



## CASO DI STUDIO

---

Studio idraulico del Torrente Fersina con il software HYDRO-GIS

# HYDRO-GIS

Autore:  
ing. Michele Zucchelli

---

Anno di realizzazione: 2025

# Indice

1	Introduzione . . . . .	4
	1.1 Argomenti trattati . . . . .	4
	1.2 Il torrente Fersina . . . . .	4
2	Importazione delle mappe nel software . . . . .	8
3	Mappa a scabrezza variabile . . . . .	11
	3.1 Calcolo della scabrezza di Strikler . . . . .	11
	3.2 Creazione del vettore della scabrezza . . . . .	13
4	Analisi e correzione del Digital Terrain Model . . . . .	14
	4.1 Analisi del DTM . . . . .	14
	4.2 Correzione del DTM . . . . .	17
5	Individuazione del dominio di Calcolo . . . . .	21
6	Creazione della mesh . . . . .	23
7	Portata in ingresso . . . . .	26
8	Muri di sponda . . . . .	29
	8.1 Introduzione al problema . . . . .	29
	8.2 Riverwalls in HYDRO-GIS . . . . .	31
	8.3 Creazione file riverwalls con HYDRO-GIS . . . . .	31
	8.3.1 Tracciamento rapido delle polilinee . . . . .	32
	8.3.2 Segmentazione . . . . .	33
	8.3.3 Esplosione delle polilinee . . . . .	34
	8.3.4 Assegnazione delle quote . . . . .	35
9	Edificio in alveo . . . . .	38
	9.1 Operatori <i>Holes</i> . . . . .	38
10	Simulazione idraulica . . . . .	40
	10.1 Modello a fondo fisso . . . . .	40
11	Visualizzazione dei risultati . . . . .	47
	11.1 Opzioni grafiche . . . . .	47
	11.2 Interroga valori, controlli temporali . . . . .	48
	11.3 Visualizza sezioni . . . . .	49
	11.4 Risultati ottenuti . . . . .	50

# Lista delle figure

1	Lago di Erdemolo, sorgente del Torrente Fersina . . . . .	5
2	Forra di ponte alto . . . . .	5
3	Tratto cittadino del torrente Fersina in estate . . . . .	6
4	Tratto cittadino del torrente Fersina . . . . .	6
5	Creazione di un nuovo progetto . . . . .	9
6	Digital Terrain Model importato all'interno del progetto . . . . .	9
7	Ortofoto ad alta risoluzione (0.2 m) che copre il tratto cittadino del torrente Fersina	10
8	Curva granulometrica del materiale di subalveo del tratto cittadino del torrente Fersina . . . . .	12
9	Tabelle semplificate per la stima della scabrezza nelle aree golenali con vegetazione	12
10	Mappa raster finale della scabrezza come coefficiente di Manning, in trasparenza con l'ortofoto come sfondo . . . . .	13
11	Ponte dei cavalleggeri. A sinistra il grafico 3D delle quote consente di individuare l'errore; a destra l'ortofoto . . . . .	15
12	Ponte del cavalcavia. A sinistra il grafico 3D delle quote consente di individuare l'errore; a destra l'ortofoto . . . . .	16
13	Grafico 3D di un tratto di alveo. Si possono individuare due solchi a 'V' che non hanno riscontro nella realtà . . . . .	16
14	Muro di sponda molto sottile, in corrispondenza della fine del tratto, sponda sinistra. Non viene proprio rilevato dal DTM . . . . .	17
15	Shapefile utilizzato per la correzione delle quote del Digital Terrain Model, Ponte dei Cavalleggeri . . . . .	18
16	Shapefile utilizzato per la correzione delle quote del Digital Terrain Model, Ponte del Cavalcavia . . . . .	18
17	Tabella degli attributi del file vettoriale utilizzato per la correzione delle quote; è possibile vedere i valori delle quote assegnate a ciascuna geometria . . . . .	19
18	Finestra del software HYDRO-GIS utilizzata per modificare le quote del DTM, una volta creato il vettore necessario . . . . .	19
19	Grafico 3D del DTM una volta corretto; la sezione di deflusso del Ponte dei Cavalleggeri è stata ripristinata in maniera soddisfacente . . . . .	20
20	Grafico 3D del DTM una volta corretto; la sezione di deflusso del Ponte del cavalcavia è stata ripristinata in maniera soddisfacente . . . . .	20
21	Dominio di calcolo, delineato tramite un semplice file vettoriale con geometrie di tipo 'linea' . . . . .	21
22	Tabella degli attributi del file vettoriale 'bordo del dominio' . . . . .	22
23	File degli interiors, visuale sull'intero tratto del Fersina . . . . .	24
24	File degli interiors, si veda come è stata evitata la sovrapposizione parziale dei poligoni!	24
25	File degli interiors, si vedono i due poligoni annidati e cosa comprendono . . . . .	25
26	Tabella attributi del file degli interiors, si vede la risoluzione assegnata a ciascun poligono . . . . .	25
27	File vettoriale degli inlets. É tracciato un poligono per modellare la cascata. In Figura è riportata anche la tabella degli attributi del vettore . . . . .	26

28	Idrogramma registrato dall'idrometro posto sul Fersina, a Trento . . . . .	27
29	Portata registrata dal 1999 al 2025 dal sensore di livello posto nel Fersina a Trento	27
30	File delle variabili temporali. Si può vedere l'idrogramma triangolare in ingresso all'operatore di inlet . . . . .	28
31	Muro sottile: a sinistra e destra ha quote sensibilmente più basse . . . . .	29
32	Muro sottile: a sinistra e destra ha quote sensibilmente più basse . . . . .	30
33	Polilinee tracciate sopra i muri di sponda . . . . .	32
34	Polilinee lungo l'asse centrale del muro per favorire l'assegnazione della quota da DTM . . . . .	33
35	Finestra <i>Crea segmenti</i> del software HYDRO-GIS . . . . .	33
36	Risultato della segmentazione, ora c'è almeno un punto ogni 5 metri . . . . .	34
37	Finestra <i>Esploidi linee</i> del software HYDRO-GIS . . . . .	34
38	Risultato dell'esplosione delle linee, vengono creati 279 segmenti distinti . . . . .	35
39	Finestra <i>Statistiche raster</i> (in geometrie vettoriali) del software HYDRO-GIS . . .	35
40	Tabella degli attributi del vettore ottenuto. Il campo 'max' è stato rinominato in 'z_top' per Anuga . . . . .	36
41	Risultato dell'assegnazione delle quote . . . . .	36
42	Esempio di errore grossolano che salta subito all'occhio . . . . .	37
43	Vettore dei Riverwalls finale, colorato con la colormap <i>gist_ncar_r</i> . . . . .	37
44	File vettoriale degli 'holes' . . . . .	39
45	Prima e seconda pagina del Notebook . . . . .	42
46	Terza e quarta pagina del Notebook . . . . .	42
47	Mesh triangolari generate da Anuga nella zona del Ponte dei Cavalleggeri. Si vedono le tre zone a risoluzione distinta (alveo, vicino all'alveo e lontano dall'alveo) e anche il 'buco' inserito per simulare l'edificio immediatamente a valle del Ponte . . . . .	43
48	Condizioni al contorno associate ad ogni segmento del bordo del dominio, nella zona finale del tratto cittadino del torrente Fersina. . . . .	43
49	Idrogramma triangolare . . . . .	44
50	Simulazione avviata. L'avanzamento è visibile nel pannello di log. . . . .	45
51	Fine della simulazione, è possibile procedere alla visualizzazione dei risultati. . . .	46
52	Pannello per la visualizzazione dei risultati delle simulazioni idrauliche . . . . .	47
53	Nascondere i valori con tirante nullo, in modo da visualizzare solo le celle con un tirante positivo. . . . .	48
54	Visualizzazione soluzioni, interrogazione in un punto . . . . .	49
55	Visualizzazione di sezioni . . . . .	50
56	Tiranti nel dominio immediatamente dopo il passaggio della portata di picco: non c'è stata nessuna esondazione! . . . . .	51
57	Tiranti, ponte dei Cavalleggeri . . . . .	51
58	Modulo della velocità, Buca delle dame di Sion (vicino al liceo Galileo Galilei) . . .	52
59	Inizio del tratto cittadino del torrente Fersina. Sono rappresentati il modulo della velocità e le frecce di flusso . . . . .	52
60	Esempio di sezione del tratto di monte, che va dalla cascata fino al ponte dei Cavalleggeri. Anche durante il passaggio del colmo rimane un franco di circa un metro e mezzo (anche se ci sono sezioni con franco minore, di circa un metro) . . . . .	53
61	Nel tratto dal Ponte dei Cavalleggeri in giù il franco è minore (oscilla da mezzo metro al metro) . . . . .	53
62	Visualizzazione di un tratto di alveo in 3D, in scala (x,y) - z di 1:3 . . . . .	54

# 1 Introduzione

## 1.1 Argomenti trattati

In questo documento verrà mostrato un esempio di modellazione idraulica realizzata con il software HYDRO-GIS. Verrà valutata la sicurezza idraulica della città di Trento in relazione al pericolo di esondazione del Fersina, un torrente che attraversa l'abitato in un tratto lungo più di due chilometri.

È stato scelto appositamente un caso di studio molto complesso, in modo da evidenziare molte delle funzionalità di HYDRO-GIS, per esempio nella correzione degli errori di un DTM e di alcuni operatori, come i riverwalls.

Al fine di fornire al lettore una panoramica degli argomenti trattati in questo caso di studio, si riporta qui di seguito un elenco sommario dei punti principali toccati:

- Importazione e preparazione delle mappe GIS di partenza (Digital Terrain Model, ortofoto, ecc...)
- Correzione del Digital Terrain Model presso ponti e muri di sponda, se sono presenti errori
- Creazione di una mappa a scabrezza variabile con coefficiente di Manning
- Creazione del file del bordo del dominio, con le relative condizioni al contorno
- Creazione del file degli *inlets* per modellare l'ingresso di portata della cascata situata sotto Ponte Cornicchio.
- Creazione del file degli *interiors*, e quindi creazione delle mesh triangolari all'interno del dominio
- Creazione del file *riverwalls* per modellare muri di sponda, in input alla simulazione idraulica
- Utilizzo del file degli *holes* per modellare un edificio presente in alveo
- Modello a fondo fisso, di HYDRO-GIS, basato sulla libreria python ANUGA
- Simulazione idraulica
- Visualizzazione dei risultati

## 1.2 Il torrente Fersina

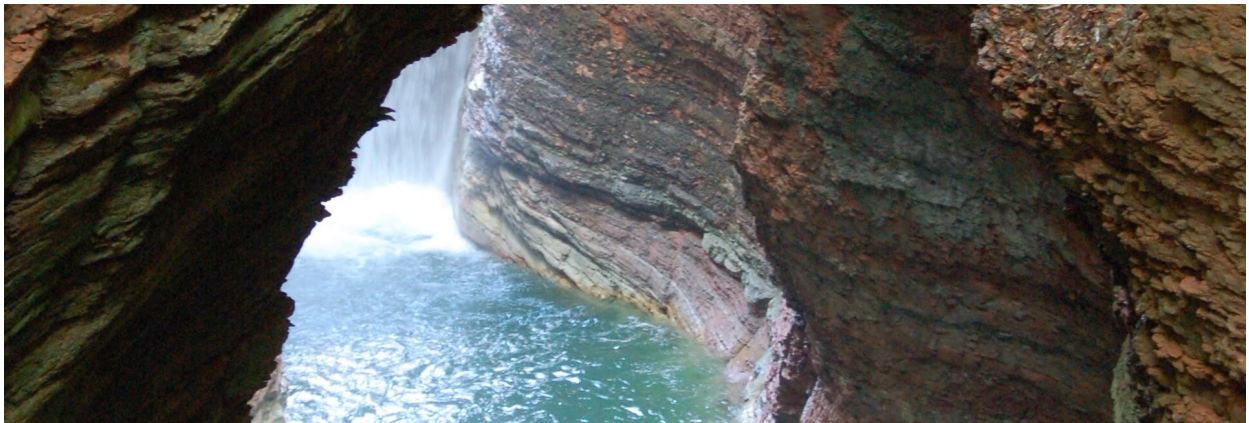
L'asta del torrente Fersina si estende per una lunghezza di quasi 30 km in totale. Le sue acque sono utilizzate a scopi idroelettrici e irrigui, con numerosi punti di prelievo lungo tutto il percorso.

Nasce dal lago di Erdemolo a 2036 m al margine occidentale della catena del Lagorai (in Figura 1), scorre nella Valle dei Mocheni (in mocheno "Bersntol", cioè appunto "valle del Fersina"), lambisce la Valsugana (dalla quale è separato dalla sella di Pergine) e qui riceve da destra il torrente Silla proveniente dall'altopiano di Piné, quindi, dopo aver percorso la profonda forra dell'orrido di Ponte Alto (Figura 2), attraversa la città di Trento (Figura 4) dove sfocia infine nell'Adige .

L'analisi idraulica verrà fatta esclusivamente sul tratto cittadino del torrente Fersina, ossia il tratto che scorre attraverso l'abitato della città di Trento, a partire da Ponte Cornicchio fino al fiume Adige.



**Figura 1:** Lago di Erdemolo, sorgente del Torrente Fersina



**Figura 2:** Forra di ponte alto



**Figura 3:** Tratto cittadino del torrente Fersina in estate



**Figura 4:** Tratto cittadino del torrente Fersina

Il torrente Fersina ha una portata media compresa tra 250 e 300 litri al secondo, ma è noto per la sua imprevedibilità a causa delle forti variazioni di portata. Nei periodi più secchi può scendere fino a  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , mentre nei momenti di piena ha raggiunto valori estremi, come i  $180 \text{ m}^3/\text{s}$  registrati durante l'alluvione del 1882. La sua storia idrologica è segnata da numerosi eventi alluvionali: dal 1239 al 2010 si contano almeno venticinque episodi significativi, molti dei quali documentati nei conventi di Santa Chiara, San Bernardino e Santa Croce a Trento. Tra le piene più devastanti si ricordano quelle del 1575 e del 1748, che colpirono duramente Pergine, mentre l'alluvione del 1882 fu la più disastrosa in assoluto, causando gravi danni anche in Val dei Mocheni e mettendo a rischio l'intero abitato di Canezza.

Nel corso dei secoli, sono stati realizzati diversi interventi per contenere e regimentare il Fersina. Tra le opere più importanti si segnalano le serre nella forra di Ponte Alto, volute dal principe vescovo Bernardo Clesio nel 1537. Strutture simili sono presenti anche in altre località lungo il corso del torrente, tra cui Cantanghel (Civezzano), Ponte Lodovico (tra San Donà e Mesiano) e Ponte Cornicchio, situato a Trento lungo viale Trieste.

## 2 Importazione delle mappe nel software

La prima operazione da fare è creare un nuovo progetto e importare il Digital Terrain Model (DTM), le ortofoto ed eventuali mappe ulteriori. Per creare un nuovo progetto è possibile eseguire il software HYDRO-GIS e attendere il caricamento della schermata di apertura dei progetti. Quindi digitare su 'crea nuovo progetto' (icona in alto a sinistra, Figura 5), assegnare un nome al progetto (in questo caso abbiamo scelto il nome 'studio\_torrente\_fersina') e fare quindi click su 'ok'.

A questo punto è possibile impostare il sistema di riferimento di progetto e la risoluzione spaziale di import dei raster attraverso la finestra 'C.R.S.'. Sono ammessi come sistemi di riferimento validi tutti i sistemi proiettati che utilizzano i metri come unità di riferimento spaziale (sono comunque la maggior parte dei sistemi di riferimento esistenti). Con questa finestra è possibile specificare il sistema scelto attraverso il suo codice EPSG. Una scelta intelligente potrebbe essere quella di impostare la risoluzione di import a un valore bassissimo, come 0.1 m. In questo modo ogni raster verrà importato con la sua risoluzione spaziale originale.

In alternativa, è possibile impostare CRS e risoluzione importando semplicemente una mappa raster, come ad esempio il Digital Terrain Model. In questo caso il CRS di progetto coinciderà con quello della prima mappa caricata e così anche la risoluzione. Questo metodo è più semplice del precedente ed è il metodo che utilizzeremo in questa esercitazione.

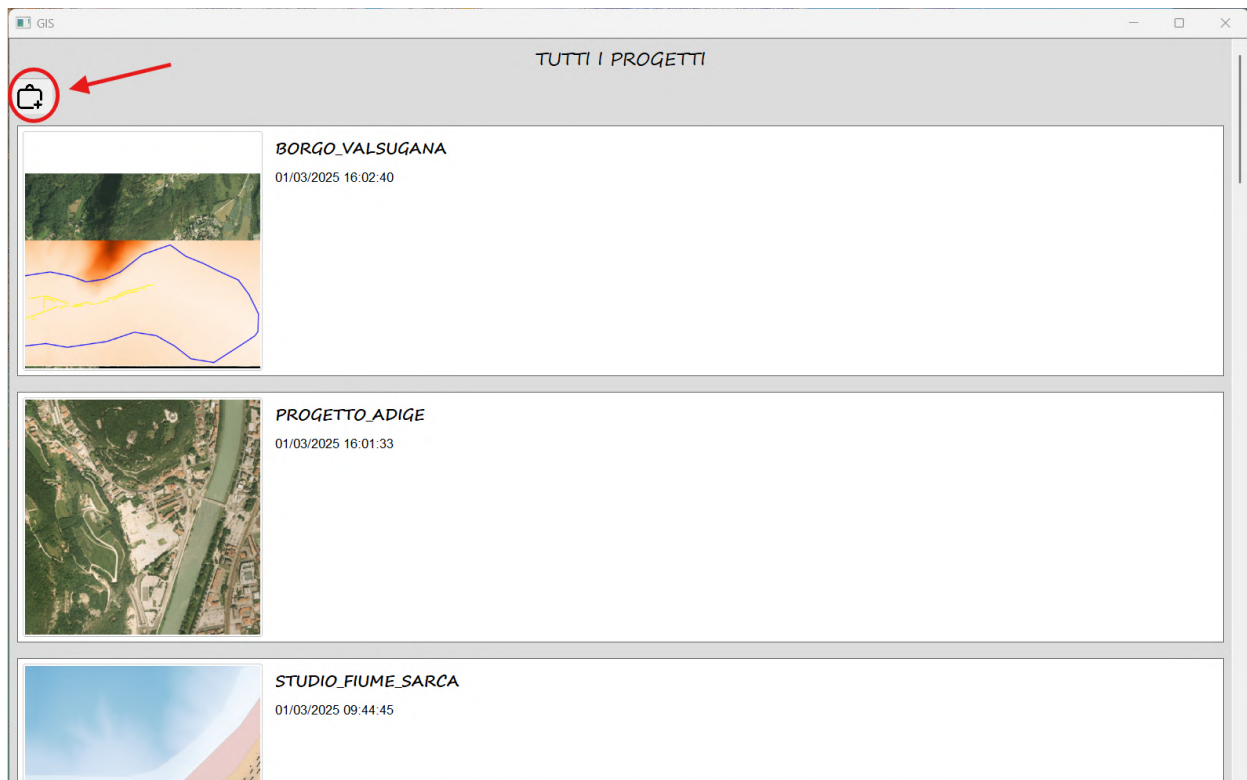
Dalla sezione 'raster' faremo quindi click su 'importa raster', quindi navigheremo le cartelle fino alla posizione del DTM e lo importeremo con doppio click. In Figura 6 è possibile vedere il Digital Terrain Model che racchiude il tratto di interesse del torrente Fersina importato all'interno del nostro progetto nel software HYDRO-GIS.

