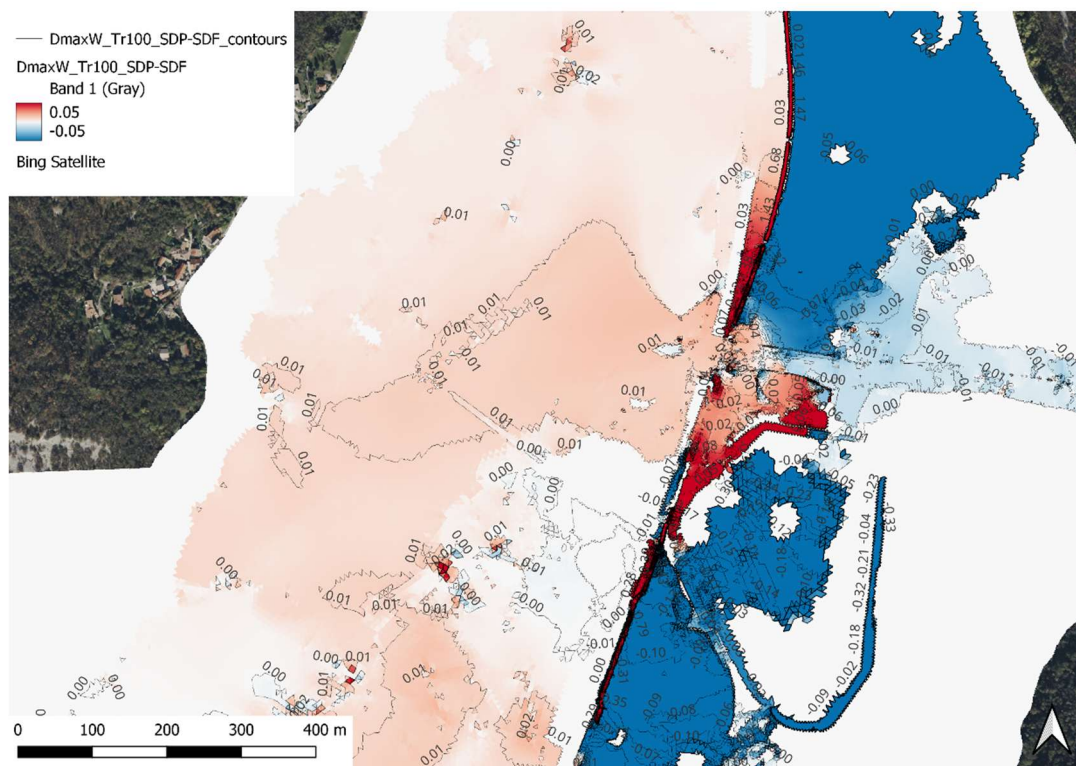


Figura 6.16 Mappa differenziale delle massime quote del pelo libero, in m (Tr 100), SDP-SDF; particolare per la zona di Venzone.

#### 6.4 Risultati ottenuti (SDF e SDP3): mappe differenziali delle variabili idrodinamiche

Le simulazioni hanno anche contemplato la possibilità di una variante al progetto (nella codifica adottata indicata come ‘SDP3’) che consiste in una variazione locale dell’altimetria della pista ciclabile a valle dell’incrocio fra la SS n. 13 Pontebbana e via Bidernuccio, ovvero la strada di accesso a Venzone.

In particolare, essendo presente un sottopasso della strada statale, si è valutata la variazione altimetrica del tracciato che permetta di raccordare tramite un andamento a ‘corda molle’ le quote iniziali e finali con la quota di fondo del sottopasso, in modo da agevolare l’ingresso a Venzone in condizioni di sicurezza, senza necessità quindi di attraversamenti della SS n. 13 stessa.

Le figure riportate alle pagine seguenti riportano le mappe differenziali alla stessa guisa della sezione precedente. Dalle figure, si può notare come anche tale configurazione produca delle alterazioni trascurabili ai campi idrodinamici di profondità dell’acqua, velocità della corrente e quote del pelo libero.

