

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE



Tesi di Laurea Magistrale

**Modellazione idraulica bidimensionale dell'asta fluviale del PO nei pressi di
Torino tenendo conto dei contributi degli affluenti in sinistra**

Relatore: Prof. Carlo Vincenzo Camporeale

Correlatore:

Tesi di laurea di:
Francesco Di Naro
S253406

Anno Accademico:2019/2020

SOMMARIO

<i>Introduzione</i>	<u>1</u>
1. <i>Analisi speditiva sul calcolo dei tiranti del Torrente Sangone in collaborazione con l'AdbPO.</i>	2
1.1 Descrizione del tratto in esame	2
1.2 Calcolo dei tiranti	3
2. <i>Asta fluviale del fiume PO in esame</i>	5
2.1 Cenni sul Po	5
2.2 Descrizione del tratto in esame	6
3. <i>La modellazione idraulica</i>	8
3.1 Cenni sulla modellazione idraulica	8
3.2 I software utilizzati	9
3.2.1 Geo Hec-Ras	9
3.2.2 Delft 3D	11
4. <i>Equazioni utilizzate nella modellazione idraulica</i>	13
4.1 Modellazione monodimensionale 1D	13
4.1.1 Moto stazionario	13
4.1.2 Moto Vario	16
4.2 Modellazione bidimensionale 2D	18
4.2.1 Moto Vario	18
5. <i>Costruzione modelli idraulici</i>	20
5.1 Geo Hec-Ras Modello 2D	20
5.1.1 Raccolta dei dati	20
5.1.2 Interpolazione delle sezioni batimetriche lungo l'asta fluviale	22
5.1.3 Scelta della discretizzazione spaziale (Mesh)	24
5.1.4 Assegnazione delle breaklines	24
5.1.5 Assegnazione di edifici, opere idrauliche e pile di ponti	26
5.1.6 Definizione spaziale della copertura del suolo (Land Cover)	29
5.1.7 Definizione delle condizioni al contorno (Boundary Condition)	30
5.2 Geo Hec-Ras Modello 1D	31
5.3 Delft3D Modello 2D	35

5.3.1 Raccolta dati e definizione Land Boundaries	36
5.3.2 Discretizzazione spaziale (Grid)	36
5.3.3 Definizione spaziale del terreno e della scabrezza (Bed level e Roughness)	37
5.3.4 Assegnazione di Edifici, opere idrauliche e pile di ponti	38
5.3.5 Definizione delle condizioni al contorno	39
6. Taratura dei modelli 2D	40
6.1 L'evento alluvionale dell'Ottobre 2000	41
6.2 Applicazione della taratura al modello	43
6.3 Risultati taratura Geo Hec-Ras e Delft3D	46
7. Scenari di calcolo	56
7.1 Propagazione dell'onda di Piena nel Po	57
7.2 Scenario idrogrammi in fase – TR20	60
7.3 Scenario idrogrammi in fase - TR200	63
7.4 Scenario idrogrammi in fase – TR500	70
7.5 Scenario idrogrammi non in fase – TR20	72
7.6 Scenario idrogrammi non in fase – TR200	75
7.7 Scenario idrogrammi non in fase – TR500	79
8. Interventi di prima approssimazione considerata la condizione più gravosa a TR200	81
Conclusioni	88
Bibliografia E SITOGRAFIA	89
ALLEGATI	I
ALLEGATI RIFERITI A TR20	II
ALLEGATI RIFERITI A TR200	III
ALLEGATI RIFERITI A TR500	IV
ALLEGATI CONFRONTO TR500	V
Ringraziamenti	