A questo punto proseguiremo con gli import delle due ortofoto che servono per coprire tutta l'area di interesse del Fersina. Una volta importate è possibile (anche se facoltativo) utilizzare le operazioni 'ritaglia raster' e 'unisci raster' per eliminare quelle parti che non servono delle ortofoto e unire le parti che invece servono in un unico file. Il metodo concettualmente più semplice per fare ciò è il seguente:

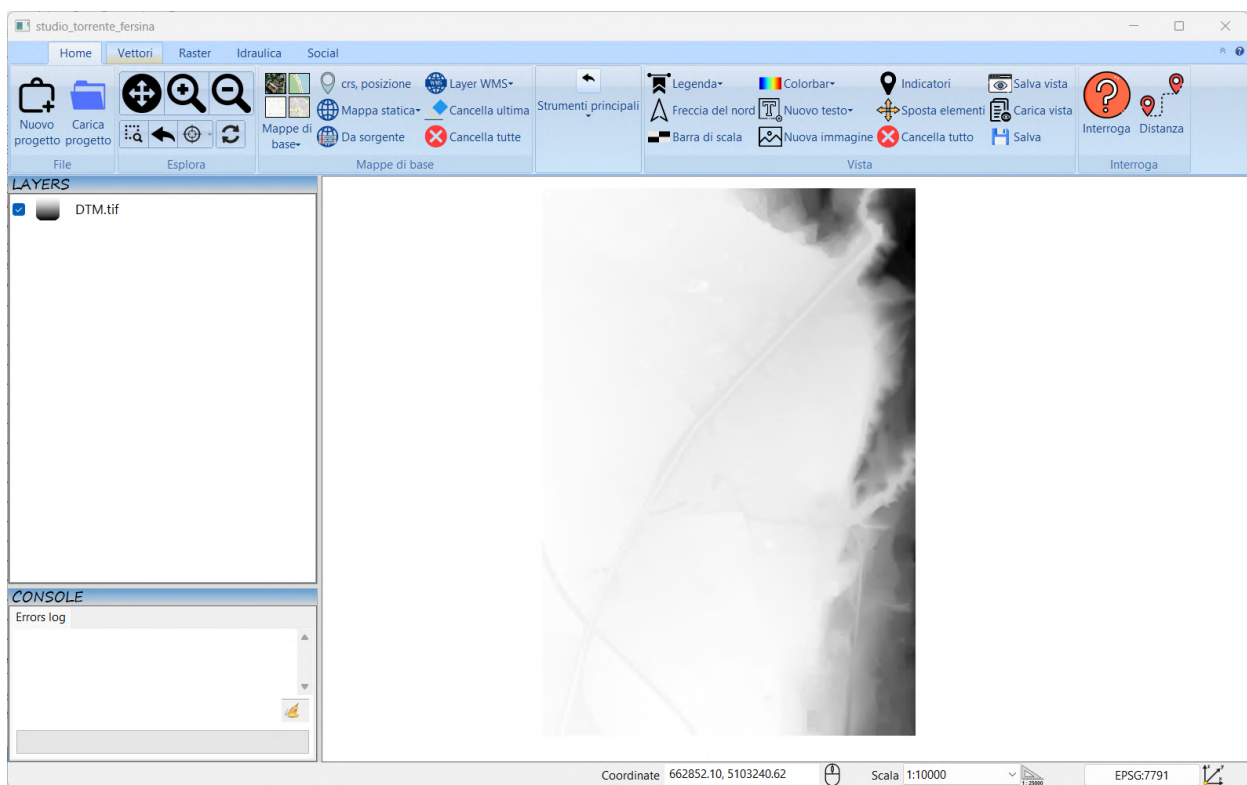
- Utilizzare lo strumento "Unisci raster" e unire i due files interi
- Utilizzare la funzione "taglia raster" disegnando con il mouse (tramite il pulsante "draw") un rettangolo che racchiuda solo l'area di interesse

In Figura 7 è possibile vedere il risultato dell'unione + ritaglio di due ortofoto di partenza.

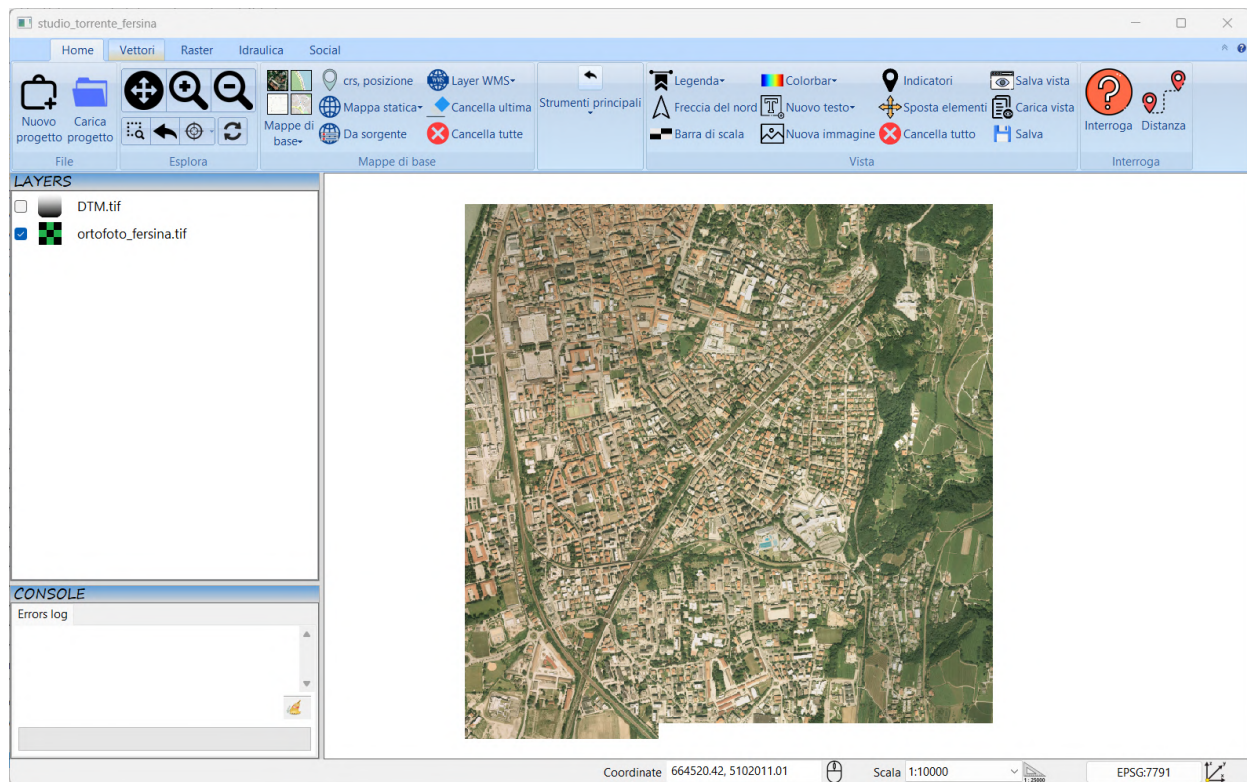
NB: Importare ortofoto ad alta risoluzione (es: 0.2 metri) è meglio che utilizzare mappe online, che sono tra l'altro una funzionalità offerta dal software HYDRO-GIS, perchè sono mappe più precise e, essendo state realizzate ad una scala più ridotta, non presentano distorsioni o quasi.



**Figura 5:** Creazione di un nuovo progetto



**Figura 6:** Digital Terrain Model importato all'interno del progetto



**Figura 7:** Ortofoto ad alta risoluzione (0.2 m) che copre il tratto cittadino del torrente Fersina

## 3 Mappa a scabrezza variabile

### 3.1 Calcolo della scabrezza di Strikler

Il tratto cittadino del torrente Fersina è fortemente antropizzato, con presenza continuativa di opere idrauliche, tra cui soglie e scivoli di calcestruzzo. Nonostante ciò presenta anche tratti vegetati lungo le sponde, che gli conferiscono un aspetto semi-naturale, e un tratto con grossi massi ciclopici a valle della prima curva dopo la cascata. Per questo motivo è importante effettuare una modellazione della scabrezza variabile nello spazio, in modo da cercare di tenere conto di tutti questi aspetti.

Determinare la scabrezza della vegetazione in modo accurato è già difficile di per se, dovendo seguire linee guida diverse in base alla posizione geografica. A ciò si aggiunge il fatto che l'attività vegetativa varia con le stagioni. In estate, infatti, la vegetazione raggiunge la massima crescita ed espansione, causando un aumento considerevole della scabrezza spondale. Al contrario, in inverno, la vegetazione è al suo minimo causando quindi un incremento modesto.

Inoltre va tenuto conto che la vegetazione spondale è soggetta a sfalci periodici (ogni cinque anni) da parte della Provincia Autonoma di Trento, proprio al fine di contenere l'aumento della scabrezza e garantire quindi la sicurezza idraulica dei cittadini. Infine va tenuto conto anche del tipo di specie arbustive presenti. Il salice, l'ontano, l'aliante e altre specie simili infatti sono molto flessibili e durante una piena possono anche flettersi completamente e offrire davvero poca resistenza al moto dell'acqua, soprattutto se sono piante giovani.

In questa esercitazione ipotizzeremo condizioni di vegetazione rigogliosa (estate, niente sfalci) e utilizzeremo le linee guida del PGUAP (Piano generale di utilizzazione delle acque pubbliche) e in particolare le tabelle semplificate. Invece, per quanto riguarda la scabrezza di subalveo faremo riferimento curva granulometrica calcolata in un precedente studio idraulico del Fersina<sup>1</sup> per determinare il diametro caratteristico ( $d_{90}$  o  $d_{50}$ ) e le formule presenti sempre nel PGUAP per il calcolo del coefficiente di Strikler  $K_s$ .

$$K_s = \frac{21.1}{d_{50}^{1/6}} \quad \text{formula di Strikler} \quad \left[ \frac{m^{1/3}}{s} \right] \quad (1)$$

$$K_s = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \quad \text{formula di Henderson} \quad \left[ \frac{m^{1/3}}{s} \right] \quad (2)$$

In Figura 8 si può vedere la curva granulometrica di materiale di subalveo (sotto il corazzamento) che permette di calcolare il diametro caratteristico  $d_{50} = 1.5 [mm]$ . La scabrezza si calcola quindi da equazione 1.

---

<sup>1</sup>Pelagatti, 2019, *Risistemazione del tratto cittadino del torrente Fersina*

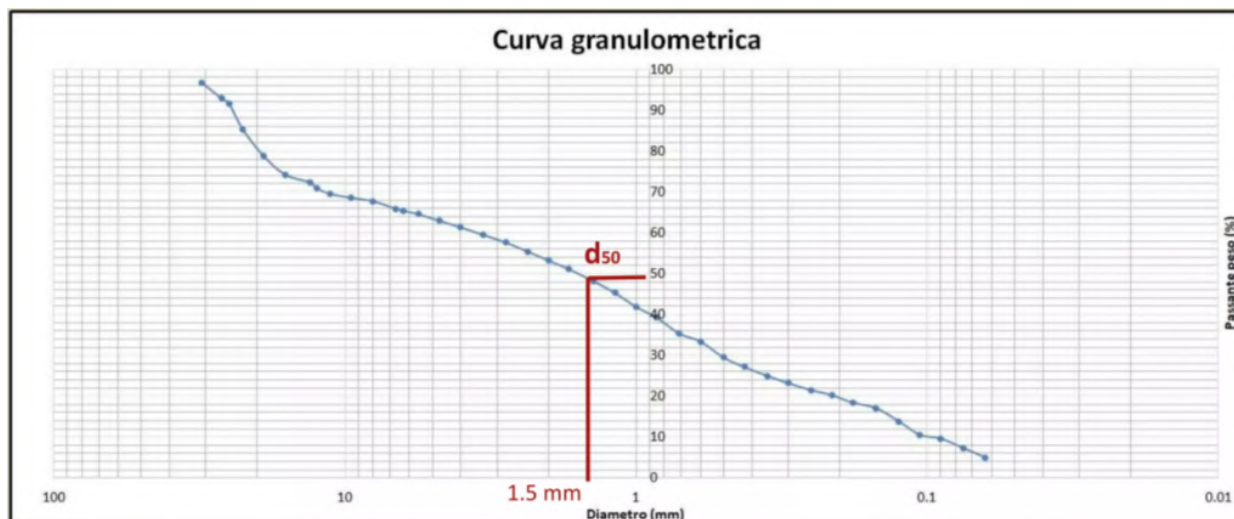


Figura 8: Curva granulometrica del materiale di subalveo del tratto cittadino del torrente Fersina

$$K_s = \frac{21.1}{(1.5 \cdot 10^{-3})^{1/6}} = 62.36 \quad [m^{1/3}/s]$$

Con la formula legata al  $d_{90}$ , invece, si avrebbe:

$$K_s = \frac{26}{(23 \cdot 10^{-3})^{1/6}} = 48.8 \quad [m^{1/3}/s]$$

Come si può vedere, sono due valori abbastanza diversi tra loro. Per questo motivo si andrà a prendere come valore di scabrezza la media tra i due. Quindi:

$$K_s = 56 \frac{m^{1/3}}{s}$$

Può sembrare strano che il coefficiente di Strikler sia così elevato (e quindi la scabrezza di subalveo sia così bassa) per un torrente semi-montano come il Fersina. Ciò è probabilmente legato alla particolare conformazione di questo corso d'acqua e cioè alle numerose opere idrauliche (serre, cascate, soglie) che lo caratterizzano e che ne smorzano l'energia, così come anche i numerosi prelievi idroelettrici e irrigui che ne riducono la portata, al di fuori delle piene con tempo di ritorno elevato.

Per quanto riguarda la stima della scabrezza dei tratti con vegetazione si fa sempre riferimento al PGUAP, e in particolare alle tabelle semplificate (Figura 9). Siccome sul torrente è presente vegetazione arbustiva (salice, aliante, robinia, ecc...) spontanea più o meno fitta, salvo sfalci, la scabrezza oscillerà da un valore di  $K_s = 15$  a un valore di  $K_s = 25$ .

<b>Aree golenali (raggio idraulico <math>\approx 1</math> m)</b>	
• a pascolo, senza vegetazione arbustiva	40 ÷ 20
• coltivate	50 ÷ 20
• con vegetazione arbustiva spontanea	25 ÷ 10
• con vegetazione arborea coltivata	30 ÷ 20

Figura 9: Tabelle semplificate per la stima della scabrezza nelle aree golenali con vegetazione

## 3.2 Creazione del vettore della scabrezza

L'obiettivo finale che bisogna raggiungere è creare una mappa raster a scabrezza variabile, dove questa sia espressa come coefficiente di Manning. Infatti, la libreria python *Anuga* su cui è basato HYDRO-GIS, utilizza Manning e non Strikler. Per fare ciò seguiremo i seguenti passaggi:

- Creazione di un nuovo file vettoriale vuoto con tipo di geometria poligonale
- Attraverso il pannello di disegno, tracciamento delle aree con scabrezza differente da quella di subalveo (vegetazione, massi ciclopici, scivoli in calcestruzzo, ecc...)
- Assegnazione del coefficiente di Strikler ad ogni poligono disegnato, mediante lo strumento di interrogazione o la tabella degli attributi
- Rasterizzazione del vettore (da vettore a raster), utilizzando come campo dei valori la colonna con i coefficienti di Strikler
- Calcolo del coefficiente di Manning, che è il reciproco del coefficiente di Strikler, utilizzando il calcolatore raster

Questa procedura è riportata più nel dettaglio sia nel manuale utente che nei video-tutorial sul sito [www.hydro-gis.com](http://www.hydro-gis.com) e pertanto si riporta qui di seguito in Figura 10 solamente la mappa raster finale:



**Figura 10:** Mappa raster finale della scabrezza come coefficiente di Manning, in trasparenza con l'ortofoto come sfondo

## 4 Analisi e correzione del Digital Terrain Model

### 4.1 Analisi del DTM

Il Digital Terrain Model, ossia la mappa di elevazione del terreno, è spesso soggetta a errori che possono compromettere il buon esito di una simulazione idraulica. Questi errori riguardano principalmente i ponti, i muri di sponda e l'alveo di magra.

Per quanto riguarda l'alveo di magra, la maggior parte dei DTM viene creata usando dei fasci di luce che non sono in grado di penetrare l'acqua. Per questo motivo viene individuato come fondale quella che in realtà è la quota della superficie libera, in condizione di magra ossia di portata molto bassa. Questo problema riguarda soprattutto i DTM un pò datati (come per esempio quello utilizzato in questo caso di studio, che è del 2014). Infatti, già da qualche anno vengono utilizzati fasci di luce verde in grado di penetrare l'acqua (almeno in molti casi). A questo problema purtroppo non è possibile porre rimedio, a meno di non avere a disposizione delle misure di sezioni trasversali oppure un rilievo lidar in grado di bucare l'acqua, come detto. Per questo motivo verrà accettato questo errore, considerandolo a favore di sicurezza (visto che si sottostima l'area bagnata).

Per quanto riguarda i ponti, spesso accade che l'algoritmo di correzione automatica a cui vengono sottoposti i DTM non riesca ad eliminarli, ricostruendo quindi in maniera non corretta l'alveo sottostante. Invece, per quanto riguarda i muri di sponda, a volte essi sono troppo sottili e non vengono rilevati correttamente in un raster di elevazione con una risoluzione spaziale di 0.5 - 1 metri o superiore. Questo può portare a esondazioni fasulle in corrispondenza di tali anomalie.

In generale, queste problematiche riguardano soprattutto i tratti cittadini dei corsi d'acqua, o comunque tratti fortemente antropizzati, perchè presentano appunto una grande varietà di questi elementi (ponti e muri di sponda).

Per individuare l'eventuale presenza di tali problemi, HYDRO-GIS fornisce diversi strumenti utili per l'analisi morfologica ma lo strumento più utile in assoluto è il grafico tridimensionale (Grafico raster 3D). Utilizzeremo questo strumento per l'analisi del nostro caso di studio, controllando con particolare attenzione i ponti e i muri di sponda. In Figure 11, 12, 13, riportiamo le principali criticità individuate. Si vede come in corrispondenza di due ponti (Ponte dei cavalleggeri e cavalcavia della ferrovia) l'algoritmo di correzione del DTM non sia riuscito efficacemente a ricostruire la geometria dell'alveo. In particolare è presente una specie di prisma rettangolare che occupa una superficie considerevole della sezione idraulica, ostacolando il deflusso. Se tale errore non venisse corretto la simulazione idraulica porterebbe a errori grossolani, ed è per questo motivo che si cercherà di ricostruire la forma corretta della sezione sotto al ponte, utilizzando i dati GIS a nostra disposizione.

Un altro problema che emerge è una sorta di 'buco' nel muro di sponda tra i due ponti, sulla sponda sinistra. Tale errore è probabilmente dovuto al fatto che adiacente c'è un edificio e quindi l'algoritmo automatico di correzione del DTM ha 'tolto' l'edificio e con esso anche il muro di sponda. In ogni caso è un errore di cui tenere conto in qualche modo. Inoltre il muro di sponda sia destro che sinistro presentano un'anomalia, una specie di solco a forma di 'V' che non ha corrispondenza nella realtà. Questo errore potrebbe portare a una falsa esondazione del torrente, in corrispondenza di tali punti e deve essere quindi anch'esso corretto.