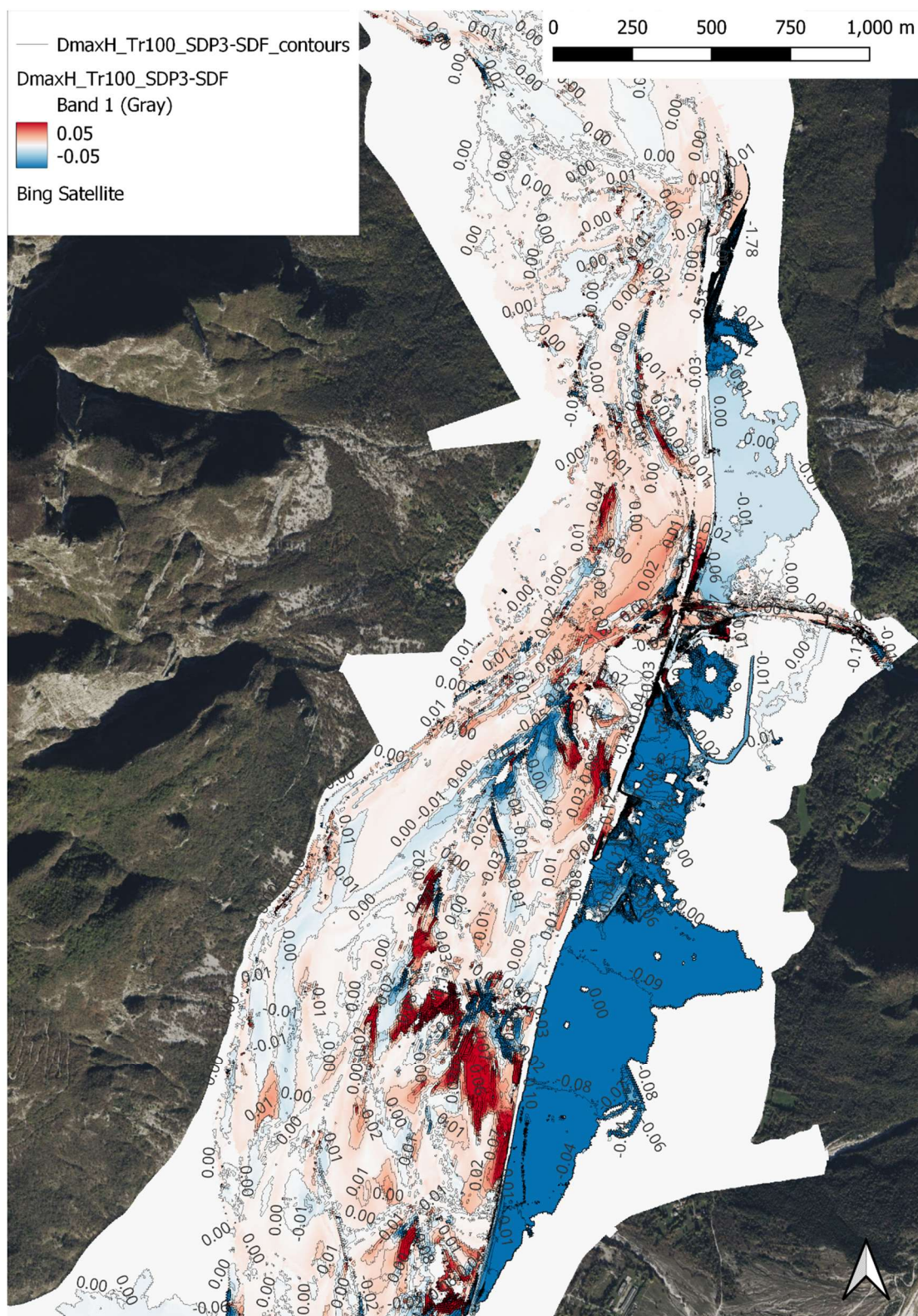


Figura 6.17 Mappa differenziale delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), SDP3-SDF.