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 – ARS riferita al torrente Sangone.....	2
Fig. 2 – Classificazione Tiranti	3
Fig. 3 – Classificazione tiranti idrici.....	4
Fig. 4 – Inquadramento generale del tratto in esame	7
Fig. 5 - schema semplificato algoritmo di soluzione numerica	10
Fig. 6 – Schematizzazione elemento di calcolo	11
Fig. 7 – Stralcio sezioni batimetriche.....	22
Fig. 8 – Stralcio DTM batimetria	23
Fig. 9 - Stralcio DTM interpolato con la batimetria.....	23
Fig. 10 - Tipologie di Mesh.....	24
Fig. 11 – Stralcio Modello – Breaklines segnate in nero	25
Fig. 12 – Stralcio Modello – Edifici segnati in Giallo.....	26
Fig. 13 – Stralcio Modello – Pile dei ponti segnate in rosso	28
Fig. 14 – Stralcio Modello – Modellazione Diga Cimena.....	28
Fig. 15 – Stralcio classi identificative Land Cover	29
Fig. 16 – Stralcio Modello 1D	32
Fig. 17 – Schema Modellazione ponte all’interno del software Hec-Ras.....	32
Fig. 18 – Schema modellazione opera idraulica all’interno del software Hec-Ras	33
Fig. 19 – Attraversamento Ferroviario Moncalieri	34
Fig. 20 – Ponte Vittorio Emanuele I (Torino)	35
Fig. 21 – Ponte XI Settembre (San Mauro Torinese)	35
Fig. 22 – Stralcio Grid – Land Boundaries segnate in rosso	37
Fig. 23 – Stralcio Modello – Thin Dam segnate in rosso	38
Fig. 24 – Modellazione Ponte Diga.....	39
Fig. 25 – Stralcio Modello – Ponte XI Settembre segnato in verde.....	39
Fig. 26 – Idrogrammi nelle stazioni di Carignano e Murazzi (ARPA evento alluvionale Ottobre 2000)	42
Fig. 27 – Idrogrammi utilizzati per la taratura.....	45
Fig. 28 – Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Comune Gorra	46
Fig. 29 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Destra orografica diga la loggia.....	47
Fig. 30 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Cave di Moncalieri.....	47
Fig. 31 - Sottopassi strada brandina Comune di Moncalieri	48
Fig. 32 – Sottopassi strada tiro a segno Comune di Moncalieri.....	48
Fig. 33 – Canale che attraversa l’argine sinistro del Chisola Comune di Moncalieri.....	49
Fig. 34 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Comune di Moncalieri .	49

Fig. 35 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Comune di Torino 1....	50
Fig. 36 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Comune di Torino 2....	50
Fig. 37 – Opere Presenti nel Lungo Dora Pietro Colletta Comune di Torino.....	51
Fig. 38 – Opere presenti lungo il Corso F.Guerrazzi Comune di Torino	51
Fig. 39 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Parco Colletta, Vivaio Comunale regio parco e Parco della confluenza.....	52
Fig. 40 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Lago Sorgente Po	52
Fig. 41 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Tratto finale Modello ..	53
Fig. 42 – Confronto Taratura Geo Hec Ras – Delft3D (Aree allagate Geo Hec Ras segnate come contorno in nero) dalla stazione Carignano fino a valle di Torino	54
Fig. 43 - Confronto Taratura Geo Hec Ras – Delft3D (Aree allagate Geo Hec Ras segnate come contorno in nero) dalla confluenza Dora Riparia fino a valle modello idraulico	55
Fig. 44 – Idrogrammi propagazione onda di piena nel Po – TR20.....	58
Fig. 45 - Idrogrammi propagazione onda di piena nel Po – TR200.....	58
Fig. 46 - Idrogrammi propagazione onda di piena nel Po – TR500.....	59
Fig. 47 – Idrogrammi in fase TR20.....	60
Fig. 48 – Aree Allagate in prossimità dell’autostrada A6 e la ferrovia nel Comune di Moncalieri .	61
Fig. 49 - Aree Allagate nella zona del Parco delle Vallere nel Comune di Moncalieri.....	61
Fig. 50 – Aree allagate in prossimità della confluenza con il torrente Sangone	62
Fig. 51 - Aree allagate in prossimità delle confluenze con i fiumi Dora Riparia e Stura di Lanzo..	62
Fig. 52 - Idrogrammi in fase TR200	63
Fig. 53 – Aree allagate Comune di Moncalieri	64
Fig. 54 - Aree allagate zona parco lungo Po – segnata in rosso.....	65
Fig. 55 - Aree allagate zona Corso Trieste	65
Fig. 56 – Aree allagate confluenza Sangone	66
Fig. 57 – Aree allagate in prossimità di Corso Moncalieri.....	66
Fig. 58 - Aree allagate in prossimità del Borgo Pillonetto	67
Fig. 59 - Aree allagate zona Vanchiglietta	67
Fig. 60 - Aree Allagate nei pressi di Bertolla.....	68
Fig. 61 - Aree Allagate nei pressi del Comune di San Mauro.....	69
Fig. 62 - Aree Allagate nei pressi del Depuratore Centrale Smat	69
Fig. 63 - Idrogrammi in fase TR500	70
Fig. 64 - Idrogrammi non in fase TR20	72
Fig. 65 -Confronto aree allagate nella zona golenale compresa fra Chisola e Sangone	73
Fig. 66 - Confronto aree allagate nella zona di confluenza con il fiume Stura di Lanzo	74
Fig. 67 - Confronto aree allagate nella zona di valle del Modello	74
Fig. 68 - Idrogrammi non in fase TR200	75