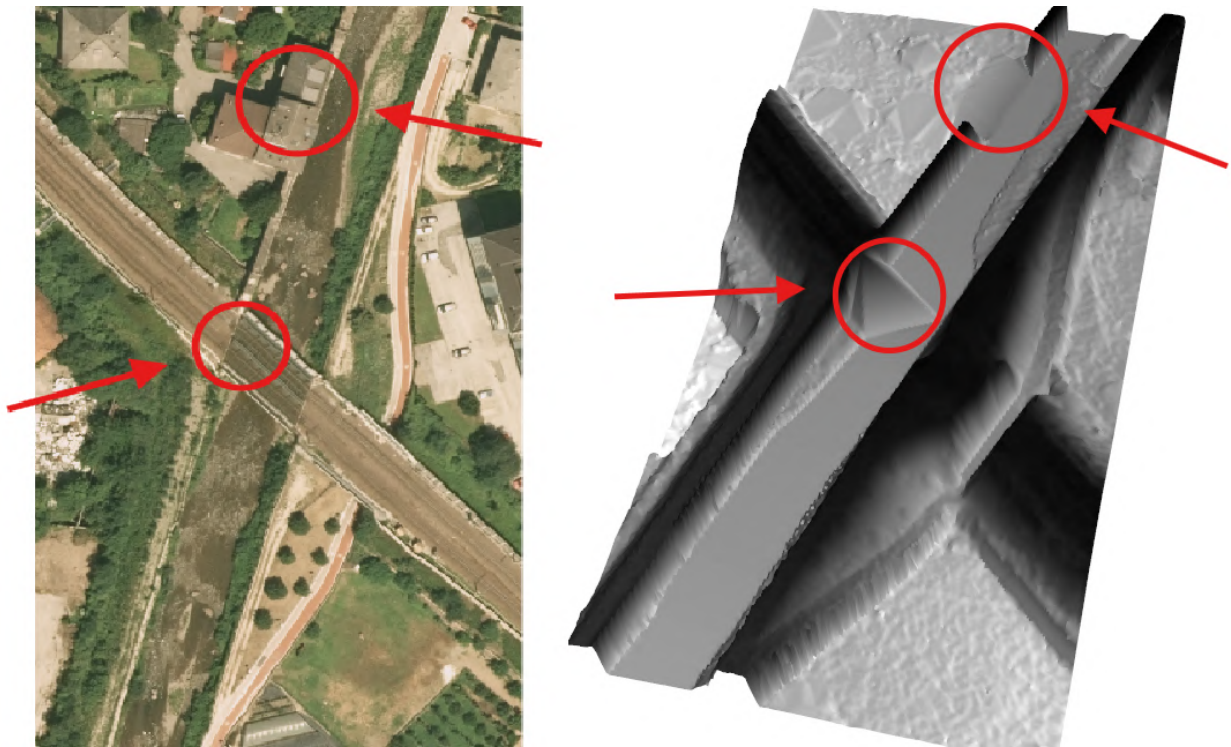
Infine, ci sono un paio di tratti in cui il muro di sponda non viene proprio rilevato dal DTM, nel senso che è assente. Questo può essere dovuto allo spessore molto ridotto del muro (circa 40 cm) che è più sottile della grandezza di una cella (50 cm), oppure al fatto che al momento della

creazione del DTM il muro non era ancora stato costruito. Il primo dei due tratti è in corrispondenza di un ponte mentre l'altro è sulla sponda sinistra, guardando verso la sorgente, nel tratto finale di Fersina analizzato (vedere Figura 14).

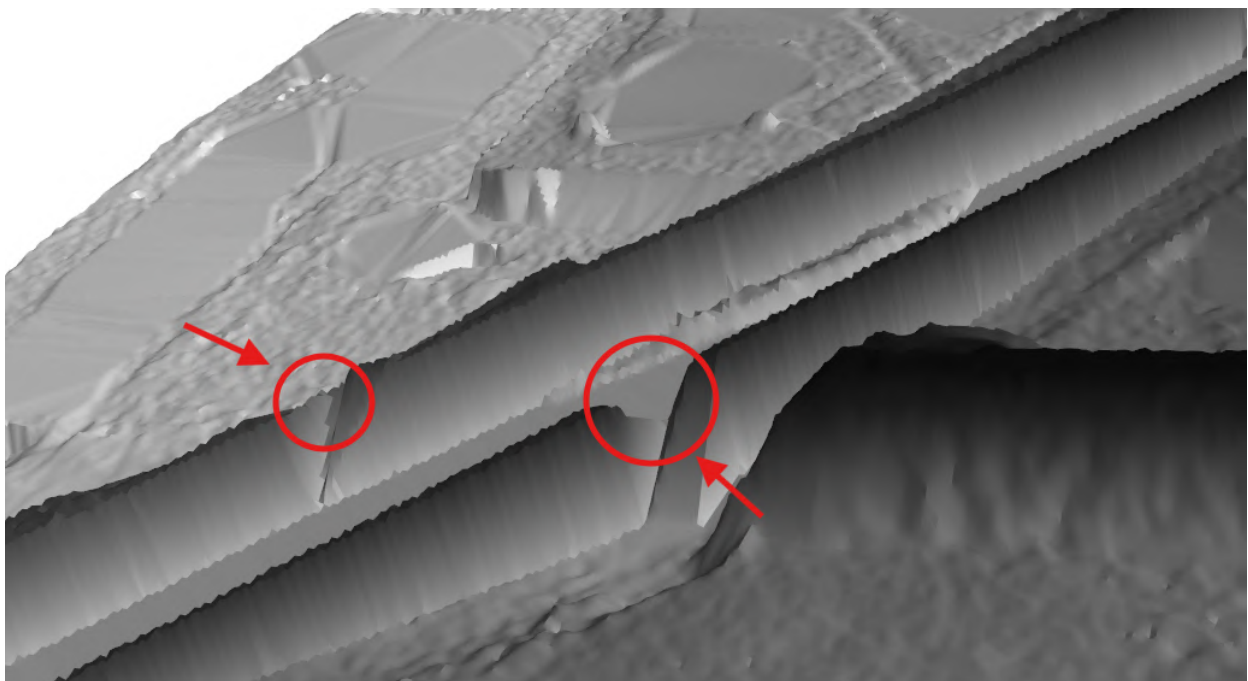
Di tutti questi errori verranno corretti solo i prismi volumetrici sotto ai due ponti. Gli altri errori, infatti, verranno corretti in seguito utilizzando i *riverwalls* e quindi non agendo direttamente sul DTM.



**Figura 11:** Ponte dei cavalleggeri. A sinistra il grafico 3D delle quote consente di individuare l' errore; a destra l'ortofoto



**Figura 12:** Ponte del cavalcavia. A sinistra il grafico 3D delle quote consente di individuare l' errore; a destra l'ortofoto



**Figura 13:** Grafico 3D di un tratto di alveo. Si possono individuare due solchi a 'V' che non hanno riscontro nella realtà

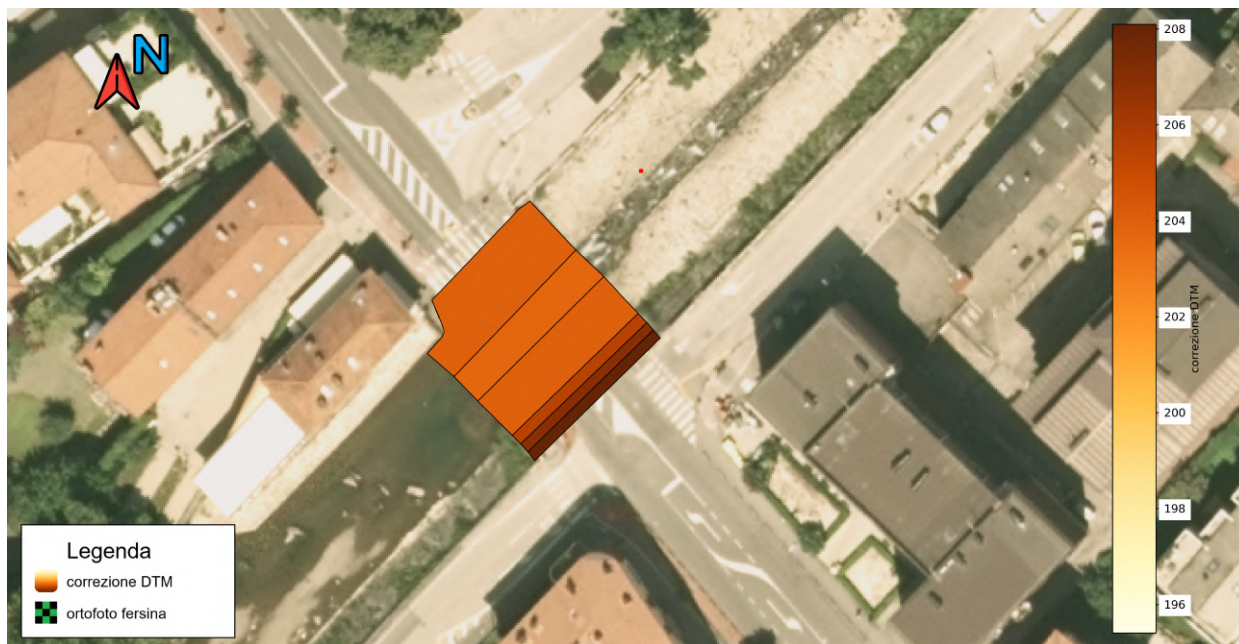


**Figura 14:** Muro di sponda molto sottile, in corrispondenza della fine del tratto, sponda sinistra. Non viene proprio rilevato dal DTM

## 4.2 Correzione del DTM

Il software HYDRO-GIS mette a disposizione più di uno strumento per correggere il Digital Terrain Model. Per esempio si potrebbe usare lo strumento di interrogazione (*Interroga*) e correggere le celle del raster una ad una, anche se risulterebbe molto laborioso. Per questo motivo si creerà una mappa vettoriale e si andranno a tracciare delle geometrie assegnando a ciascuna il valore 'corretto' della quota. Dopodichè si utilizzerà lo strumento *Correggi DTM*, nella sezione idraulica, per sostituire i valori delle quote nel raster con le quote assegnate al vettore.

In Figura 15 si possono vedere le geometrie tracciate in corrispondenza del ponte dei cavalleggeri. In Figura 16 si possono vedere le geometrie tracciate in corrispondenza del ponte del cavalcavia. A ciascuna di esse viene assegnato un valore di quota in base alla quota a monte della strisciolina e a valle della strisciolina. In Figura 17 si può vedere la tabella degli attributi del vettore, con le quote assegnate alle geometrie. In Figura 18 si può vedere la finestra del software HYDRO-GIS utilizzata per modificare il DTM, una volta creato il vettore. Infine, in Figura 19 si può vedere il risultato finale, per quanto riguarda il ponte dei Cavalleggeri e in Figura 20 per il ponte del Cavalcavia.



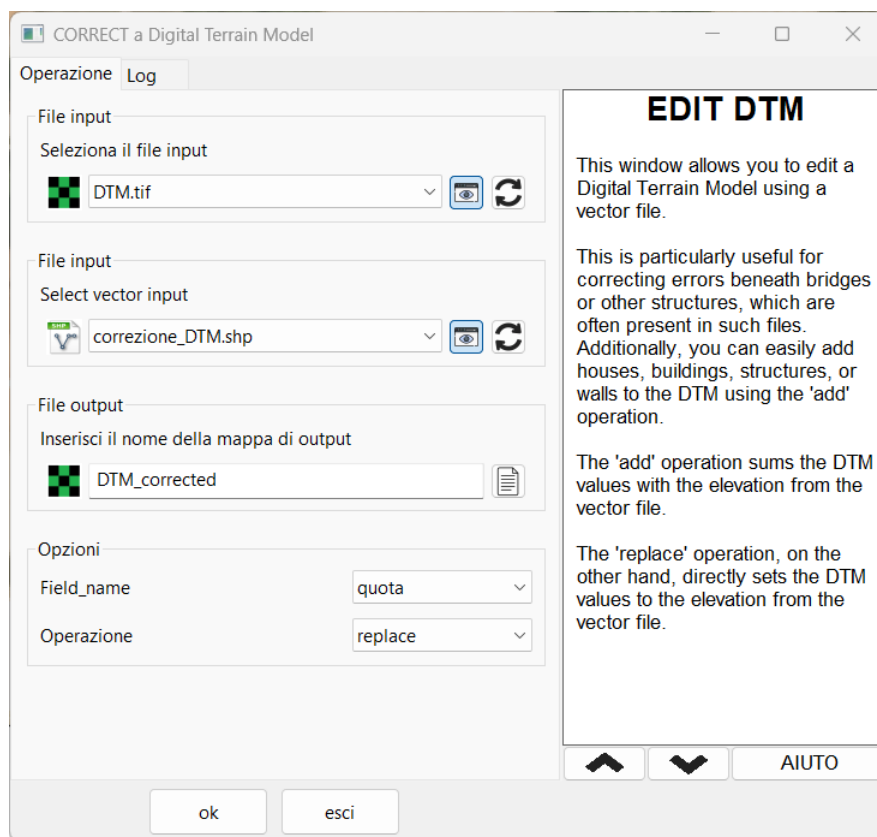
**Figura 15:** Shapefile utilizzato per la correzione delle quote del Digital Terrain Model, Ponte dei Cavalleggeri



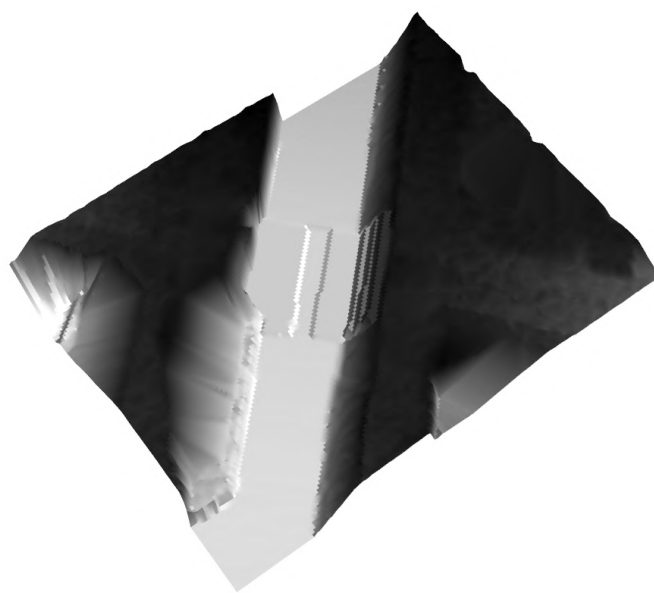
**Figura 16:** Shapefile utilizzato per la correzione delle quote del Digital Terrain Model, Ponte del Cavalcavia

TAB. ATTRIBUTI				
	id	name	quota	geometry
1	1	None	195.4500	POLYGON ((664012.33
2	2	None	195.7000	POLYGON ((664012.33
3	3	None	195.6000	POLYGON ((664021.68
4	7	None	203.7000	POLYGON ((664521.63
5	8	None	203.9500	POLYGON ((664524.23
6	6	None	203.9500	POLYGON ((664521.63
7	9	None	205.5000	POLYGON ((664528.00
8	10	None	207.0000	POLYGON ((664528.93
9	11	None	208.1000	POLYGON ((664529.70
10	12	None	197.0000	POLYGON ((664022.73
11	13	None	198.5000	POLYGON ((664023.99

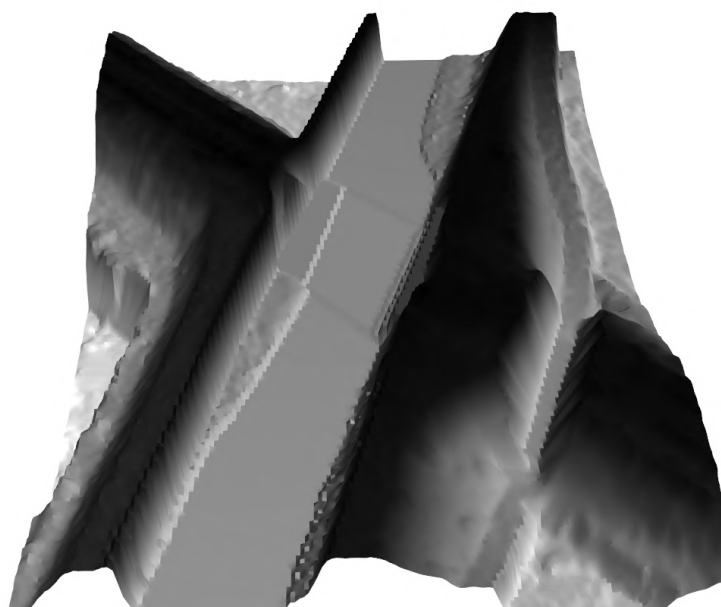
**Figura 17:** Tabella degli attributi del file vettoriale utilizzato per la correzione delle quote; è possibile vedere i valori delle quote assegnate a ciascuna geometria



**Figura 18:** Finestra del software HYDRO-GIS utilizzata per modificare le quote del DTM, una volta creato il vettore necessario



**Figura 19:** Grafico 3D del DTM una volta corretto; la sezione di deflusso del Ponte dei Cavalleggeri è stata ripristinata in maniera soddisfacente



**Figura 20:** Grafico 3D del DTM una volta corretto; la sezione di deflusso del Ponte del cavalcavia è stata ripristinata in maniera soddisfacente

## 5 Individuazione del dominio di Calcolo

Il dominio di calcolo, in Anuga, è essenzialmente un poligono che racchiude il tratto di torrente/fiume che si vuole simulare, comprendendo in generale tutti i punti in cui si ha interesse a modellare il flusso dell'acqua. Dentro il dominio viene generata la maglia di mesh attraverso un algoritmo di generazione di mesh triangolari, della libreria Anuga.

Nel nostro caso racchiuderemo all'interno del dominio l'alveo del torrente più un certo margine sia sulla sponda sinistra che destra, fino a comprendere le prime file di edifici.

Con il software HYDRO-GIS, il dominio di calcolo si definisce disegnando diverse polilinee che, nel complesso, costituiscono il bordo di un poligono chiuso. Ad ogni polilinea (*LineString*) può essere associata una condizione al contorno indipendente.

Bisogna creare per prima cosa un nuovo vettore di tipo 'linea' con un campo 'bc' (che sta per 'boundary conditions' in inglese). Dalla sezione idraulica del software, con la funzionalità 'nuovo vettore' è possibile crearlo in un paio di click, selezionando l'opzione 'bordo del dominio'. A questo punto si deve procedere a tracciare i vari segmenti. Nel nostro caso tratteremo solamente due polilinee. Alla prima, che rappresenta il 99% dell'estensione del bordo, si assegnerà la condizione al contorno di Dirichlet, con valori di tirante e velocità al bordo pari a 0. Al secondo segmento, in corrispondenza dell'uscita del torrente dal dominio, si assegnerà invece la condizione al contorno trasmissiva. In Figura 21 si può vedere il dominio di calcolo stabilito e in Figura 22 si riporta la tabella degli attributi del vettore.



Figura 21: Dominio di calcolo, delineato tramite un semplice file vettoriale con geometrie di tipo 'linea'

TAB. ATTRIBUTI				
	bc	parameters	id	geometry
1	transmissive	None		2 LINESTRING (663908.8
2	dirichlet	0,0,0		1 LINESTRING (663908.8

Figura 22: Tabella degli attributi del file vettoriale 'bordo del dominio'

## 6 Creazione della mesh

La dimensione della mesh nei vari punti dello spazio viene regolata, in Anuga, dagli *interiors*. Gli interiors sono dei poligoni con associato un valore di risoluzione spaziale, inteso come area della singola cella triangolare [ $m^2$ ]. Più precisamente tale valore rappresenta il valore massimo della risoluzione che il generatore di mesh di Anuga potrà utilizzare all'interno dell'area. Quindi non bisogna pensare che, per esempio, *risoluzione* = 10 significa che le celle in quel poligono avranno un'area di 10  $m^2$  perchè in realtà l'area media delle celle sarà sensibilmente più piccola.

Una cosa importante, è sapere che in Anuga i poligoni degli interiors **non devono sovrapporsi parzialmente**. In altre parole, ogni interior deve essere o completamente contenuto o completamente al di fuori da eventuali altri interiors utilizzati per la simulazione. Se non si rispetta questa semplice regola, la generazione della mesh sarà probabilmente sbagliata nei punti sovrapposti e potrebbero esserci vari altri problemi durante la simulazione. Un'ulteriore accortezza che è meglio avere è quella di rispettare sempre un certo margine tra i vari operatori di anuga, compresi gli interiors, altrimenti il generatore automatico di mesh potrebbe generare triangoli microscopici tra due elementi molto vicini ma non a contatto, ed è ovvio che celle microscopiche possono rallentare di molto la simulazione. Quindi o si rispetta un minimo di margine tra gli elementi oppure si fanno perfettamente a contatto utilizzando la funzionalità di SNAP offerta da HYDRO-GIS; l'importante è non fare due elementi troppo vicini ma non a contatto perchè si avranno celle microscopiche.

Con il software HYDRO-GIS, gli interiors si modellano attraverso un file vettoriale di poligoni. Il file deve avere un campo *resolution* dove poter indicare il valore di risoluzione per ogni singolo poligono. È possibile creare questo vettore con due semplici click dalla sezione idraulica del software (nuovo vettore idraulico, interior). Alternativamente, è possibile creare un vettore di tipo poligono dalla sezione vettori e poi aggiungere il campo 'resolution' manualmente.