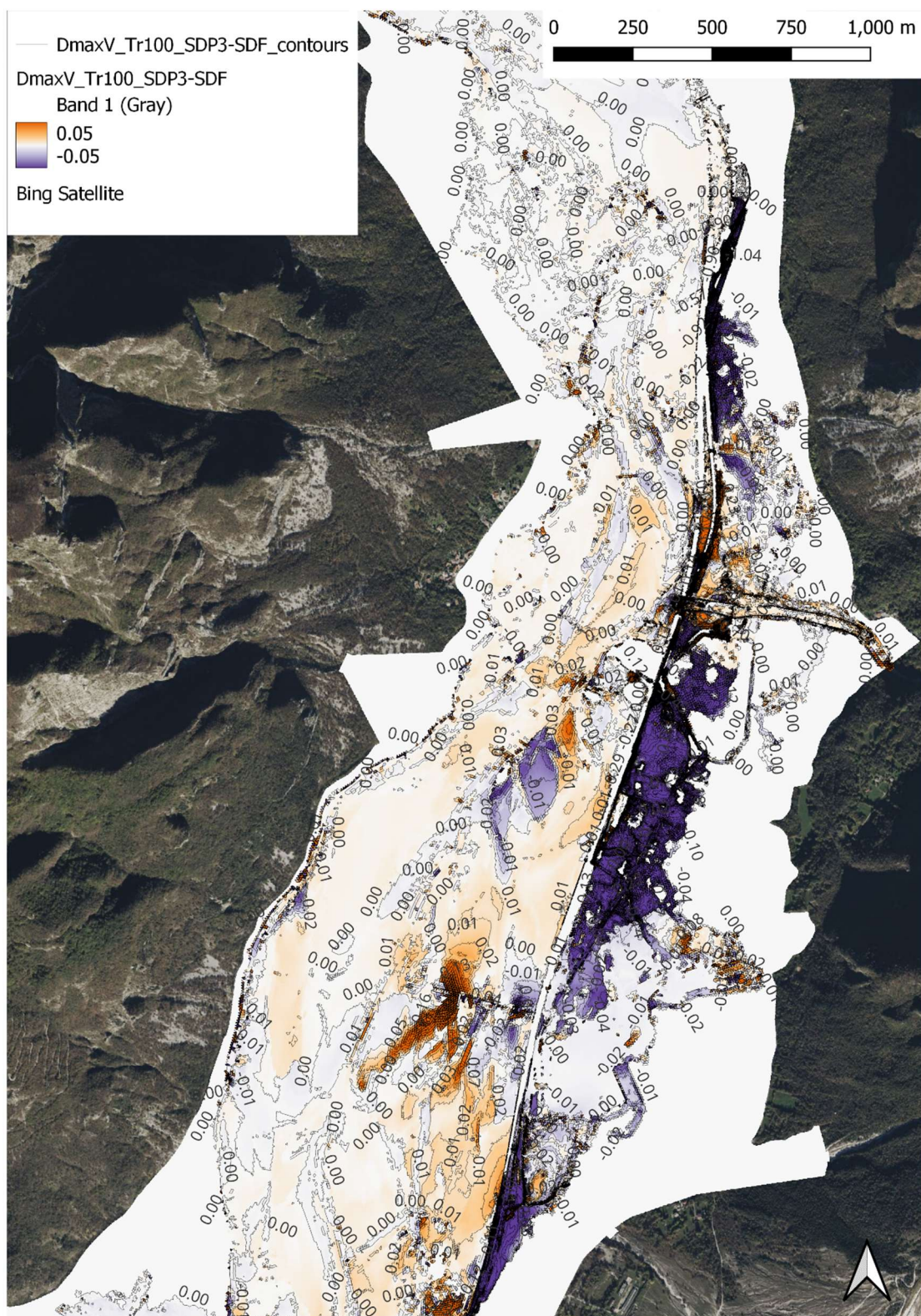


Figura 6.18 Mappa differenziale delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), SDP3-SDF.