Fig. 69 – Confronto aree allagate in prossimità del tratto considerato del torrente Chisola	76
Fig. 70 - Confronto aree allagate in prossimità del Comune di Moncalieri.....	77
Fig. 71 – Confronto aree allagate zona Vanchiglietta	77
Fig. 72 - Confronto aree allagate Comune di San Mauro Torinese	78
Fig. 73 - Confronto aree allagate a valle del Modello	78
Fig. 74 – idrogrammi non in fase TR500	79
Fig. 75 - Scenario con Portata nel Chisola riferita a TR200	82
Fig. 76 - Scenario con colmo del Chisola in fase con quello del Po	82
Fig. 77 – Interventi sul torrente Chisola	83
Fig. 78 - Sottopasso Str.Brandina.....	83
Fig. 79 - Sottopasso Str. Tiro a Segno	84
Fig. 80 - Interventi zona torrente Sangone	84
Fig. 81 - Rialzo Viale Suor Giovanna Francesca Michelotti.....	85
Fig. 82 - Immagini da sopralluogo zona Parco Colletta - Parco della Confluenza	86
Fig. 83 – Interventi zona San Mauro Torinese	87

ELENCO DELLE TABELLE

Tab. 1 – Portate di Picco Riferite all'alluvione dell'Ottobre 2000.....	34
Tab. 2 – Portate al colmo di piena (ARPA evento alluvionale Ottobre 2000)	42
Tab. 3 – Tabella dei coefficienti di scabrezza – Chow,1959.....	43
Tab. 4 – Coefficienti di Manning usati per la taratura.....	44
Tab. 5 - Portate di Picco a diversi tempi di ritorno (* fornita da AIPO)	56
Tab. 6 - Dati riferiti alla propagazione dell'onda di piena nel Po	59
Tab. 7 - Traslazione idrogrammi e colmo ottenuto TR20	72
Tab. 8 - Traslazione idrogrammi e colmo ottenuto TR200	75
Tab. 9 - Traslazione idrogrammi e colmo ottenuto TR500	79

INTRODUZIONE

Nel presente elaborato si è trattata la modellazione idraulica unidimensionale e bidimensionale tramite i software Geo Hec Ras e Delft3D dell'asta fluviale del Po con sezione di monte coincidente con la stazione idrometrica "Carignano" (ARPA Piemonte) e sezione di valle coincidente con la strada Provinciale 500 (SP500) dopo il comune Settimo Torinese (TO). Il modello contiene circa quaranta chilometri di asta fluviale.

Il tratto studiato è uno dei tratti "fragili" del territorio Piemontese, infatti spesso entra in crisi durante gli eventi alluvionali. Il motivo principale è quello di avere degli affluenti che danno un apporto significativo in termini di portata al Po, inoltre quest'ultimo presenta delle opere idrauliche lungo il suo corso e molti attraversamenti con pile in alveo, le quali vanno ad ostruire, anche a causa di eventuale materiale flottante trasportato dalla corrente, il normale passaggio dell'acqua durante gli eventi di piena. Non meno importante è lo sviluppo antropico che ha portato la costruzione di nuove infrastrutture, spesso a contenere le acque del fiume Po, degli esempi sono i Murazzi di Torino e l'argine nel Comune di San Mauro Torinese posto in destra orografica e fiancheggiato dalla galleria della Strada Provinciale 590.