Per questo studio, abbiamo scelto di utilizzare solo due interiors. Il primo, quello più interno, racchiude tutto l'alveo del torrente, le sponde e un certo margine laterale ulteriore. Il secondo, quello più esterno e a più bassa risoluzione, racchiude anche le prime file degli edifici. In Figure 23 e 24 e 25 viene riportato il file degli interiors utilizzato. In Figura 26 viene riportata la tabella degli attributi del vettore.



Figura 23: File degli interiors, visuale sull'intero tratto del Fersina



Figura 24: File degli interiors, si veda come è stata evitata la sovrapposizione parziale dei poligoni!



**Figura 25:** File degli interiors, si vedono i due poligoni annidati e cosa comprendono

TAB. ATTRIBUTI		
	resolution	geometry
1	15.0000	POLYGON ((665265.35
2	40.0000	POLYGON ((665237.58

**Figura 26:** Tabella attributi del file degli interiors, si vede la risoluzione assegnata a ciascun poligono

## 7 Portata in ingresso

L'ingresso di portata nel dominio di calcolo, in generale, può essere modellato come condizione al contorno, utilizzando il file del bordo del dominio. Sarebbe infatti possibile modellare un flusso di moto uniforme che entra in un determinato segmento del dominio con la condizione al contorno *uniform\_flow*.

La condizione di moto uniforme in realtà non esiste in Anuga; è stata creata da HYDRO-GIS mettendo assieme due strumenti di questa libreria python:

- condizione al contorno riflessiva, per evitare fuoriuscita di portata dal segmento del bordo
- operatore di Inlet adiacente al segmento del bordo con assegnate tre variabili temporali ( $Q(t), u(t), v(t)$ ) dove le velocità vengono stimate in base alla pendenza ortogonale al segmento di inflow

Il modo classico di simulare un fenomeno di Inflow con Anuga è utilizzare un operatore di Inlet, che introduce una certa portata attraverso un poligono o una linea. Nel caso del torrente Fersina, l'acqua entra nel dominio grazie a una cascata verticale, con velocità orizzontali pressochè nulle e un moto tutt'altro che uniforme. Utilizzare una condizione al contorno di *uniform\_flow* sarebbe quindi un grave errore, mentre utilizzare un operatore di Inlet per modellare il fenomeno fornisce un'ottima descrizione della realtà.

In Figura 27 si può vedere il vettore degli inlets, utilizzato per modellare la cascata di Ponte Cornicchio.



**Figura 27:** File vettoriale degli inlets. È tracciato un poligono per modellare la cascata. In Figura è riportata anche la tabella degli attributi del vettore

Una volta creato il file degli inlets con un poligono in corrispondenza della zona di impatto della cascata, è necessario associare a quel poligono l'idrogramma in ingresso. Per fare ciò si deve utilizzare il file delle variabili, ossia un file in formato .txt o .csv che contiene l'andamento temporale di tutte le variabili durante la simulazione (vedere manuale utente sul sito [www.hydro-gis.com](http://www.hydro-gis.com)). Nel nostro caso di studio abbiamo una sola variabile temporale, appunto l'idrogramma liquido in

ingresso. Per questo motivo il file avrà solo due colonne: la colonna del tempo e la colonna della portata.

Per conoscere i valori dell'idrogramma è necessario effettuare uno studio idrologico, utilizzando in questo caso come sezione di chiusura il tratto immediatamente a monte del Ponte Cornicchio. Nel nostro caso useremo, almeno in prima battuta, un semplice idrogramma triangolare con la portata storica massima registrata nel torrente Fersina, ossia  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ . In Figura 30 è possibile vedere il file delle variabili con l'idrogramma triangolare scelto (come unica variabile temporale).

Si osservi che il valore di portata assunto di  $Q = 180 \text{ m}^3/\text{s}$  è ampiamente a favore di sicurezza. Per esempio nella tempesta *Vaya* che ha colpito duramente il territorio del Trentino alla fine dell'anno 2018 la portata massima registrata dall'idrometro del Fersina, a Trento, ha raggiunto appena il valore di  $Q = 113 \text{ m}^3/\text{s}$ , come è possibile vedere nell'idrogramma storico di Figura 28. Si fa inoltre notare che tale valore corrisponde al massimo storico registrato durante l'intero arco di vita del sensore, ossia gli ultimi 26 anni (Figura 29), con un solo altro valore che sfiora la soglia dei  $90 \text{ m}^3/\text{s}$ .

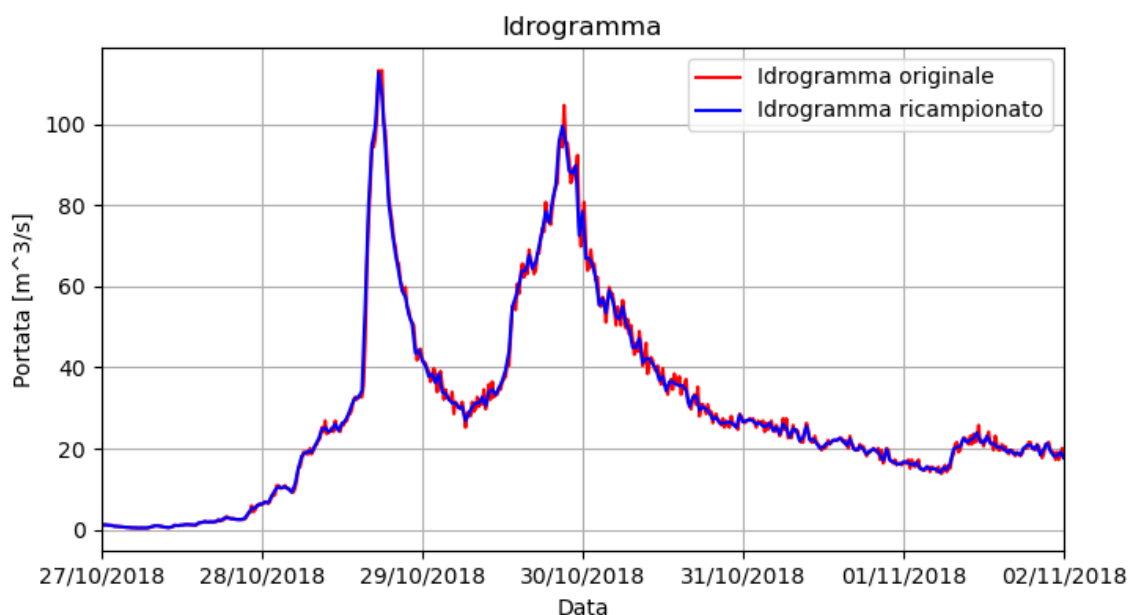


Figura 28: Idrogramma registrato dall'idrometro posto sul Fersina, a Trento

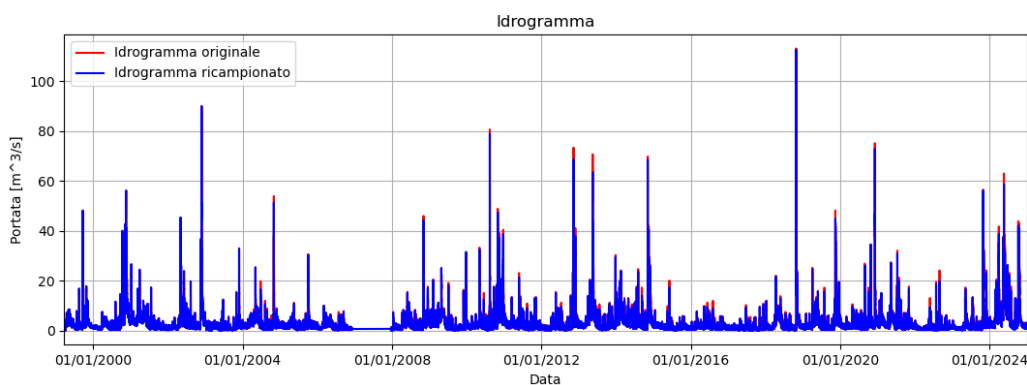
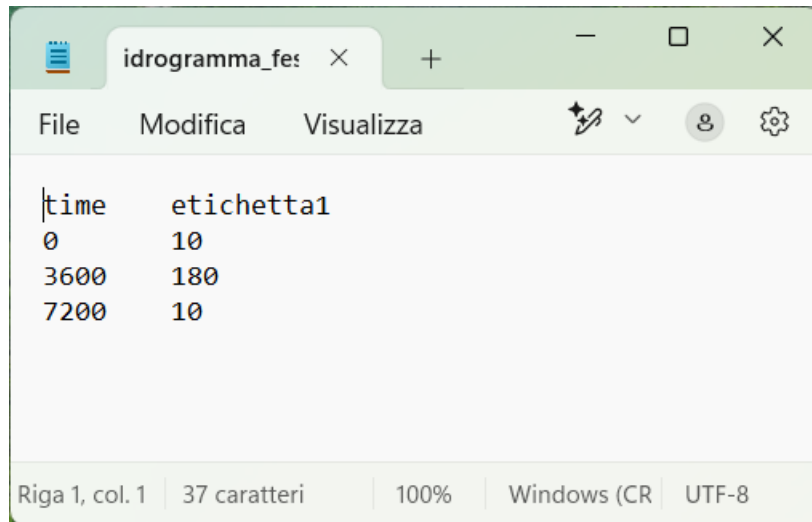


Figura 29: Portata registrata dal 1999 al 2025 dal sensore di livello posto nel Fersina a Trento



**Figura 30:** File delle variabili temporali. Si può vedere l'idrogramma triangolare in ingresso all'operatore di inlet

Si noti come *etichetta1* sia appunto un'etichetta che permette di associare all'operatore di inlet la relativa variabile temporale, ossia la portata. Essa, infatti, è sia il titolo della portata nel file delle variabili (Figura 30) e sia il nome associato al poligono, nel campo *hydrograph* della tabella attributi del file degli inlets (Figura 27, in alto a destra).

## 8 Muri di sponda

### 8.1 Introduzione al problema

Il tratto di torrente Fersina scelto per questo studio è un tratto fortemente antropizzato e quindi molto complesso da simulare. Oltre agli errori presenti nel Digital Terrain Model, che abbiamo già corretto, è presente un'ulteriore problematica a cui dover far fronte, ossia i muri verticali sottili.

Con muri sottili si intendono muri spessi meno di uno o due metri e che sia a sinistra che a destra hanno quote sensibilmente più basse (vedere Figura 31 e Figura 32). In questo caso, infatti, è probabile che i muri non vengano interpretati correttamente nella simulazione per i seguenti motivi:

- **Errore già nei DTM:** I muri sono molto sottili e neppure il Digital Terrain Model li ha interpretati correttamente, oppure sono stati rimossi dall'algoritmo automatico di correzione a cui i DTM vengono sottoposti
- **Errore in Anuga:** Se la dimensione della cella triangolare è troppo grande, Anuga non riuscirà a interpretare correttamente la reale altezza del muro. Il problema è che la dimensione della cella dovrebbe essere veramente piccola (almeno 4-5 celle lungo la perpendicolare per riuscire a descrivere bene il muro).

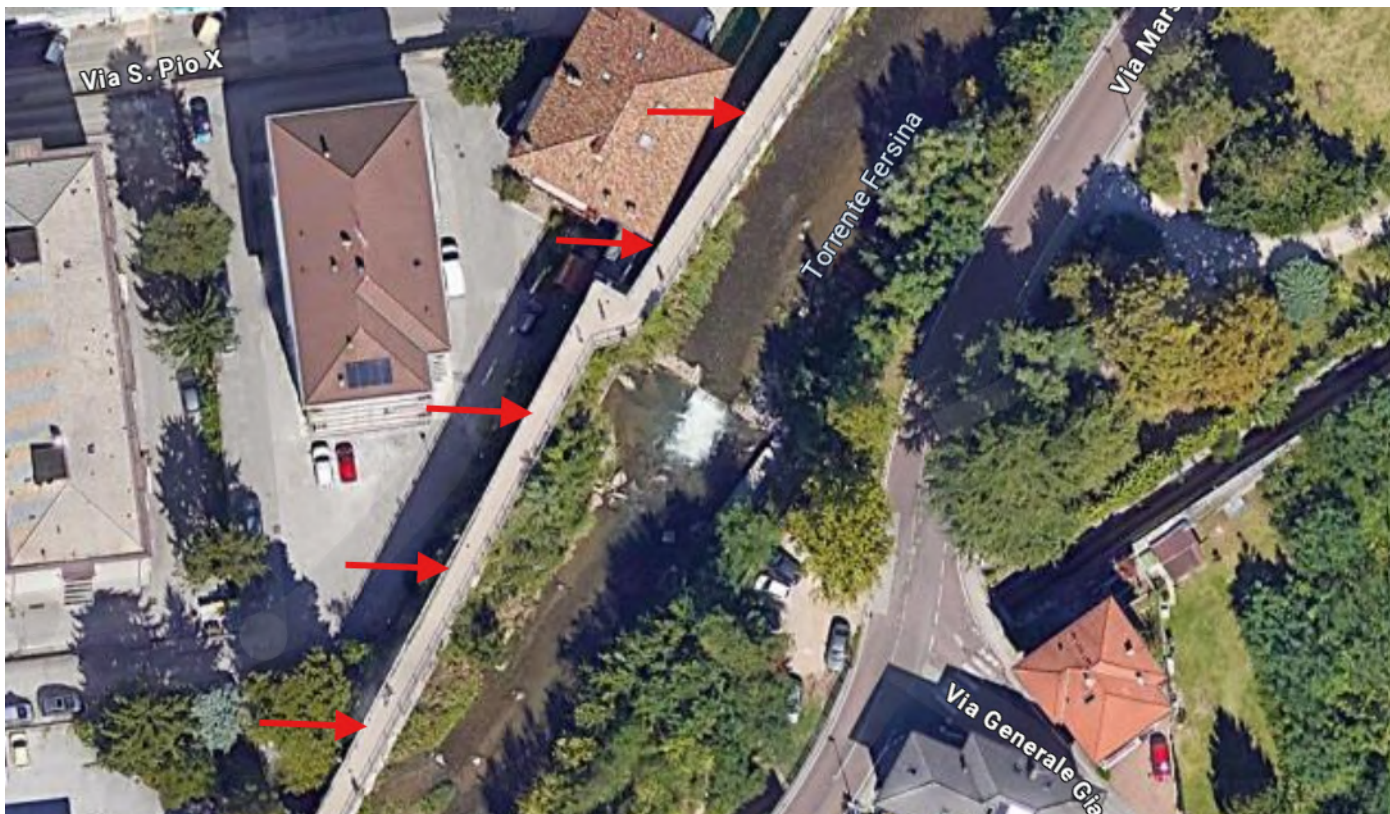


Figura 31: Muro sottile: a sinistra e destra ha quote sensibilmente più basse



**Figura 32:** Muro sottile: a sinistra e destra ha quote sensibilmente più basse

Per far fronte a questi problemi ci sono venute in mente tre possibili soluzioni:

- Assicurarsi che il DTM legga correttamente tutti i muri e poi infittire molto la mesh triangolare di Anuga in corrispondenza degli stessi. Questa opzione comporterebbe tempi di simulazione molto rallentati in un dominio di calcolo già esteso e con necessità di celle piccole. Oltre a ciò comunque si rischierebbe di sottostimare in alcuni punti l'altezza del muro. Per questi motivi, questa opzione è stata rapidamente scartata.
- Modificare il DTM, allargando tutti i muri in modo che abbiano almeno un paio di metri di larghezza. Questa potrebbe essere una soluzione ma comunque modificare il DTM manualmente non sembra un'opzione entusiasmante perchè si altera la realtà, anche se magari in maniera poco influente ai fini della simulazione idraulica. In ogni caso questa opzione è stata scartata in vista dell'opzione successiva.
- Utilizzare l'operatore *riverwall* di Anuga. Questo, è l'operatore più semplice e versatile di Anuga e consente di modellare con facilità muri verticali, tra cui i muri arginali (che è ciò che serve a noi). Con i riverwalls, inoltre, si possono modellare edifici, strutture, ponti che a un certo istante della simulazione vanno in occlusione, fenomeni di sfioro sommitale ecc... Un grandissimo pregio degli operatori riverwalls è quello di adattare automaticamente la mesh triangolare, consentendo una perfetta modellazione senza dover infittire le celle (e rallentare quindi la simulazione). Per tutti questi motivi, è stata scelta questa ultima opzione, ossia di utilizzare i riverwalls per modellare i muri arginali sottili.

## 8.2 Riverwalls in HYDRO-GIS

Con il software HYDRO-GIS, i riverwalls si modellano creando (come al solito) un file vettoriale. Attraverso la sezione idraulica è possibile creare il file riverwalls con un paio di click. Il file vettoriale riverwalls è un file di tipo *LineString* che può avere fino a tre campi:

- **z\_top** che rappresenta la quota sommitale del muro, intesa come altezza sul livello del mare. Questo è l'unico campo obbligatorio ed è sufficiente nella maggior parte dei casi.
- **action** è un campo opzionale. Può essere di due tipi: 'build' oppure 'crash'. Il primo significa che il muro viene costruito, ossia sorge, a un certo punto della simulazione. Mentre il secondo significa che il muro crolla, ossia scompare, a un certo istante temporale della simulazione. L'opzione 'build' può essere per esempio usata per simulare ponti che vanno in occlusione, mentre 'crash' per simulare il crollo di un muro di sponda.
- **time** è anch'esso un campo opzionale ed è semplicemente l'istante temporale in cui si verifica la *action*. *Action* e *time* sono campi associati: o vengono specificati entrambi o nessuno dei due.

Tornando al nostro caso di studio, si ha interesse a simulare dei semplici muri verticali statici e quindi utilizzeremo solamente il campo *z\_top*.

Per tracciare le *LineString* dei muri si utilizza il pannello di disegno del software HYDRO-GIS. Innanzitutto occorre considerare che non si possono disegnare geometrie lineari troppo lunghe, perchè ogni polilinea può avere un solo valore di quota associato. Quindi bisogna disegnare tratti separati, ciascuno con estensione limitata (es: 5-15 metri) e poi assegnare a ciascuno il valore della quota. Ciò è chiaramente possibile e, anche se sembra un'operazione un pò macchinosa, è il metodo concettualmente più semplice di operare. Tuttavia qui di seguito si spiegherà un metodo più complesso ma più veloce in termini di tempo impiegato e che permette di realizzare segmenti anche molto piccoli (es: 3-5 metri) per una modellazione più precisa della realtà.

## 8.3 Creazione file riverwalls con HYDRO-GIS

Come detto, la procedura proposta non è la più semplice ma quella che consente una modellazione più precisa dei muri di sponda in tempi rapidi, una volta che si conoscono le funzionalità GIS da utilizzare. Se qualcuno non è pratico di GIS, può sempre disegnare i tratti uno ad uno e assegnare a ciascuno la quota con lo strumento di interrogazione.

La procedura proposta per creare i riverwalls sfrutta le seguenti funzionalità GIS del software HYDRO-GIS:

- La funzionalità **Pannello di disegno**, per disegnare rapidamente i riverwalls con polilinee lunghe a piacere
- La funzionalità **Crea segmenti** per infittire i punti delle polilinee, per esempio con un punto ogni 5 metri
- La funzionalità **Esplodi linee** per esplodere le polilinee in segmenti con due punti ciascuno
- La funzionalità **Statistiche raster**, nella sezione vettori, per assegnare un valore provvisorio della quota a ciascun segmento, in base ai valori del DTM
- La funzionalità **Interroga**, nella sezione home per correggere manualmente eventuali valori di quota errati dei segmenti. A tal fine si può anche colorare il vettore, utilizzare la tabella degli attributi, ecc...

### 8.3.1 Tracciamento rapido delle polilinee

Per prima cosa si crea un nuovo vettore di tipo *linea*, dopodichè si comincia a disegnare nel nuovo vettore con il pannello di disegno. Si individuano tutte le aree problematiche, dove il muro di sponda è sottile oppure se ci sono errori nel DTM (Si veda sezione 4).

In Figura 33 è possibile vedere le polilinee tracciate nel caso del tratto cittadino del torrente Fersina. Esse vengono tracciate sopra ai muri di sponda, in modo da descrivere correttamente il muro, e centralmente in modo che favorisce poi la corretta assegnazione della quota dal DTM. In Figura 34 viene mostrato il disegno dei riverwalls lungo l'asse centrale dei muri.