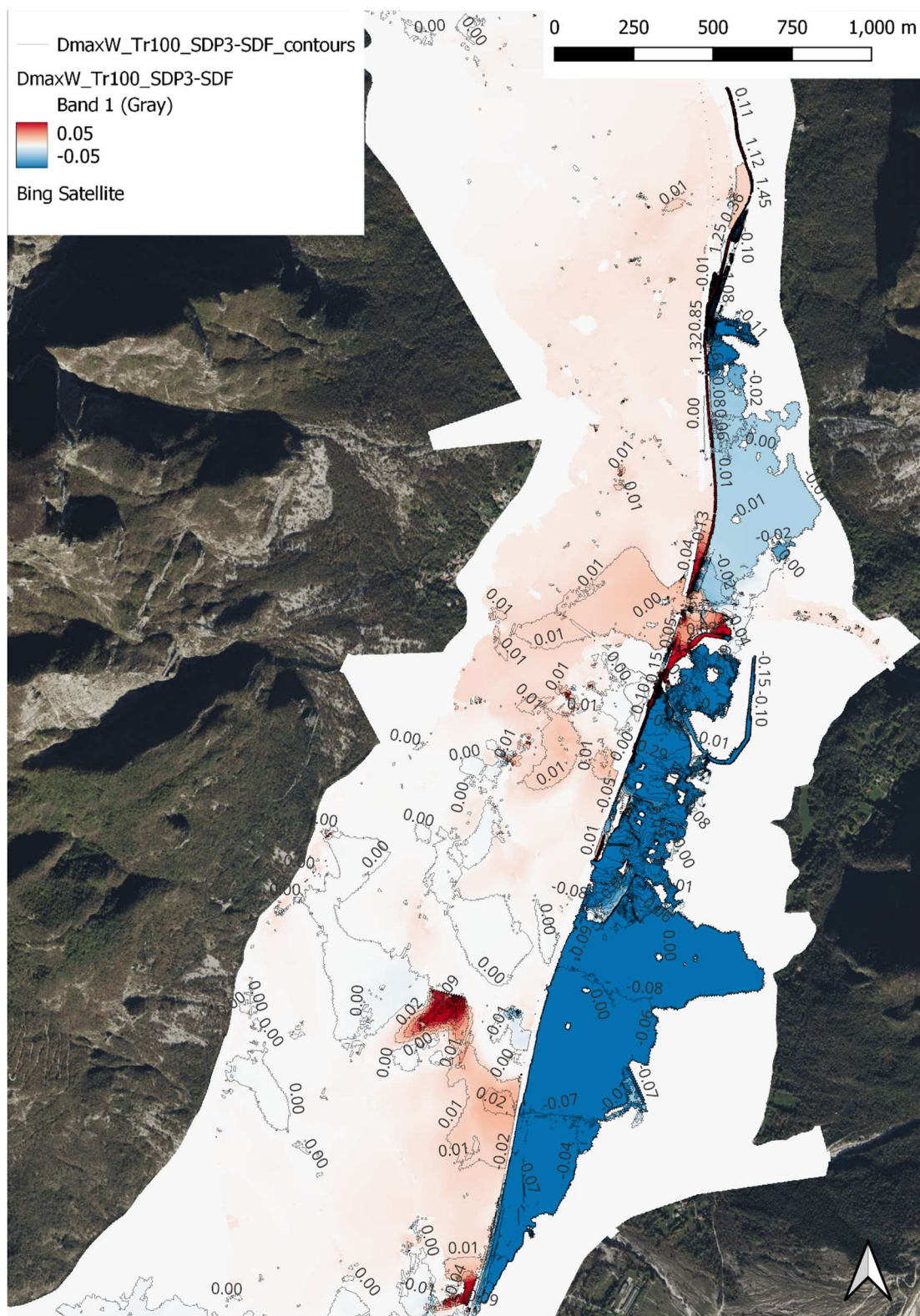


Figura 6.19 Mappa differenziale delle massime quote del pelo libero, in m (Tr 100), SDP-SDF.