L'idea è stata quella di creare una modellazione bidimensionale in cui si sono tenuti in considerazione anche gli affluenti in sinistra orografica e si è voluto valutare l'influenza che questi hanno in termini di propagazione dell'onda di piena nel Po e le relative conseguenze. È ben noto che gli effetti di propagazione dell'onda nel Po dipendono anche dalle onde di piena provenienti dagli affluenti, basta pensare che la portata riferita al tempo di ritorno vent'anni nella stazione di Carignano è di 1600 m³/s, mentre il solo torrente Stura di Lanzo presenta allo stesso tempo di ritorno 1240 m³/s nella stazione Torino.

Nel presente lavoro, come già detto, si è realizzata una modellazione bidimensionale tarata sull'evento alluvionale dell'Ottobre 2000, il quale è stato uno dei più gravosi degli ultimi anni e del quale si hanno a disposizione molte osservazioni post-processing principalmente fornite da ARPA Piemonte e Autorità di bacino distrettuale del fiume Po (ADBPO). Dopo la taratura del modello si è valutata la propagazione dell'onda di piena nel fiume Po per tempi di ritorno 20,200 e 500 anni e sono state effettuate delle simulazioni considerando gli idrogrammi degli affluenti inizialmente in fase (condizione più gravosa) e successivamente non in fase (condizioni meno gravose) da queste si sono valutate le aree allagate e le differenze di queste aree allagate in funzione del tempo di arrivo dei picchi di piena degli affluenti alla confluenza del Po.

In conclusione, si è pensato a delle soluzioni di prima approssimazione da poter effettuare per limitare i danni e per ridurre il rischio di esondazioni soprattutto nei centri urbani dove si generano più disagi, spesso con conseguenze catastrofiche.

1. ANALISI SPEDITIVA SUL CALCOLO DEI TIRANTI DEL TORRENTE SANGONE IN COLLABORAZIONE CON L'ADBPO.

1.1 Descrizione del tratto in esame

Per il calcolo delle APSFR, l'AdbPO ha chiesto al Politecnico di Torino una collaborazione, sulla determinazione dei tiranti idrici del Po e degli affluenti in sinistra dello stesso. In questo capitolo ci soffermiamo al caso del torrente Sangone.

Il Sangone è un torrente del Piemonte lungo circa 47 km, affluente di sinistra del Po. Il perimetro del suo bacino è di 108 km². Esso Bagna la Val Sangone, che si trova tra la Val di Susa (a nord, dove scorre la Dora Riparia) e la Val Chisone (a sud, dove scorre il torrente Chisone).

Lo studio è stato circoscritto principalmente alla zona ARS (Aree Rischio Significativo di alluvione) inerente al torrente, la quale si estende dal comune di Beinasco fino al ponte di Corso Trieste nel comune di Moncalieri.



Fig. 1 – ARS riferita al torrente Sangone

1.2 Calcolo dei tiranti

Per il calcolo dei livelli idrici inerenti alla zona oggetto di studio, su direttiva dell'AdbPO, si è fatta un'analisi speditiva poiché non si hanno a disposizione informazioni batimetriche del torrente.

La procedura per il calcolo dei tiranti può essere semplificata in questi passaggi:

- Raccolta dati (Modello digitale del terreno, fonte AdbPo; Aree allagate a differenti tempi di ritorno, fonte AdbPo)
- Definizione della superficie TIN (Triangolazione della superficie)
- Calcolo dei tiranti per differenza
- Classificazione dei tiranti

Il primo passo è stato quello della raccolta dei dati, agevolata dall'accesso al database dell'AdbPO che la stessa ha consentito al politecnico, per usufruire di tutti i dati a disposizione. Si sono utilizzati il modello digitale del terreno (DTM) riferito all'anno 2008 e i file di tipo shape delle aree a rischio potenziale significativo di alluvione (APSFR) riferiti a tempi di ritorno 20 (Scenario P1), 200 (Scenario P2) e 500 anni (Scenario P3).