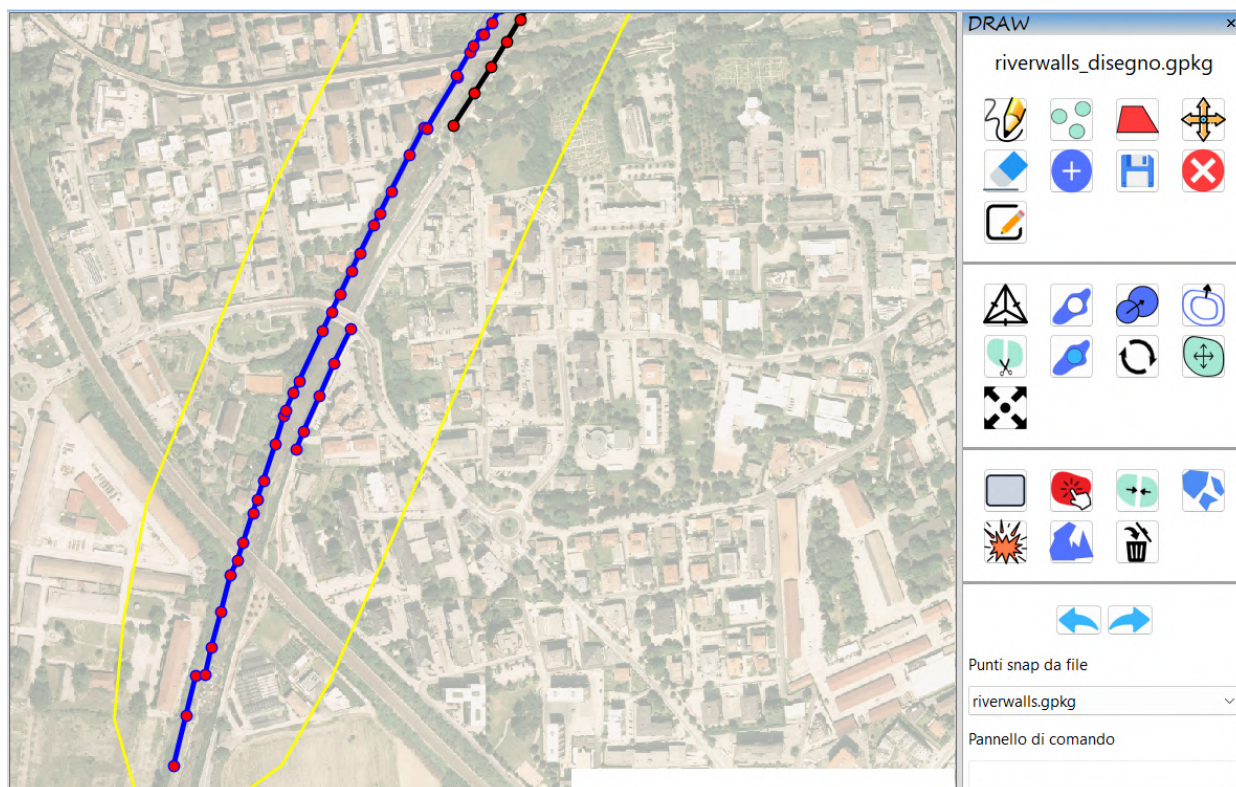


Figura 33: Polilinee tracciate sopra i muri di sponda



Figura 34: Polilinee lungo l'asse centrale del muro per favorire l'assegnazione della quota da DTM

### 8.3.2 Segmentazione

Il passo successivo è aumentare la densità dei punti. Per fare questo si utilizzerà la funzione *Crea segmenti* in modo da avere almeno un punto ogni 5 metri. In Figura 35 si può vedere la finestra utilizzata del software HYDRO-GIS, e in Figura 36 il risultato ottenuto.

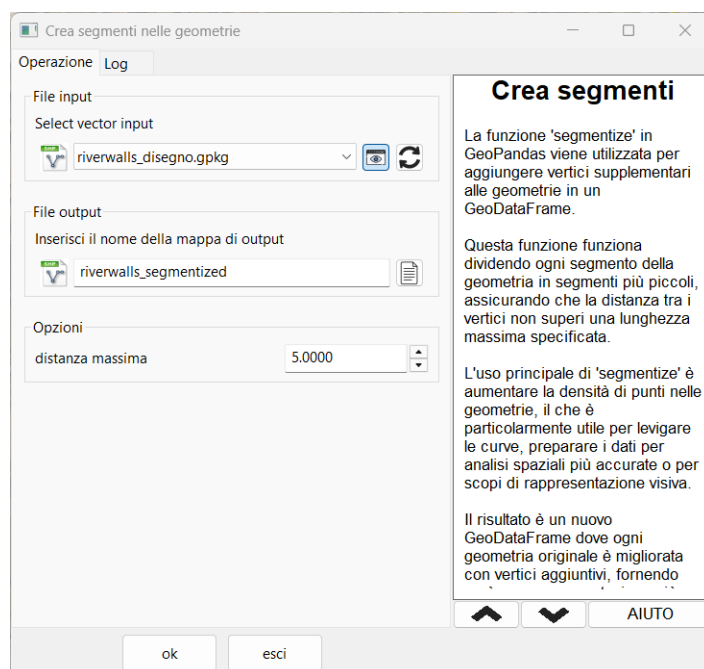


Figura 35: Finestra *Crea segmenti* del software HYDRO-GIS

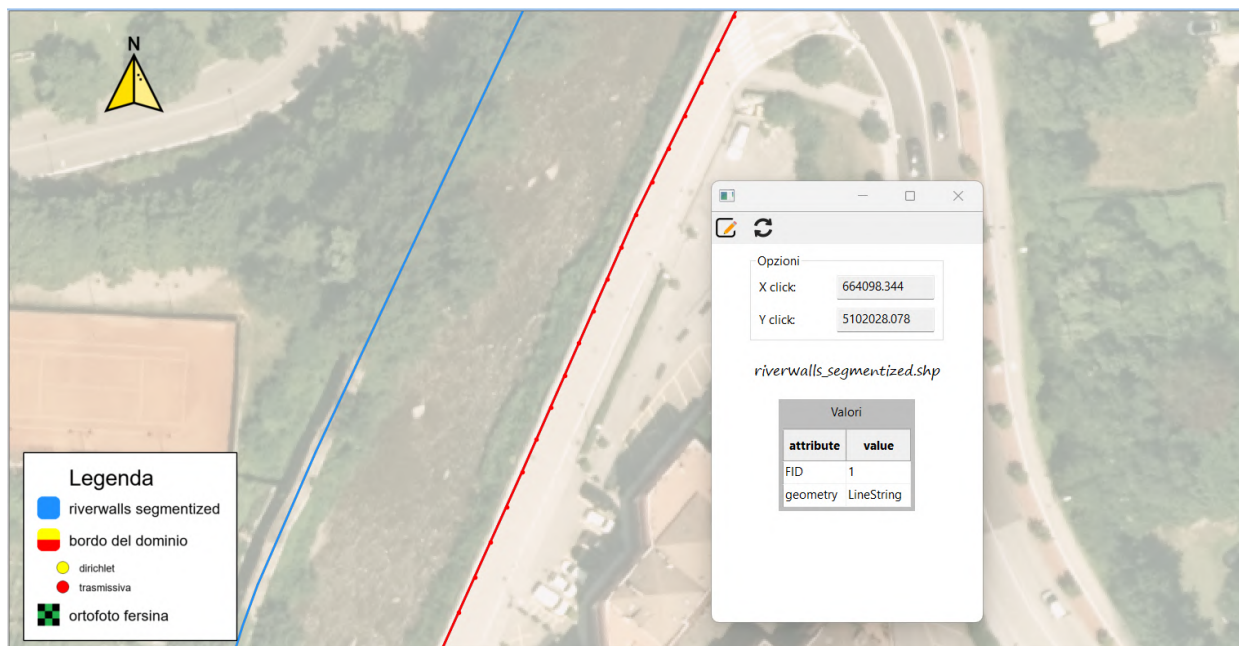


Figura 36: Risultato della segmentazione, ora c'è almeno un punto ogni 5 metri

### 8.3.3 Esplosione delle polilinee

A questo punto le polilinee verranno 'esplose' in segmenti distinti con due punti ciascuno. In Figura 37 si può vedere la funzionalità utilizzata mentre in Figura 38 il risultato ottenuto.

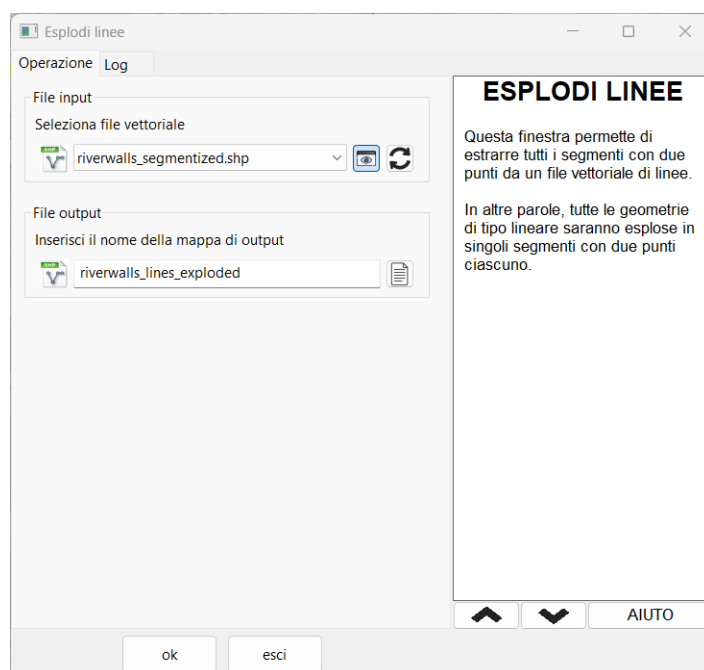


Figura 37: Finestra *Esplosi linee* del software HYDRO-GIS

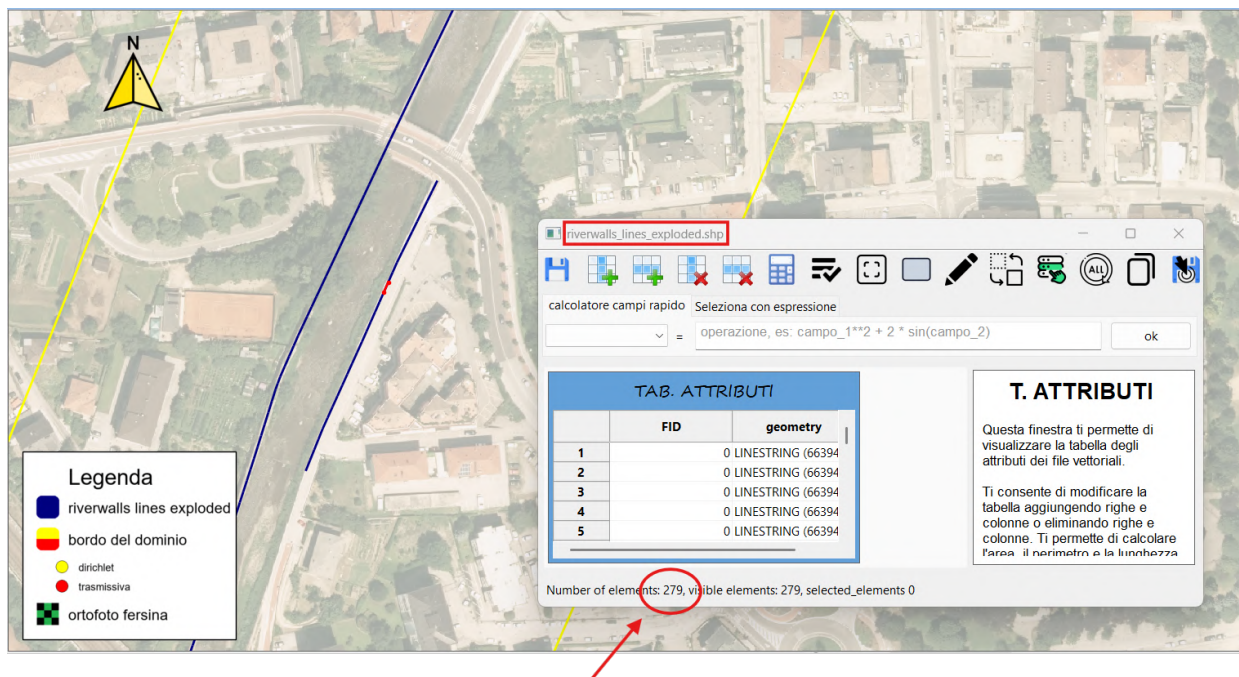


Figura 38: Risultato dell'esplosione delle linee, vengono creati 279 segmenti distinti

### 8.3.4 Assegnazione delle quote

Per assegnare la quota ad ogni segmento si utilizza lo strumento *Statistiche raster* (in geometrie vettoriali.) Si deve specificare il vettore (riverwalls\_lines\_exploded.shp), il raster (Digital Terrain Model) e il tipo di statistiche da estrarre. Nel nostro caso estrarremo il minimo, il valore medio e il massimo della quota del DTM in ogni segmento. Dopodichè utilizzeremo come valore scelto il massimo, rinominando il campo *max* in *z\_top*. In Figura 39 si può vedere la finestra per l'estrazione di statistiche, in Figura 40 la tabella degli attributi, con il campo *z\_top* e in Figura 41 il vettore dei riverwalls colorato con una colormap associata alla colonna *z\_top*.

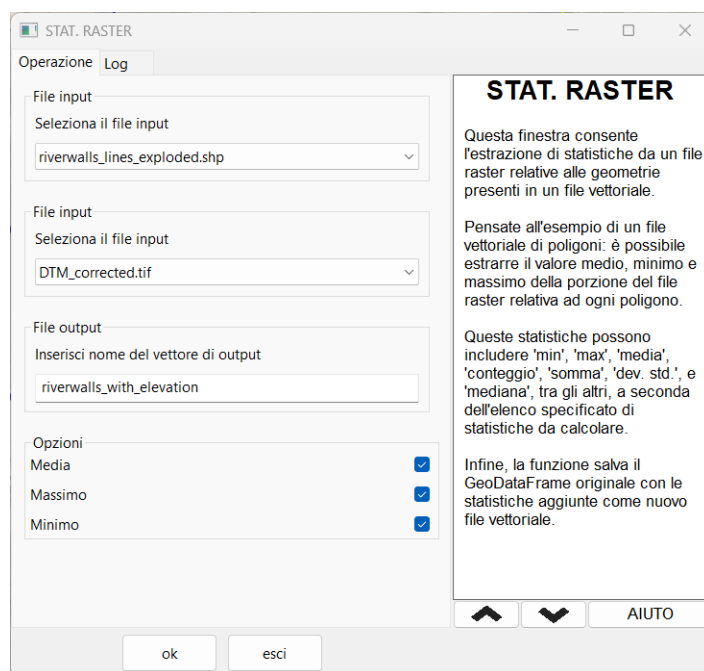
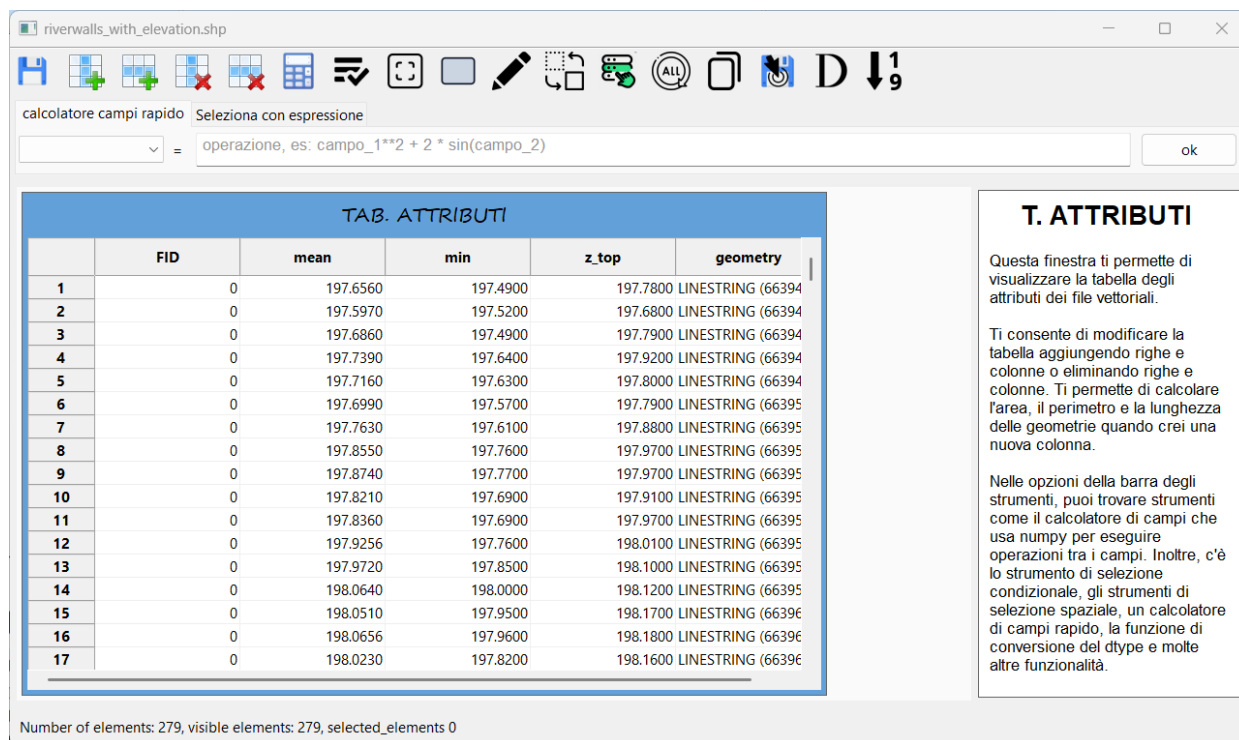


Figura 39: Finestra *Statistiche raster* (in geometrie vettoriali) del software HYDRO-GIS



**Figura 40:** Tabella degli attributi del vettore ottenuto. Il campo 'max' è stato rinominato in 'z\_top' per Anuga



**Figura 41:** Risultato dell'assegnazione delle quote

In Figura 41 si può vedere che, colorando con una colormap il vettore in base a  $z\_top$ , saltano subito all'occhio gli errori grossolani delle quote (perchè di colore diverso dai segmenti contigui). Dopodichè, è opportuno controllare presso i ponti, presso alle criticità individuate in precedenza nel DTM (che non erano state corrette) e in ulteriori punti a campione, utilizzando lo strumento di interrogazione. Una volta fatto ciò, il file dei riverwalls sarà stato completato con successo. In totale sono stati corretti circa una quarantina di segmenti: alcuni presentavano errori di lieve entità mentre per altri la quota era completamente sbagliata.

In Figura 42 è riportato un esempio di errore grossolano che salta subito all'occhio, in corrispondenza di un ponte. In Figura 43 è riportato il vettore dei riverwalls finale, colorato con una colormap molto particolare (*gist\_ncar\_r*), che consente di visualizzare in maniera nitida anche variazioni di quota molto piccole.