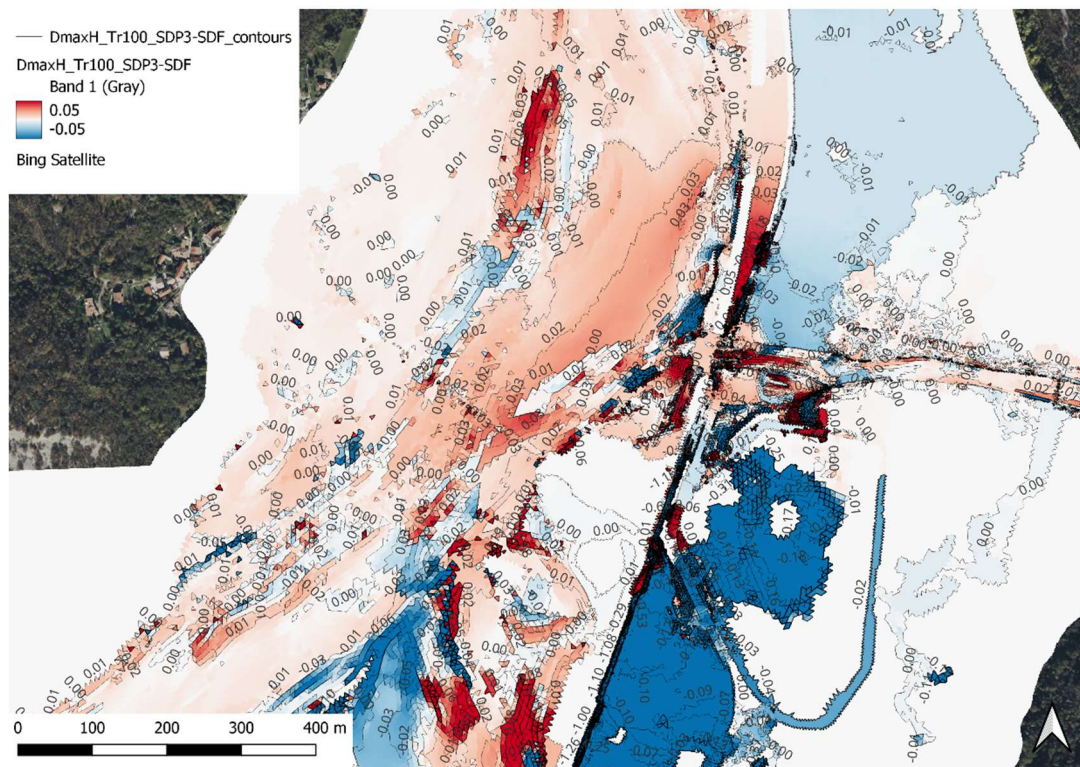


Figura 6.20 Mappa differenziale delle massime profondità dell'acqua, in m (Tr 100), SDP3-SDF; particolare per la zona di Venzone.