Quello che si è fatto principalmente è stato “appoggiare” il contorno delle APSFR sul DTM, cioè si è costruita una superficie TIN considerando i contorni dell'estensione delle APSFR alla stessa quota del DTM, successivamente attraverso l'ausilio di un Calcolatore Raster si è fatta la differenza fra la superficie TIN generata e il DTM sottostante. Si è ottenuto un modello digitale del terreno che rappresenta i tiranti idrici.

La classificazione dei tiranti è stata eseguita attraverso un “Plugin” sviluppato proprio dall'AdbPO e utilizzabile sul software ArcGis, questo divide i risultati ottenuti in cinque classi:

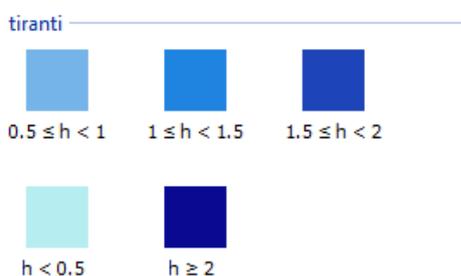


Fig. 2 – Classificazione Tiranti

Gli stessi procedimenti si sono fatti per tutti i tempi di ritorno. A titolo di esempio si riporta il risultato ottenuto per il caso duecentennale.

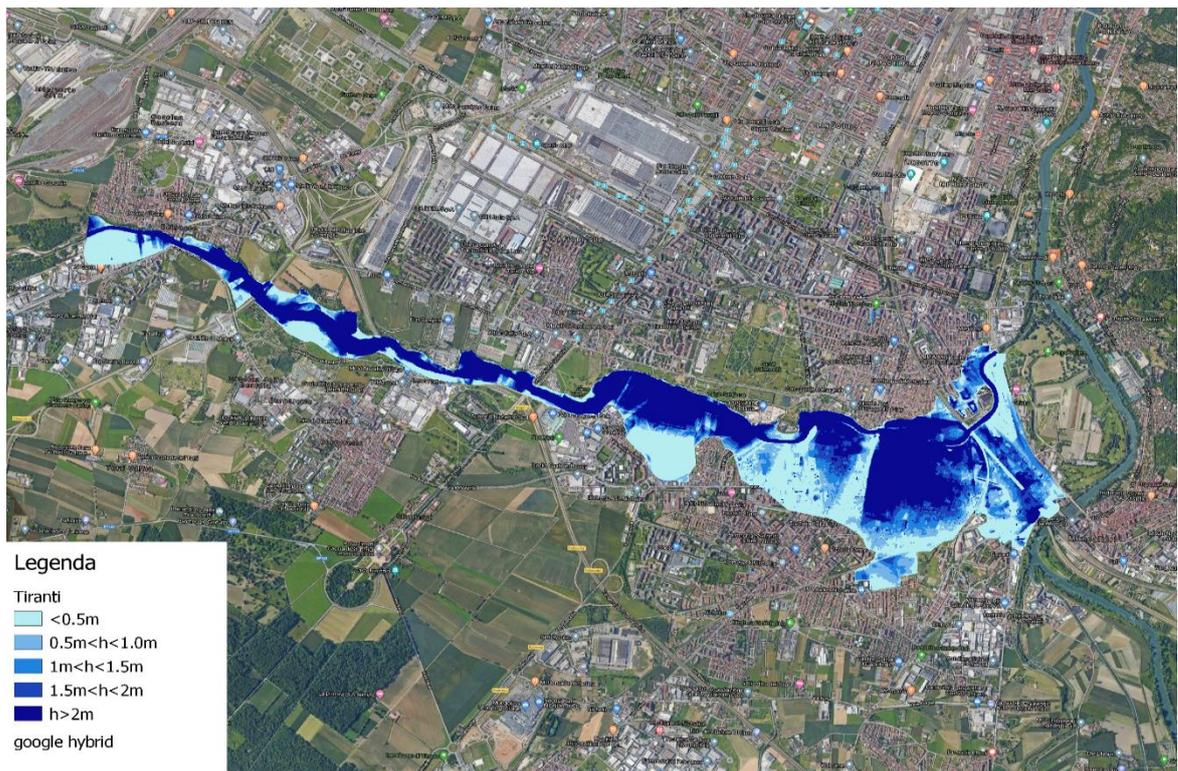


Fig. 3 – Classificazione tiranti idrici

Risulta alquanto evidente che l’approccio utilizzato non ha un carattere idraulico, ma prettamente geometrico. Risultano evidenti le discordanze fra i tiranti idrici e la morfologia del territorio, come risulta evidente l’impossibilità di raggiungere tiranti così alti come quelli ottenuti. L’approccio corretto al problema sarebbe stato quello di costruire un modello idraulico e di inserire come condizioni al contorno le portate riferite a tempi di ritorno di 20,200 e 500 anni, così da visionare da un punto di vista idraulico il problema e studiare eventuali problematiche che possono nascere dagli scenari simulati.