Figura 42: Esempio di errore grossolano che salta subito all'occhio

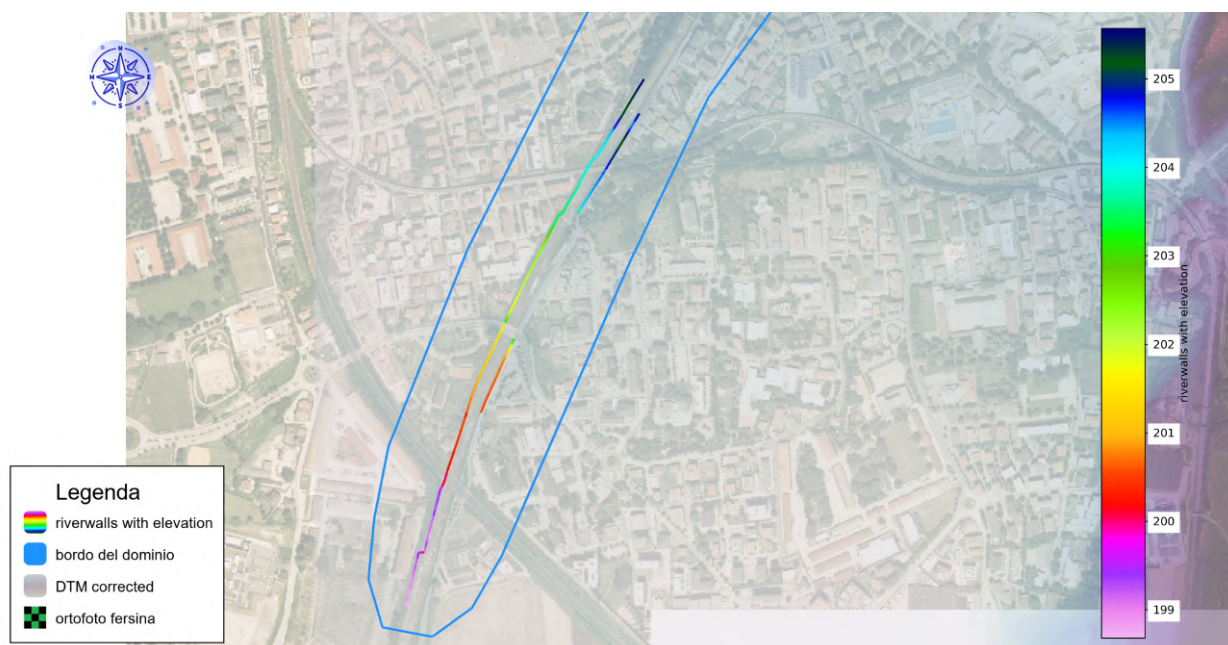


Figura 43: Vettore dei Riverwalls finale, colorato con la colormap *gist\_ncar\_r*

## 9 Edificio in alveo

In corrispondenza del ponte dei Cavalleggeri è presente un edificio parzialmente in alveo. Tale struttura è sopraelevata sopra un basamento e si trova quindi allo stesso livello del parco e della strada, non costituendo un pericolo diretto per le persone al suo interno. Tuttavia la piattaforma alla base e anche la parte inferiore dell'edificio creano un ingombro in alveo.

Come è noto, ai Digital Terrain Model viene sempre applicato un algoritmo in post-processing per rimuovere elementi come edifici e vegetazione. Per questo motivo l'edificio soprastante non compare nel DTM, mentre la piattaforma alla base sì.

L'obiettivo è quello di descrivere correttamente questo edificio, e si può fare essenzialmente in tre modi:

- Correggendo il Digital Terrain Model, come visto in precedenza (sezione 4), in modo da ri-aggiungere l'edificio tolto dall'algoritmo di post processing. Questa opzione è in effetti perfettamente percorribile.
- Utilizzando nuovamente i riverwalls, come visto in sezione 8.2. Sarebbe possibile tracciare per esempio un riverwall sul perimetro esterno dell'edificio e poi assegnare il valore di quota alla polilinea. Anche questa opzione è assolutamente valida.
- Utilizzando un nuovo tipo di operatore offerto da Anuga, gli 'holes'. In questa esercitazione utilizzeremo quest'ultima opzione più che altro per mostrare il funzionamento di questo tipo di operatori al lettore.

### 9.1 Operatori *Holes*

Gli operatori holes in Anuga servono per modellare buchi all'interno del dominio di simulazione. A questi buchi (buchi nel senso di assenza di celle) deve essere associata una condizione al contorno, che può essere riflessiva per modellare strutture, edifici o barriere, oppure trasmissiva o di dirichlet per modellare fenomeni carsici, pozzi, ecc...

Nel nostro caso di studio, utilizzeremo la condizione riflessiva per modellare l'unico edificio presente in alveo, in corrispondenza del ponte dei Cavalleggeri.

Il primo passo consiste nel creare un nuovo vettore di tipo 'poligono', dopodichè si procede a disegnare il poligono dell'edificio. A questo punto si apre la tabella degli attributi e si aggiunge un nuovo campo: 'bc' (che sta per boundary conditions, in inglese) di tipo stringa e sull'unico record presente si scrive 'reflective', in modo da applicare la condizione riflessiva.

**NB:** In realtà, nel caso in esame, il vettore 'holes' potrebbe essere passato anche senza nessun campo oltre alla geometria. Se non viene passato il campo 'bc', infatti, il software applica la condizione riflessiva a tutti gli holes.

In Figura 44 si vede il file vettoriale degli 'holes' creato, con la sua tabella degli attributi in alto a destra.



**Figura 44:** File vettoriale degli 'holes'

## 10 Simulazione idraulica

Arrivati a questo punto sono stati definiti tutti gli elementi per poter lanciare una simulazione idraulica. Verrà utilizzato il modello a fondo fisso, perchè il tratto cittadino del torrente Fersina è stabilizzato da salti di fondo (soglie costruite appositamente per mitigare l'erosione del fondo in quanto elementi inderodibili che 'fissano' la quota dell'alveo) oltre che da platee in calcestruzzo. Inoltre, le pareti sono costituite da muri in pietra e cemento, anch'esse pressochè inderodibili.

Infine, l'alveo ha una pendenza ridotta, grazie alla cascata di monte e a tutte le soglie lungo il tratto, e quindi la velocità dell'acqua sarà relativamente bassa, e con essa l'entità del trasporto solido. In effetti anche durante l'alluvione *Vaya* del 2019 la struttura del fondo del tratto cittadino del torrente Fersina è variata molto poco.

Sarebbe comunque possibile utilizzare il modello a fondo mobile, delineando le regioni in cui avviene il trasporto solido e lasciando fuori tutti gli elementi inderodibili, ma questo aggiungerebbe ulteriore complessità al problema portando probabilmente benefici marginali. Perciò, per il momento, si è preferito affidarsi al modello a fondo fisso.

### 10.1 Modello a fondo fisso

La finestra di HYDRO-GIS del modello a fondo fisso è strutturata come un Notebook. Per chi non lo sapesse, un Notebook è un'insieme di pagine tra cui l'utente può scorrere cliccando con il mouse in un rettangolo in alto con il nome della pagina. Nella prima pagina devono essere indicati i seguenti elementi (obbligatori):

- Il Digital Terrain Model (file raster)
- La scabrezza di Manning (file raster)
- Il bordo del dominio (file vettoriale)
- Il file delle variabili (file testuale (.txt/.csv))
- Il nome del file di output, ossia del risultato della simulazione idraulica che si vuole eseguire

Oltre a ciò occorre indicare il tempo di fine simulazione, l'algoritmo da utilizzare (consigliato DE1, vedere manuale utente), la risoluzione generale (fuori dagli interiors) e se consentire o meno ad Anuga il calcolo parallelo (più velocità nei calcoli).

Nella seconda pagina, invece, possono essere specificati i seguenti elementi (opzionali):

- Gli interiors (file vettoriale)
- Gli holes (file vettoriale)
- I riverwalls (file vettoriale)
- Gli inlets (file vettoriale)
- I culverts (file vettoriale)
- La risoluzione di output

La risoluzione di output rappresenta la dimensione di cella che avrà il risultato della simulazione. Anuga, come già spiegato, utilizza celle triangolari la cui dimensione è determinata dagli interiors e dal valore di risoluzione generale (fuori dagli interiors) specificata nella prima pagina del Notebook. Una volta terminata la simulazione Anuga produce un file SWW (compressato) che utilizza le stesse celle triangolari della simulazione. Il software HYDRO-GIS estrapola da tale file un file raster con cella quadrata, utilizzando tecniche avanzate di interpolazione spaziale. La risoluzione di output è la dimensione di tali celle ed è quindi un valore che influenza solamente la visualizzazione dei risultati e non i calcoli della simulazione.

In Figura 45 sono riportate una a fianco all'altra le prime due pagine del Notebook, con i dati di input relativi al presente caso di studio, del torrente Fersina.

La terza pagina del notebook è dedicata ai grafici. Dopo che verrà lanciata la simulazione, oppure dopo che verrà cliccato il tasto *Mostra problema* verranno prodotti i grafici:

- Del dominio di calcolo e della mesh triangolare generata da Anuga. È possibile espandere questo grafico a schermo intero.
- Del Digital Terrain Model come viene interpretato da Anuga, sempre con celle triangolari. È possibile espandere questo grafico a schermo intero.
- Delle condizioni al contorno applicate a ciascun segmento del bordo del dominio. È possibile espandere questo grafico a schermo intero.
- Delle variabili temporali

Questi grafici permettono di sapere che i vari files di input creati sono stati interpretati correttamente da Anuga.

L'ultima pagina del Notebook mostra l'avanzamento temporale della simulazione, sia attraverso uno Slider verde in basso e sia grazie ai messaggi di Log che forniscono ulteriori informazioni all'utente, come per esempio la lunghezza del passo temporale corrente (utile per monitorare instabilità numerica e altre problematiche). In Figura 46 sono riportate, una a fianco all'altra, la terza e la quarta pagina del Notebook.

Prima di lanciare la simulazione cliccando il tasto **ok**, è consigliabile premere il pulsante **mostra problema**. In questo modo verranno prodotti tutti i grafici preliminari ma senza lanciare effettivamente la simulazione. In altre parole, sarà possibile controllare che Anuga abbia interpretato correttamente tutti i nostri dati di input.

In Figura 47 è riportato il grafico del dominio di calcolo e delle mesh triangolari (primo grafico della terza pagina del Notebook) ingrandito a schermo intero con zoom sul Ponte dei Cavalleggeri. In Figura 48 è riportato il grafico delle condizioni al contorno associate ad ogni segmento. Si può vedere come nel segmento terminale venga letta correttamente la condizione trasmissiva mentre in tutti gli altri segmenti quella di Dirichlet. Infine, in Figura 49 è riportato l'idrogramma triangolare.

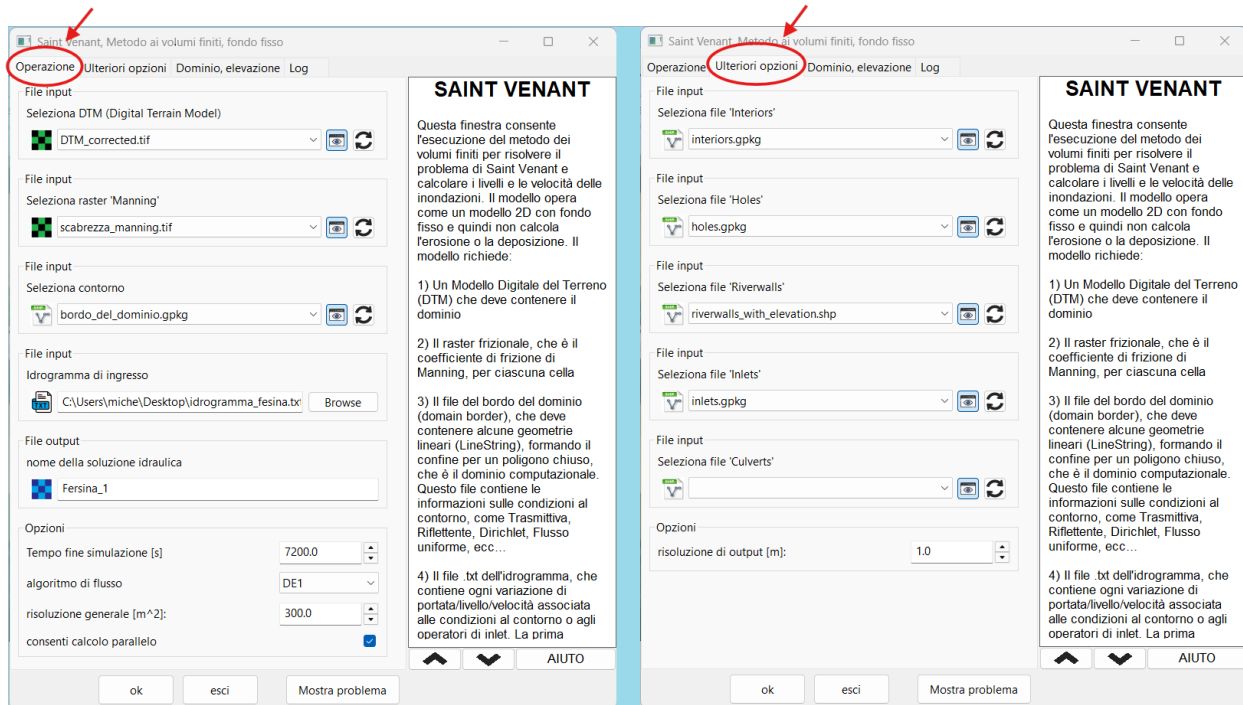


Figura 45: Prima e seconda pagina del Notebook

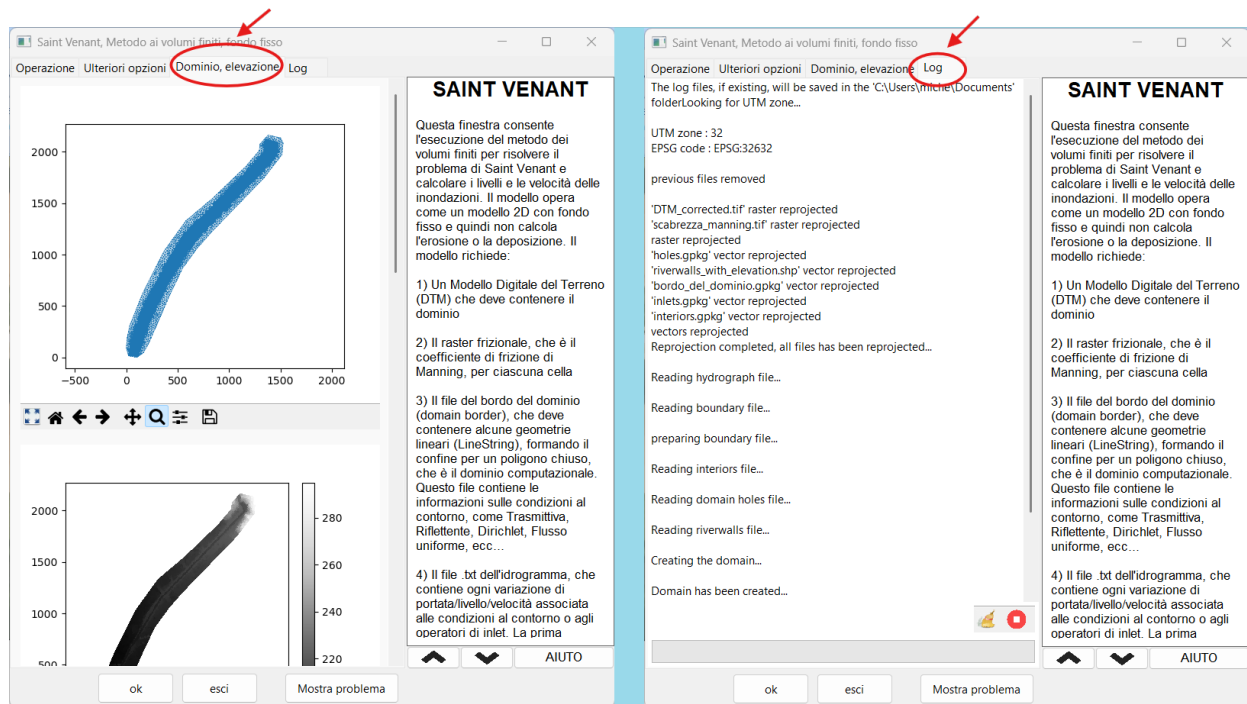
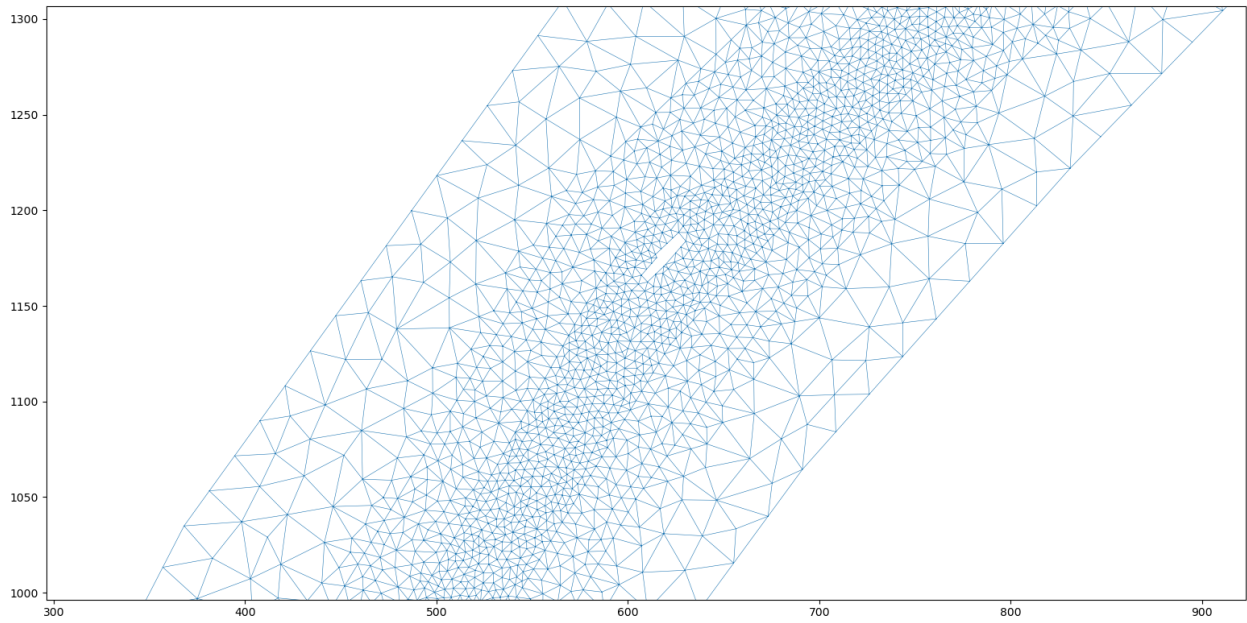
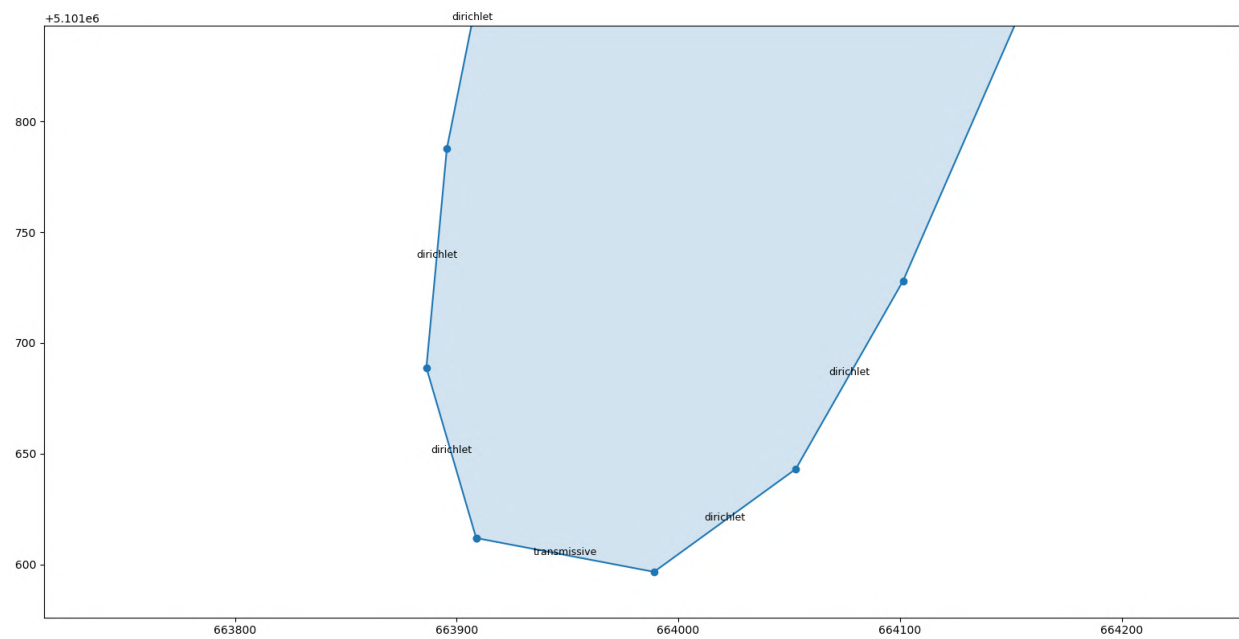


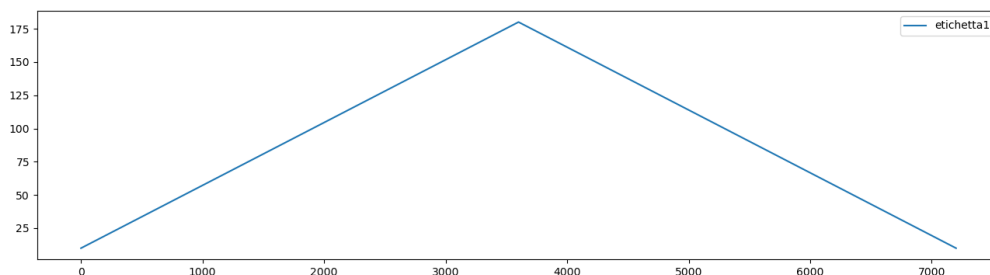
Figura 46: Terza e quarta pagina del Notebook



**Figura 47:** Mesh triangolari generate da Anuga nella zona del Ponte dei Cavalleggeri. Si vedono le tre zone a risoluzione distinta (alveo, vicino all'alveo e lontano dall'alveo) e anche il 'buco' inserito per simulare l'edificio immediatamente a valle del Ponte



**Figura 48:** Condizioni al contorno associate ad ogni segmento del bordo del dominio, nella zona finale del tratto cittadino del torrente Fersina.