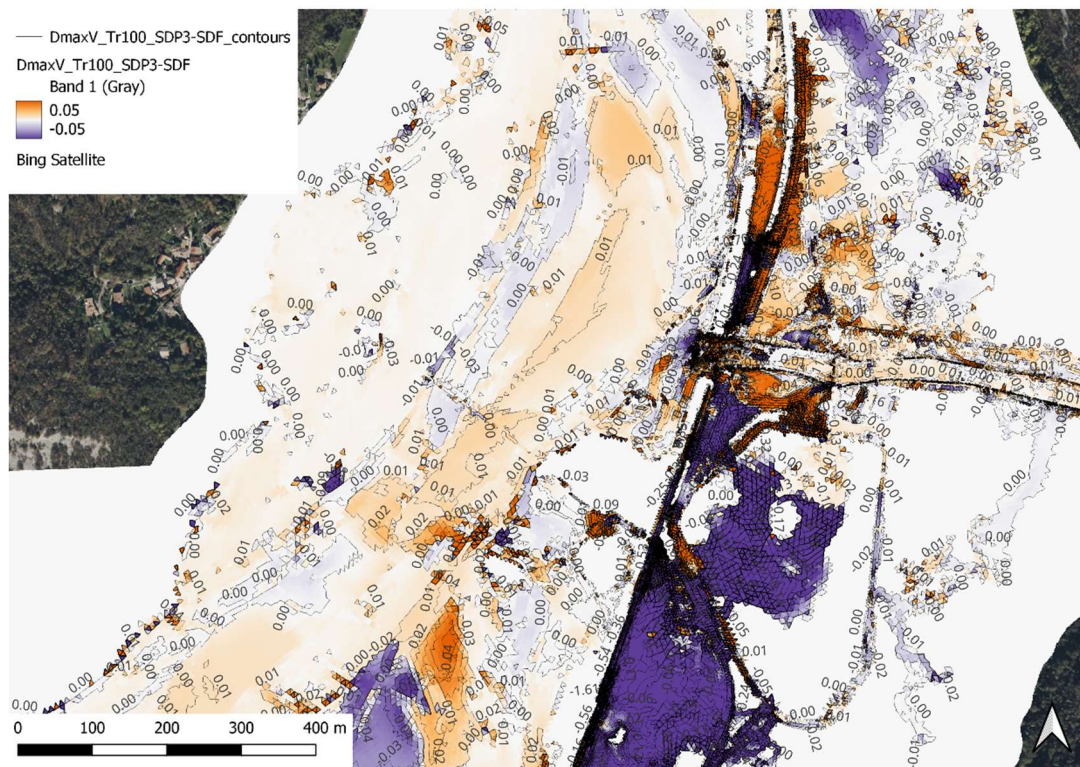


Figura 6.21 Mappa differenziale delle massime velocità della corrente, in m/s (Tr 100), SDP3-SDF; particolare per la zona di Venzone.