Tuttavia, l’assenza di informazioni batimetriche rende impossibile uno studio approfondito sul torrente, anche perché, come è ben noto, i risultati ottenuti da una modellazione idraulica dipendono principalmente dalla quantità e dalla qualità dei dati di input e da osservazioni ricavate in loco, ma soprattutto dal modello digitale del terreno utilizzato.

Si è deciso allora di spostare lo studio all’asta del Po da Carignano fino a Settimo Torinese, la quale comprende anche il torrente Sangone come affluente in sinistra. Per risolvere il problema della mancata batimetria del Sangone, si è deciso di inserire la condizione al contorno sul DTM “non pulito” così da sovrastimare i tiranti idrici e le aree allagate generate. In realtà questa sovrastima non è significativa poiché la stazione idrometrica utilizzata genera degli allagamenti in destra e sinistra orografica anche per tempi di ritorno bassi, quindi al fine di valutare l’apporto idrico che il Sangone ha sul Po, la non presenza della batimetria non crea particolari problemi riguardanti l’estensione delle aree allagate.

2. ASTA FLUVIALE DEL FIUME PO IN ESAME

2.1 Cenni sul Po

Il Po è un fiume dell'Italia settentrionale considerato il fiume più lungo (652 km), quello con bacino più esteso (71000 km²) e quello con la massima portata alla foce sia essa minima (270 m³/s), media (1540 m³/s) o massima (13 000 m³/s).

Ha origine in Piemonte, bagna direttamente tre capoluoghi (Torino, Piacenza, Cremona) e ne lambisce un quarto (Ferrara), segnando inoltre per lunghi tratti il confine tra Lombardia e Emilia-Romagna, nonché tra quest'ultima e il Veneto, prima di sfociare nel mare Adriatico in un vasto delta con sei rami. Per la maggior parte del suo corso il Po scorre su un territorio pianeggiante al quale dà il nome, la pianura Padana.

Il bacino idrografico è ampio circa 71.000 km² e copre gran parte del versante meridionale delle Alpi e quello settentrionale degli Appennini liguri e tosco-emiliano; Per quanto detto prima il regime è di tipo misto: alpino (piene tardo-primaverili/estive e secche invernali) ed appenninico (piene primaverili/autunnali e secche estive): il regime appenninico è prevalente, il quale dà origine a portate abbastanza regolari, con valori massimi in autunno (per le piogge) e in primavera (per le piogge e lo scioglimento delle nevi), le stagioni cioè nelle quali, nonostante le arginature, si sono verificate le piene più rovinose.

Il Po nasce dal versante settentrionale del Monviso da alcune sorgenti, la più nota delle quali sgorga a 2020 m s.l.m. sul Pian del Re, a circa 70 km dalla sorgente bagna Torino, dove riceve da sinistra il torrente Sangone e i fiumi Dora Riparia e Stura di Lanzo. La sua portata, che nel centro di Torino è in media di 84 m³/s con un valore massimo registrato di 2230 m³/s (piena del 4 maggio 1949) e un minimo assoluto di appena 9 m³/s (agosto 1929), aumenta sensibilmente poco più a valle dopo aver ricevuto, pure da sinistra, il torrente Orco e la Dora Baltea, che gli convoglia le acque dell'intera Valle d'Aosta. Da Moncalieri a Casale Monferrato il suo corso si sviluppa a ridosso del margine settentrionale del Monferrato, dando così inizio in modo assai vistoso all'asimmetria dei suoi versanti, dovuta al maggior apporto sedimentario dei suoi affluenti alpini rispetto a quello dei tributari appenninici.