**Figura 49:** Idrogramma triangolare

Una volta verificato attraverso i grafici che tutto sia in ordine e che Anuga abbia interpretato correttamente i dati di input, è il momento di lanciare la simulazione, facendo click sul tasto *ok*. In questo modo comincerà la simulazione (vedere Figura 50)

Per monitorare l'avanzamento della simulazione è necessario spostarsi sul pannello dei Log (ossia l'ultima pagina del Notebook) e attendere finché la barra verde di avanzamento non arrivi al 100% e quindi i calcoli siano completati. Una volta che la simulazione sarà conclusa, verrà creato il file SWW e poi verranno estratti i raster delle soluzioni, pronti per essere visualizzati con HYDRO-GIS. Quando ciò accade, sul pannello dei log viene comunicato che il processo è stato completato (*Process completed!*, Vedere Figura 51).

Per ottimizzare i tempi necessari al completamento della simulazione, è consigliabile adottare due accorgimenti:

- Se si utilizza il PC per altri motivi mentre una simulazione è in corso, non ridurre a icona la finestra utilizzata per lanciare la simulazione e monitorarne l'avanzamento. Su postazioni PC con più di uno schermo, dovrebbe essere sufficiente spostare la finestra in uno schermo secondario e lasciarla aperta. Ridurre completamente a icona le finestre del software HYDRO-GIS, durante una simulazione, può far raddoppiare il tempo necessario al completamento del processo perché il PC gli assegna in automatico meno risorse di memoria.
- Se non si utilizza il PC durante la simulazione, assicurarsi che non siano attivi dei timer di spegnimento per non attività. Se il PC va in stand-by, infatti, viene temporaneamente sospeso anche il processo di simulazione.

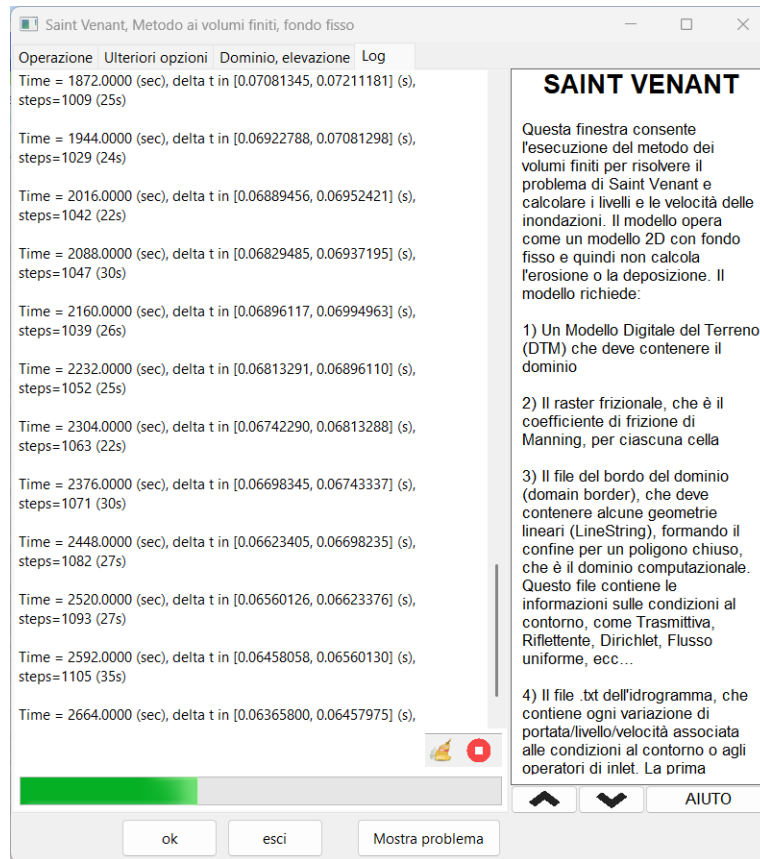
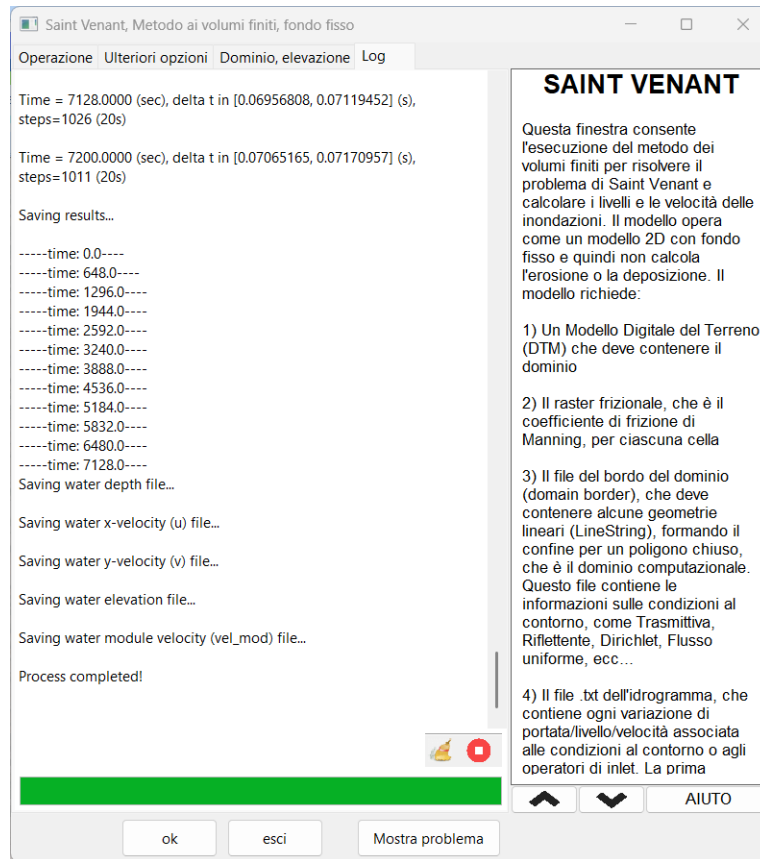


Figura 50: Simulazione avviata. L'avanzamento è visibile nel pannello di log.



**Figura 51:** Fine della simulazione, è possibile procedere alla visualizzazione dei risultati.

# 11 Visualizzazione dei risultati

Per visualizzare i risultati bisogna cliccare sul pulsante *Mostra risultati*, nella sezione idraulica del software. Si aprirà un pannello sulla destra che mostra, in ordine dall'alto verso il basso:

- Delle funzionalità in alto che consentono di personalizzare i colori (e la grafica in generale), di visualizzare sezioni idrauliche, di interrogare dei punti e molto altro (non approfondiremo, vedere manuale utente)
- Tutte le soluzioni svolte fino a quel momento, tra cui poter scegliere quale visualizzare
- I controlli temporali per andare avanti e indietro nel tempo e visualizzare l'evoluzione delle variabili idrauliche (tiranti, velocità, scavi/depositi (se a fondo mobile))
- Controlli per poter eliminare dalla memoria vecchie soluzioni (e liberare spazio sul computer)
- Un pulsante che consente di aggiungere le frecce di flusso alla visualizzazione (pulsante *frecce*)
- Delle caselle di testo, in fondo, dove poter leggere l'istante corrente della simulazione e eventuali valori interrogati

In Figura 52 è mostrato questo pannello, che si apre sulla destra dell'interfaccia di HYDRO-GIS.

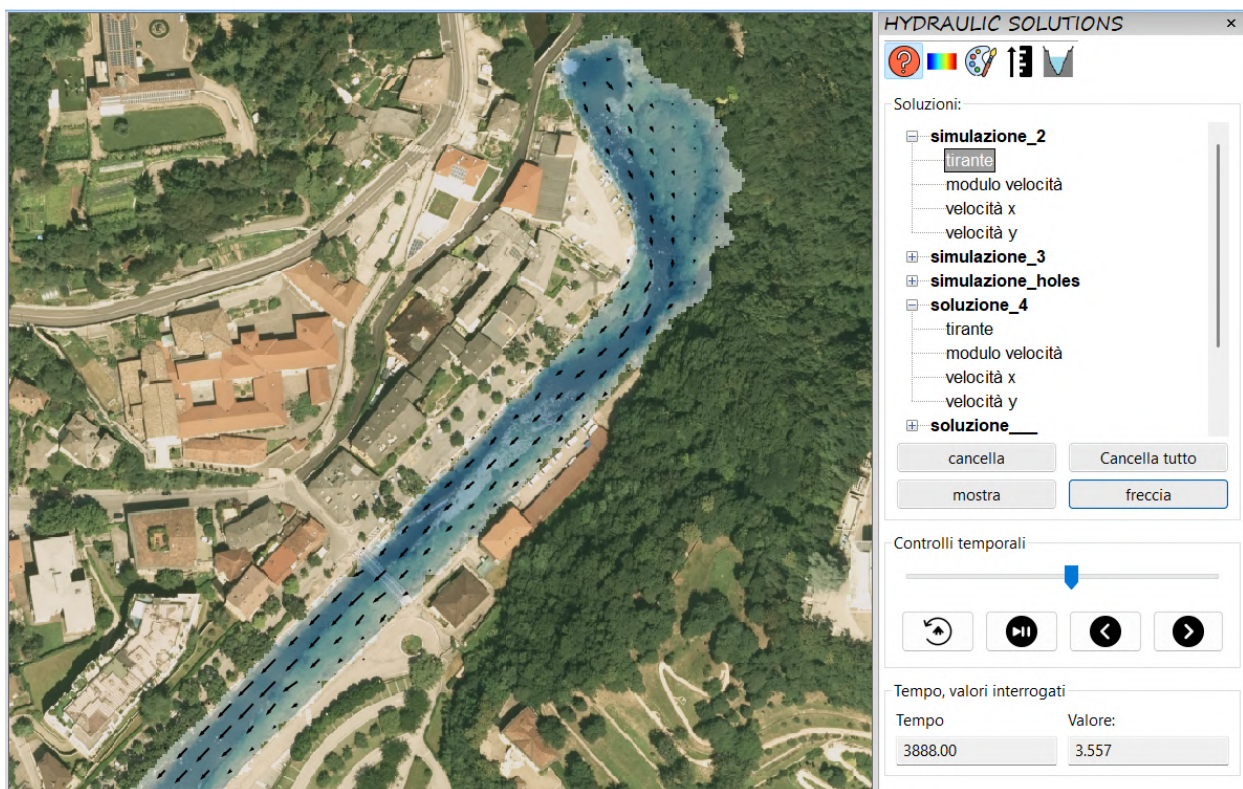


Figura 52: Pannello per la visualizzazione dei risultati delle simulazioni idrauliche

## 11.1 Opzioni grafiche

Cliccando sull'icona del pennello, nella barra degli strumenti in alto, è possibile personalizzare tutte le colorazioni. Per impostazione predefinita, i tiranti (altezza dell'acqua) vengono rappresentati con la colormap *Blues*, il modulo della velocità con *white\_red\_a* (che va dal bianco al rosso) e infine gli scavi e i depositi con *green\_white\_brown\_a* (che mostra in verde gli scavi e in marrone

i depositi).

In questa finestra è possibile modificare a piacere le colormap da utilizzare e anche i relativi valori minimo e massimo associati, nonché scegliere di utilizzare solo una certa gamma di colori grazie allo slider. Inoltre, è possibile regolare l'opacità di ciascuna tipologia di mappa e infine è possibile applicare un filtro per mascherare i valori nulli.

Mascherare i valori nulli significa che le celle con valore pari a 0 verranno omesse dalla visualizzazione. In altre parole si vedrà attraverso come se non ci fossero. Ciò può essere utile sia per visualizzare al meglio eventuali cartografie sottostanti, come un ortofoto o una mappa di esposizione, sia per individuare immediatamente eventuali esondazioni (anche di entità modesta).

In Figura 53 è possibile vedere la finestra di modifica delle proprietà grafiche. Nel nostro caso, abbiamo deciso di attivare solo l'opzione 'maschera valori nulli' nel caso della visualizzazione dei tiranti e del modulo della velocità. In tutto il resto, sono state mantenute le impostazioni di colorazione predefinite.

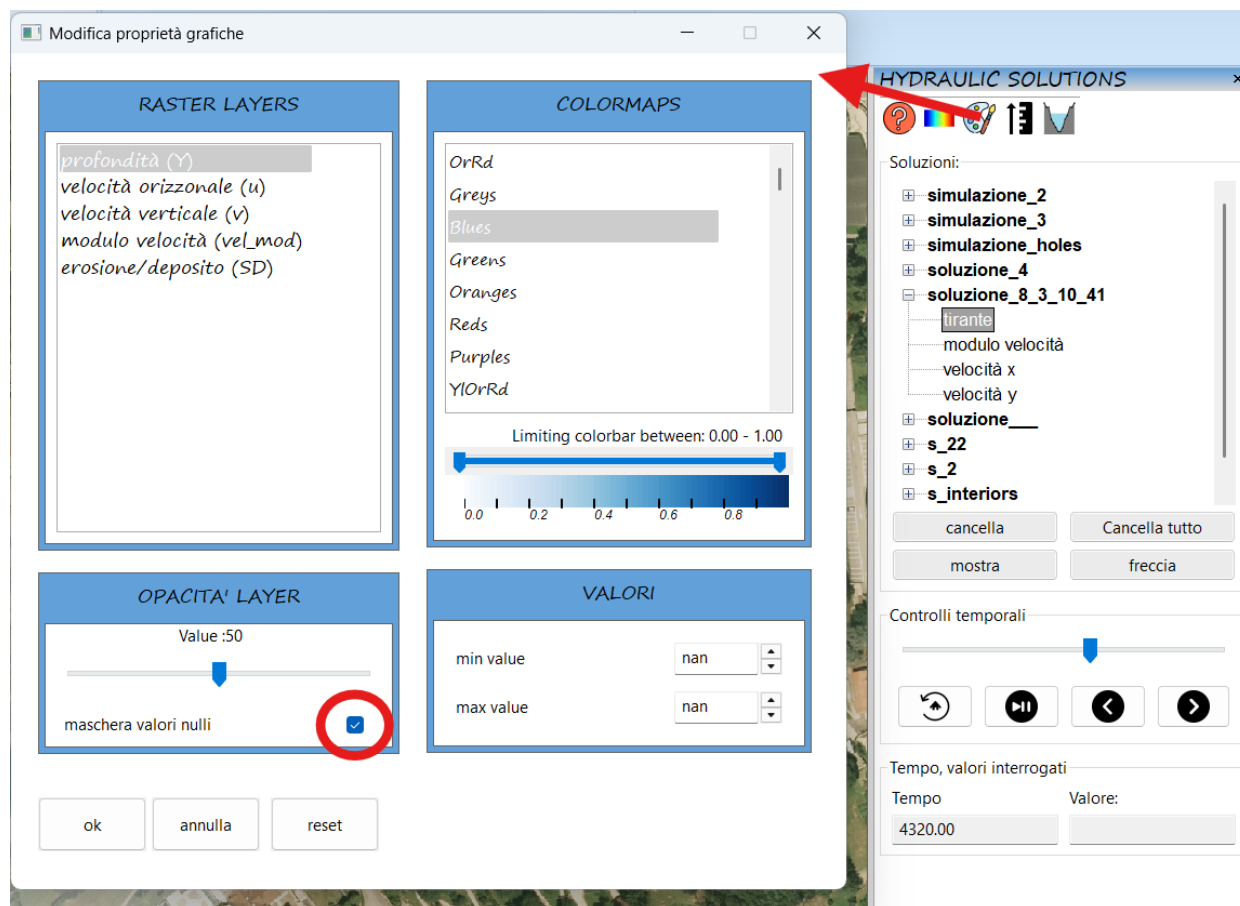


Figura 53: Nascondere i valori con tirante nullo, in modo da visualizzare solo le celle con un tirante positivo.

## 11.2 Interroga valori, controlli temporali

Come già spiegato nel manuale utente e accennato in precedenza, è presente nel pannello delle soluzioni idrauliche la funzionalità di interrogazione puntuale delle celle. Si attiva cliccando sull'icona de punto di domanda, a sinistra nella barra degli strumenti in cima al pannello. Una volta interrogato un punto (una cella), il suo valore verrà mostrato in basso a destra del pannello (sotto 'Valore'). Il funzionamento della funzionalità 'Interroga' è mostrato anche graficamente in

Figura 54.

I controlli temporali servono per andare avanti o indietro nel tempo della nostra simulazione. Per fare ciò si utilizza lo Slider assieme alle frecce ad esso collegate (avanti, indietro). Il valore temporale esatto, espresso in secondi, verrà mostrato nella casella di testo in basso a sinistra del pannello (sotto 'Tempo') (vedere Figura 54).

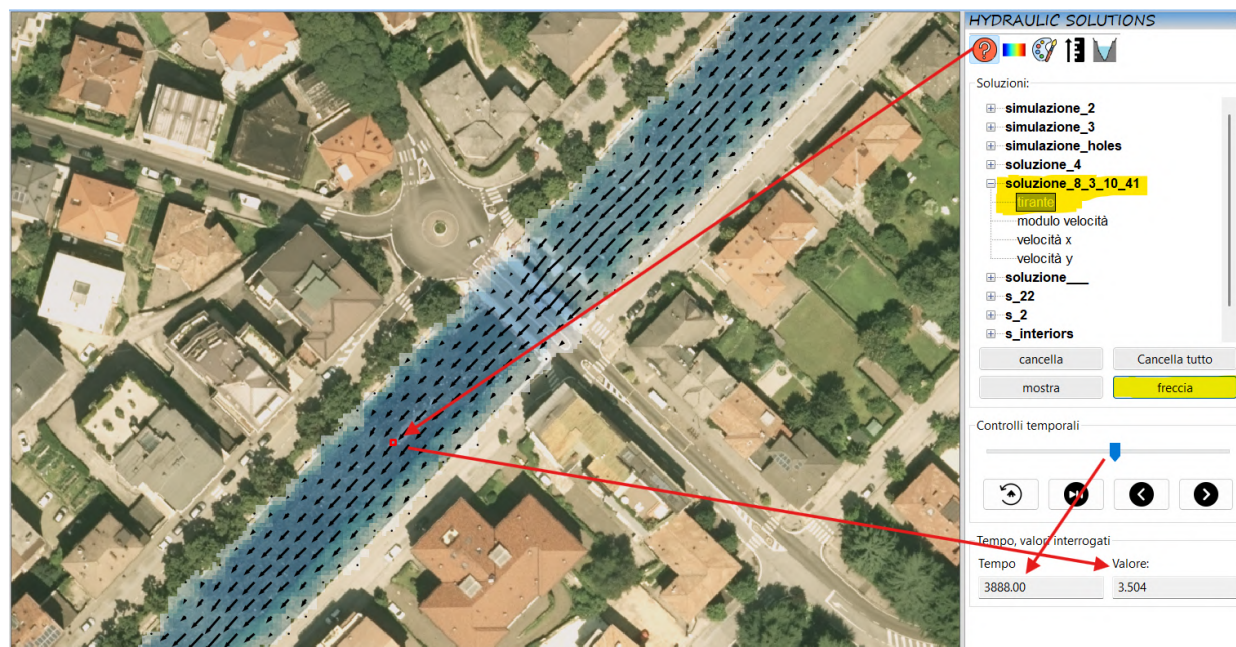


Figura 54: Visualizzazione soluzioni, interrogazione in un punto

### 11.3 Visualizza sezioni

Oltre alla classica visualizzazione 2D dall'alto, dove si osservano velocità e tiranti come raster di celle, è possibile visualizzare anche Sezioni. È possibile visualizzare una sezione cliccando sull'icona della sezione, a destra della barra degli strumenti, in alto al pannello.