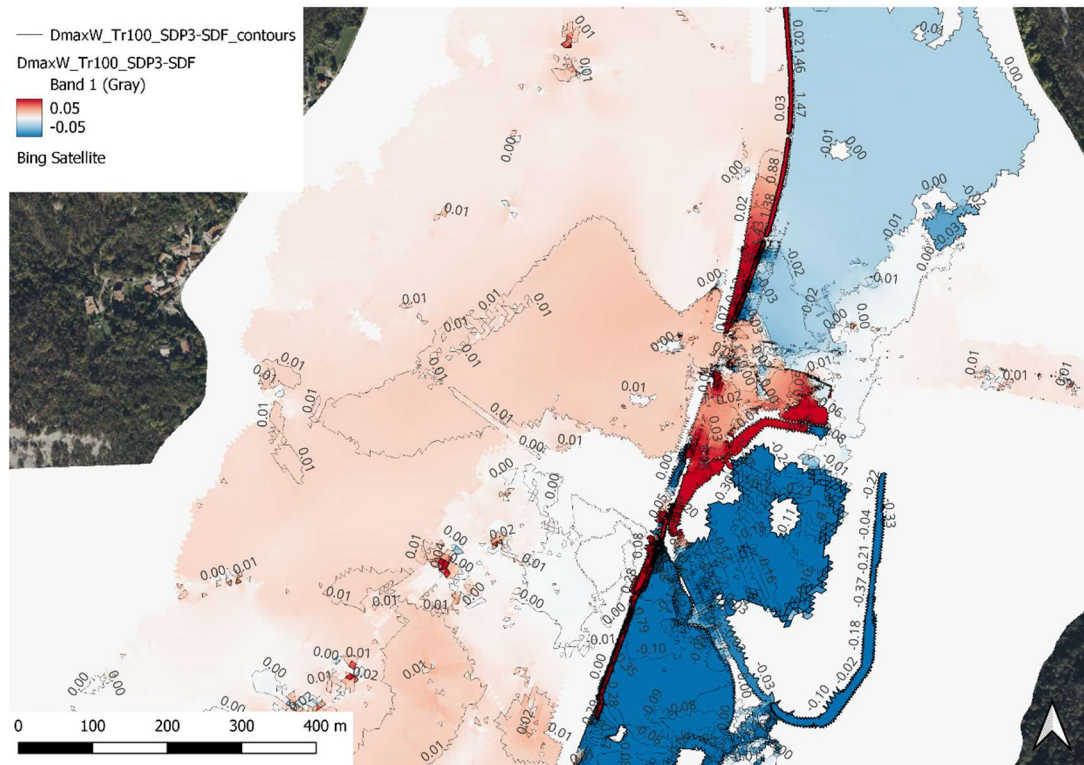


Figura 6.22 Mappa differenziale delle massime quote del pelo libero, in m (Tr 100), SDP3-SDF; particolare per la zona di Venzone.

## 7 Considerazioni conclusive e verifica di compatibilità idraulica dell'intervento

Il presente documento ha riportato la relazione idrologico-idraulica relativa alla verifica di compatibilità idraulica (VCI), in accordo con le Norme Tecniche di Attuazione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA 2021-2027), della pista ciclabile di collegamento Portis Vecchio – Venzone sull'ex sedime ferroviario, completamento FVG1, nell'ambito del Piano di completamento della rete ciclabile regionale del comprensorio del Gemonese FVG1 – FVG3 – FVG6.

In particolare, l'attuale classificazione delle mappe di pericolosità del PGRA prevede che il tracciato interessi porzioni di territorio mappate prevalentemente come P2 e P3. In base alle NTA del PGRA 2021-2027, la realizzazione della pista ciclabile deve quindi essere soggetta al posizionamento della stessa alla quota di sicurezza, ottenibile come sopraelevazione rispetto alla quota attuale del terreno del massimo tirante riportato nelle mappe di allagabilità per il tempo di ritorno pari a 100 anni.

Le analisi idrodinamiche, effettuate a fronte della realizzazione di un modello di simulazione bidimensionale a fondo mobile, hanno permesso di determinare i campi di profondità dell'acqua e velocità della corrente sia alla condizione attuale (stato di fatto, SDF) che in quella di progetto (SDP), onde verificare la compatibilità idraulica dell'intervento in termini di differenze fra le due condizioni. In particolare, la condizione allo SDP è consistita nel rialzo del piano della pista ciclabile, come richiesto dalle NTA del PGRA.

Nelle simulazioni, effettuate con riferimento al tempo di ritorno di 100 anni, sono stati contemplati sia gli eventi  $p_{max}$  e  $v_{max}$ , sia gli scenari di eventuale ostruzione degli attraversamenti che di crollo delle opere di difesa. Per quanto riguarda gli eventi più impulsivi (ovvero di tipo  $p_{max}$ ) è stato cautelativamente applicato un fattore amplificativo agli idrogrammi di piena, per tenere in considerazione gli effetti del cambiamento climatico in atto.

I risultati ottenuti sono stati riportati in termini di mappe di inviluppo dei massimi valori di profondità dell'acqua e di velocità della corrente, sia allo SDF che allo SDP. Ai fini della verifica di compatibilità idraulica, sono state riportate le mappe differenziali delle stesse variabili idrodinamiche, ottenute come differenze fra la configurazione allo SDP e la situazione allo SDF.

Dall'analisi delle mappe differenziali si può dedurre come la realizzazione della pista ciclabile abbia una influenza entro i valori tollerabili per quel che attiene ai campi idrodinamici, confermando la compatibilità idraulica dell'intervento, anche per quanto riguarda la variante 'SDP3', ovvero la modifica altimetrica in corrispondenza dell'incrocio fra la SS n. 13 Pontebbana e via Bidernuccio a Venzone.

Dott. ing. Matteo Nicolini