L'elevata quantità di detriti trasportata dal Po viene per buona parte depositata nel suo stesso letto, questo ha portato ad una riduzione della pendenza costringendo ad innalzare argini per evitare le alluvioni.

A differenza di altri grandi fiumi europei, che hanno contribuito allo sviluppo demografico ed economico delle regioni circostanti, il Po ha esercitato in passato sugli insediamenti umani più un'azione repulsiva che attrattiva, tanto che ancora oggi le uniche vere città rivierasche, affacciate direttamente sulle acque del fiume, sono Torino e Casale Monferrato, mentre i centri maggiori della

Padania si disposero fin dall'età romana ai piedi dei monti, lontano dal corso d'acqua principale. Fiancheggiato in passato da fitti boschi e ampie paludi, soggetto a frequenti straripamenti e di non agevole navigabilità per la presenza di secche e per le frequenti variazioni di corso che rendevano precarie le installazioni portuali, il Po ha sempre avuto un ruolo abbastanza marginale nell'economia. D'altra parte, le acque del Po e quelle dei suoi affluenti sono largamente usate per la produzione di energia elettrica.

2.2 Descrizione del tratto in esame

Il tratto in esame si estende dalla stazione Carignano Po ubicata sul ponte della strada provinciale 122 (SP122) in Carignano fino alla strada provinciale 500 (SP500) a valle del Comune Settimo Torinese. La lunghezza complessiva dell'asta fluviale in esame è di circa 40 km, con un dislivello complessivo di circa 37m.

Nella trattazione si sono considerati anche dei tratti, relativamente estesi, degli affluenti di sinistra in corrispondenza della confluenza con il Po, in ordine: Chisola, Sangone, Dora Riparia, Stura di Lanzo.

La stazione di Carignano sottende un bacino di circa 3976 km², a questo vanno sommati gli ulteriori sottobacini degli affluenti prima citati che danno apporto in termini di portate anche significative.

In particolare si è considerata la stazione La Loggia per quanto riguarda il Chisola, ubicata sul viadotto della strada statale 20 e che sottende un bacino di 462 km²; la stazione Moncalieri Sangone per quanto riguarda il Sangone, ubicata sul Ponte di Corso Roma e che sottende un bacino di 267 km²; la stazione Torino Dora Riparia per quanto riguarda la Dora Riparia ubicata sul Ponte Washington e che sottende un bacino di 1325 km²; la stazione Torino Stura di Lanzo per quanto riguarda la Stura di Lanzo ubicata sul Ponte Ferdinando di Savoia e che sottende un bacino di 883 km².

Il tratto in esame presenta un andamento meandriforme fino alla confluenza con il torrente Chisola in Moncalieri, lungo il suo corso il fiume è ostacolato dalla Diga La Loggia, a monte della quale si diparte il canale di derivazione AEM (oggi IREN), che scorre in sponda sinistra del Po fino al punto di restituzione ubicato alla confluenza del Torrente Chisola.

A valle di Moncalieri e soprattutto nel tratto torinese si è instaurato un alveo confinato moderatamente sinuoso, questo è anche dovuto al fatto che il fiume attraversa aree fortemente urbanizzate come il Comune di Torino, San Mauro Torinese e Settimo Torinese dove si hanno delle opere di difesa e di sistemazione idraulica, le quali danno una connotazione prevalentemente artificiale al fiume. Anche in questo secondo tratto il naturale corso del fiume è ostacolato da due opere idrauliche. La prima è situata a valle della confluenza con la Stura di Lanzo dal Ponte Diga, anch'esso presenta un canale di derivazione laterale AEM, la seconda si trova a valle del comune San Mauro Torinese ed è la Diga Cimeno, da dove parte il canale di derivazione Cimena di proprietà dell'azienda ENEL. A valle della

Diga Cimeno l'asta fluviale presenta delle barre alternate e un andamento a canali intrecciati in prossimità della fine del tratto in esame. Questa morfologia è dovuta principalmente agli ostacoli presenti a monte e di conseguenza alle portate prelevate, nonché anche alla minore variazione di pendenza. Questi fattori contribuiscono infatti ad una variazione delle condizioni idrodinamiche che generano deposito dei sedimenti trasportati dalla corrente.