Una volta aperta la finestra, bisogna disegnare la sezione sulla mappa facendo click sul punto iniziale e rilasciando il mouse su quello finale. A questo punto ricomparirà la finestra con la sezione desiderata. Nel grafico saranno rappresentati il fondo, i tiranti e gli scavi e i depositi. In Figura 55 è rappresentato visivamente il principio di funzionamento di questo strumento.

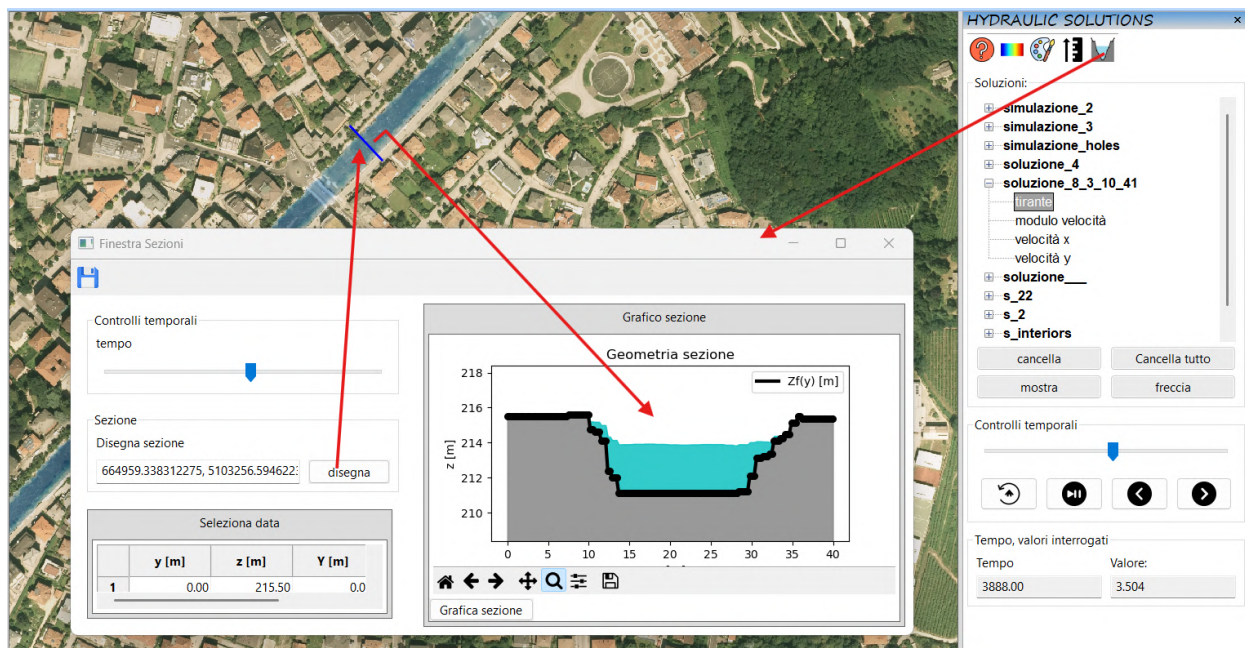


Figura 55: Visualizzazione di sezioni

## 11.4 Risultati ottenuti

In base ai risultati ottenuti, il tratto cittadino del torrente Fersina è in grado di sopportare un evento di piena con portata al colmo pari a  $Q = 180 \text{ m}^3/\text{s}$ , anche se in alcuni punti l'acqua arriva molto vicina a tracimare al di fuori dell'alveo del torrente, soprattutto nel tratto più a valle.

La prima parte del tratto, dalla cascata di Ponte Cornicchio fino al ponte dei Cavalleggeri, è in grado di far transitare una portata leggermente superiore e infatti presenta un franco (al colmo) che oscilla tra 1 m e 1.5 metri. La seconda parte del tratto (che va dal ponte dei Cavalleggeri in giù), invece, ha un franco che oscilla tra 0.5 m e 1 m.

In Figure 56, 57, 60, 61, 58, 59 si riportano alcune immagini estratte dai risultati delle simulazioni.

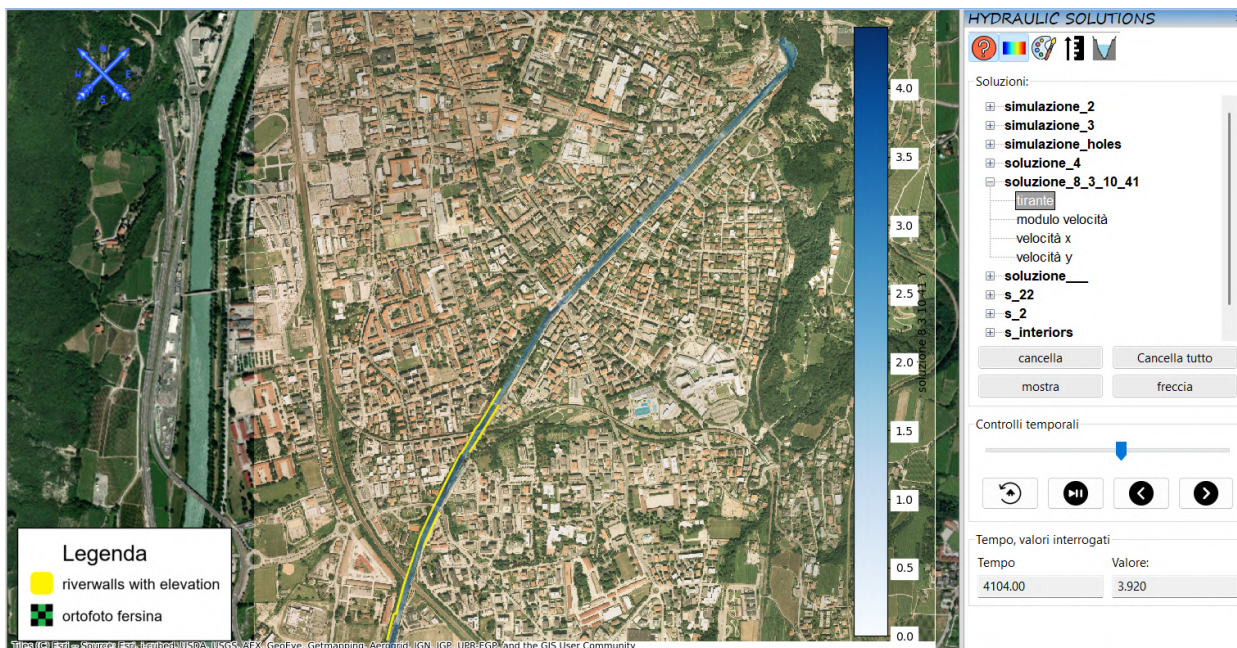


Figura 56: Tiranti nel dominio immediatamente dopo il passaggio della portata di picco: non c'è stata nessuna esondazione!



Figura 57: Tiranti, ponte dei Cavalleggeri

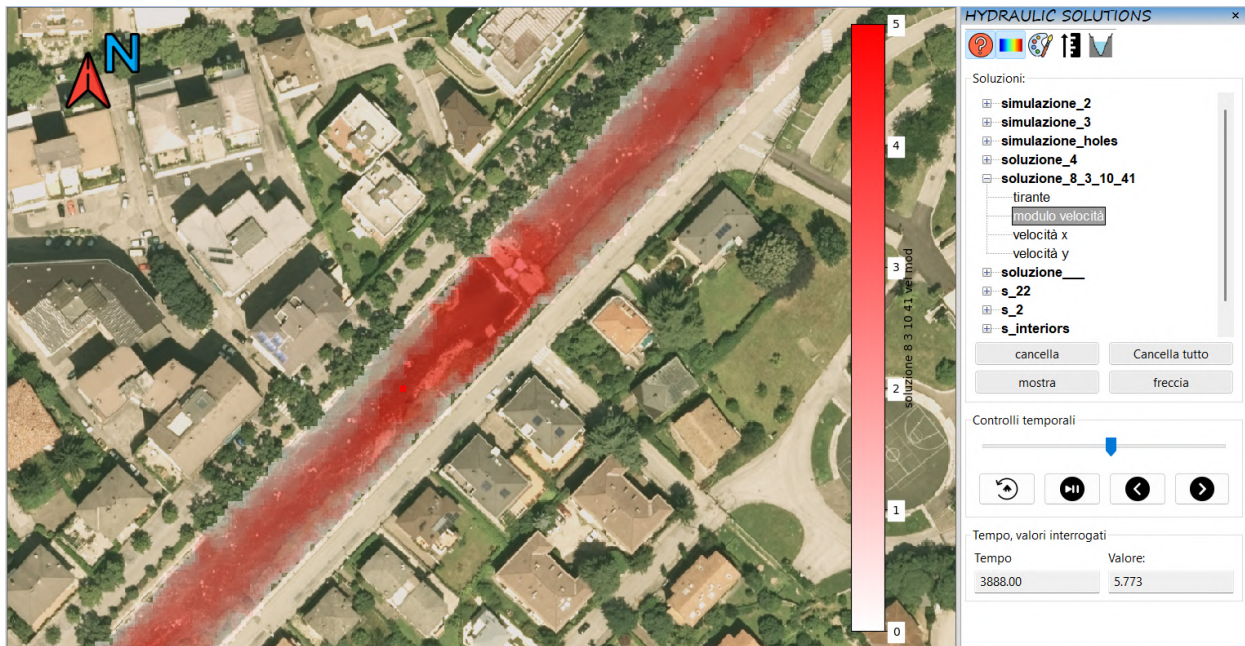
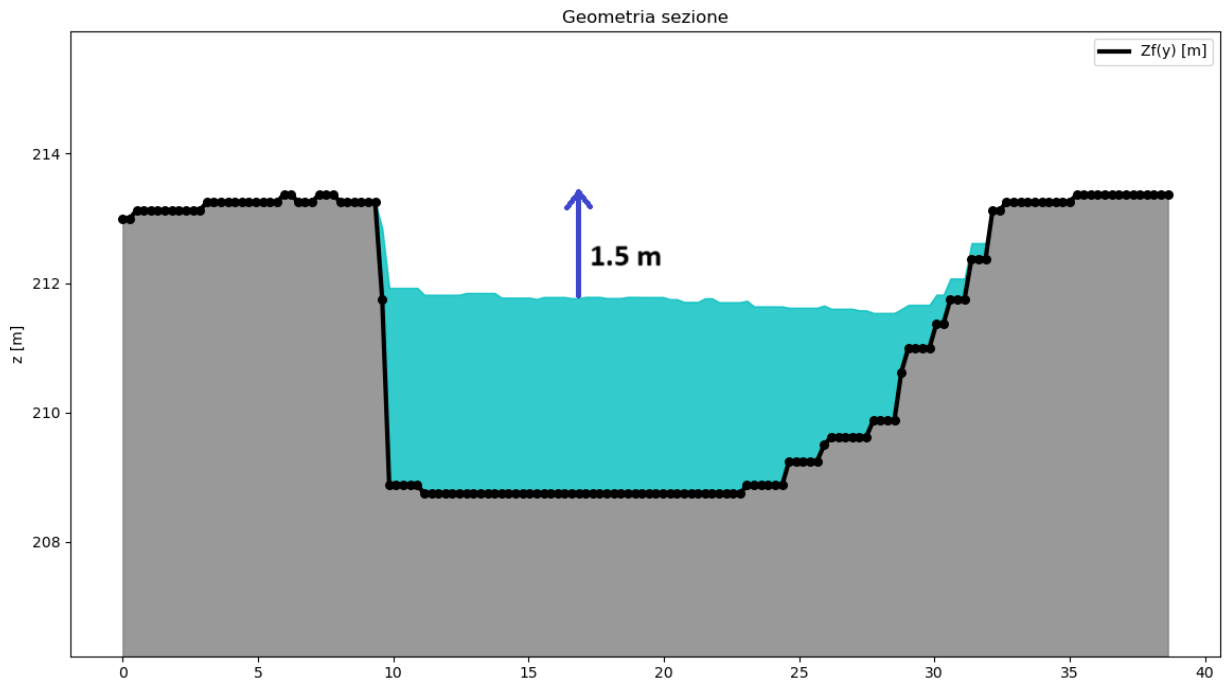


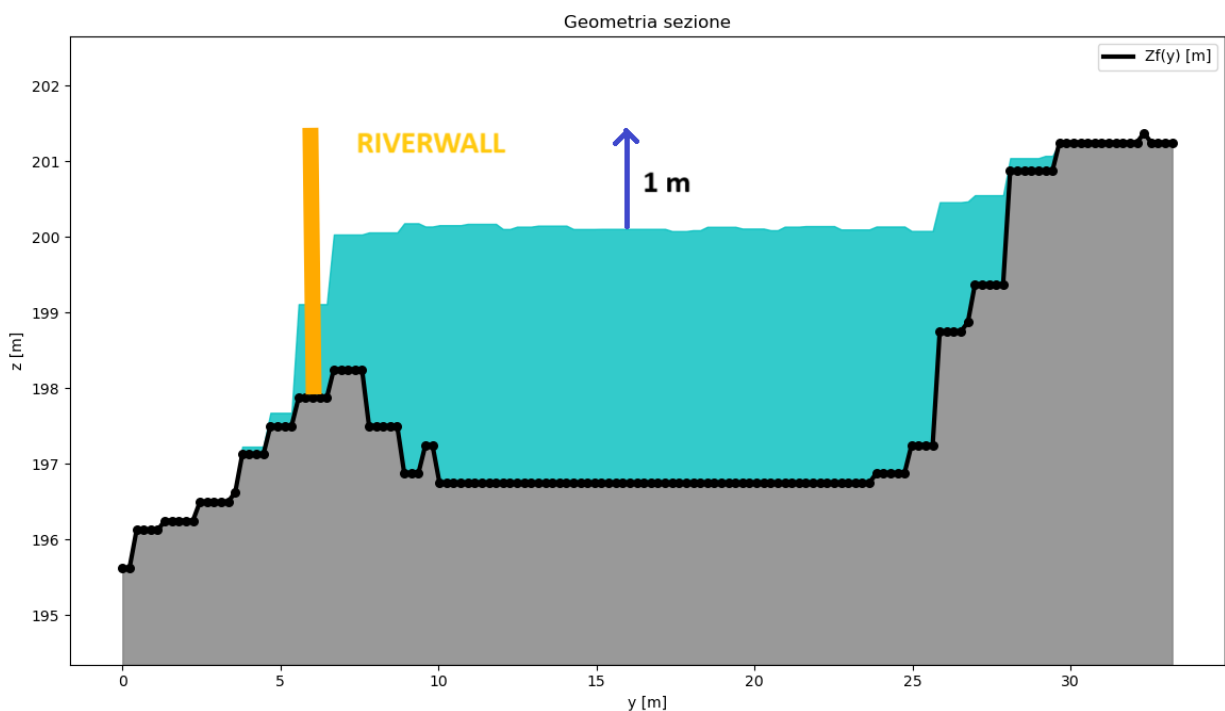
Figura 58: Modulo della velocità, Buca delle dame di Sion (vicino al liceo Galileo Galilei)



Figura 59: Inizio del tratto cittadino del torrente Fersina. Sono rappresentati il modulo della velocità e le frecce di flusso

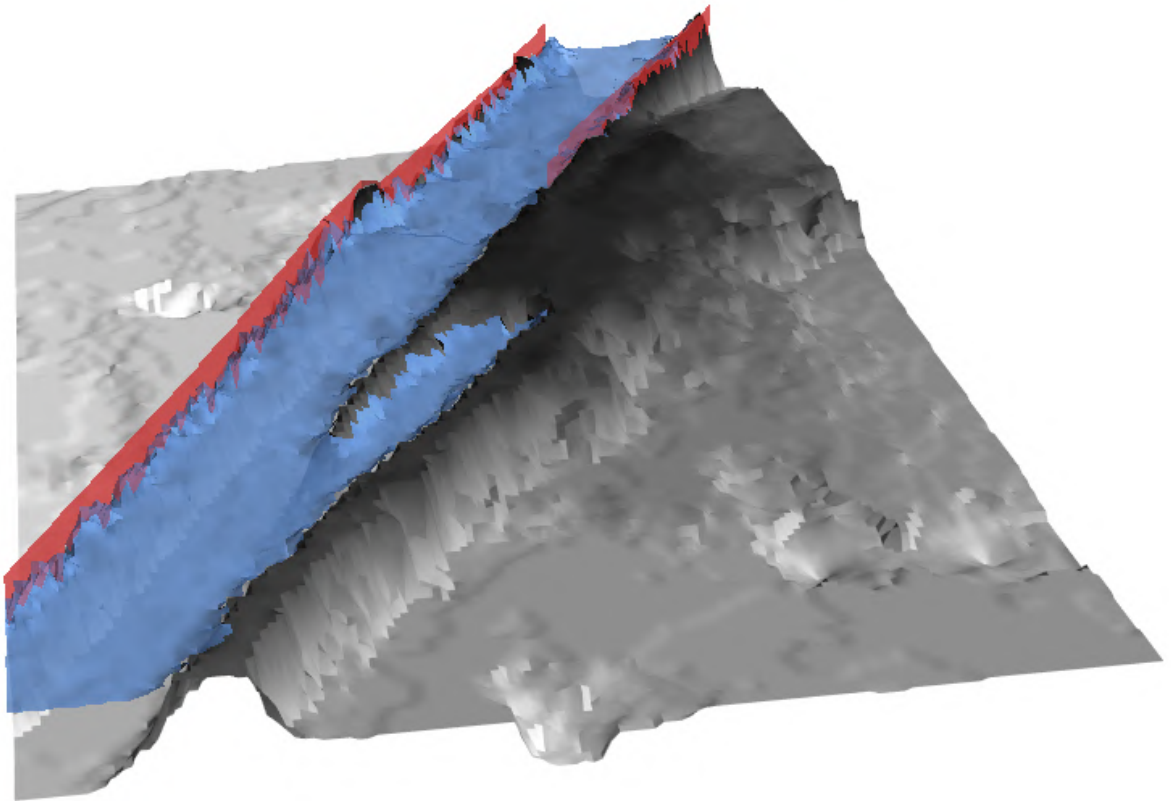


**Figura 60:** Esempio di sezione del tratto di monte, che va dalla cascata fino al ponte dei Cavalleggeri. Anche durante il passaggio del colmo rimane un franco di circa un metro e mezzo (anche se ci sono sezioni con franco minore, di circa un metro)



**Figura 61:** Nel tratto dal Ponte dei Cavalleggeri in giù il franco è minore (oscilla da mezzo metro al metro)

Infine in Figura 62 è possibile vedere un generico tratto di torrente con la visualizzazione 3D. La superficie dell'acqua è di colore azzurro, i riverwalls sono rappresentati come elementi bidimensionali di colore rosso e la superficie del DTM è rappresentata in scala di grigi. Nella figura, è stato presa una porzione critica del tratto di valle, in corrispondenza della confluenza con il rio Salè. Come si può vedere, anche al passaggio della portata di picco l'alveo riesce a contenere la piena e l'acqua non tracima.



**Figura 62:** Visualizzazione di un tratto di alveo in 3D, in scala  $(x,y) - z$  di 1:3