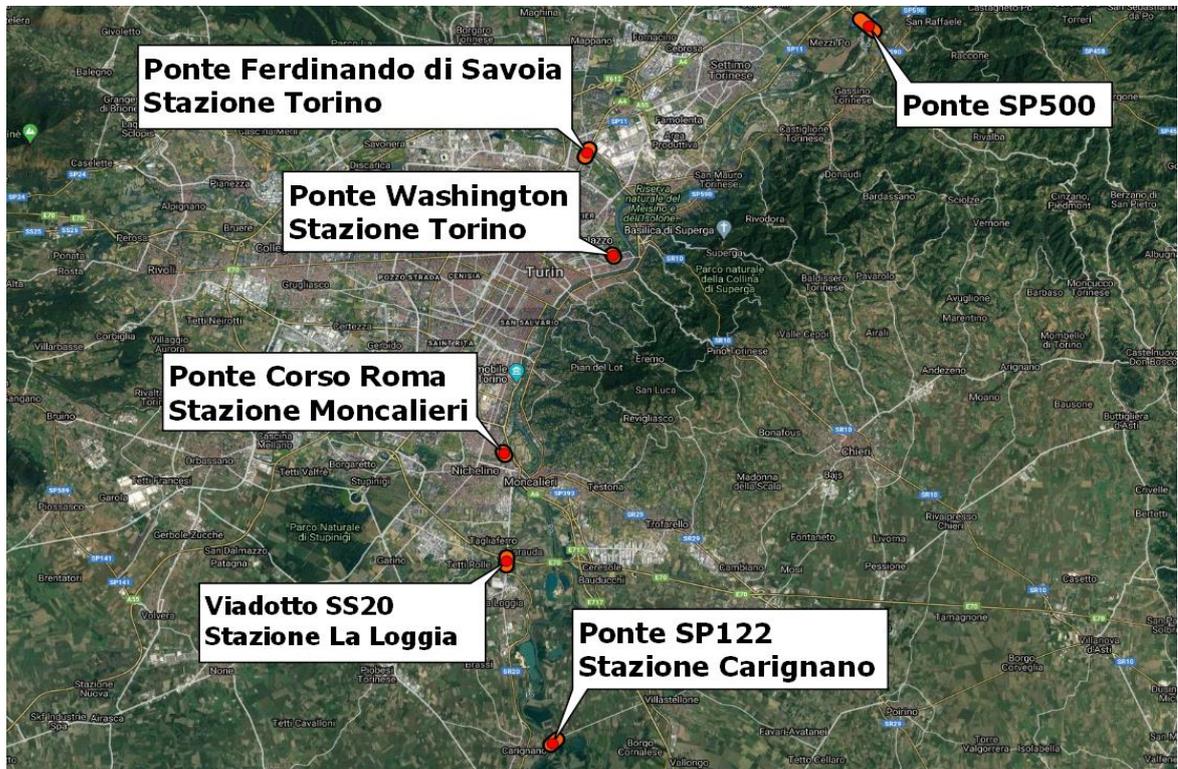


Fig. 4 – Inquadramento generale del tratto in esame

3. LA MODELLAZIONE IDRAULICA

3.1 Cenni sulla modellazione idraulica

Negli ultimi anni si è sempre più consolidato l'utilizzo della modellazione e simulazione numerica nel campo dell'idraulica fluviale per lo studio di mappature delle aree soggette a rischio alluvione, evoluzione morfologica dei corpi idrici, prevenzione alluvioni, trasporto solido, qualità delle acque e molte altre applicazioni.

Storicamente gli approcci su cui si è maggiormente concentrata l'attenzione sono stati quelli empirici, basati esclusivamente sul monitoraggio e la raccolta dati, e quelli idrodinamici che mirano a replicare il moto dei fluidi utilizzando equazioni che derivano da leggi fisiche. I modelli concettuali-semplificati si sono diffusi solamente negli ultimi anni e sfruttano le grandi moli di dati provenienti dal telerilevamento satellitare. Oggi basandosi sul piano normativo, partendo dai Piani di Bacino in Italia fino ad arrivare alla Direttiva Europea sulle Piene (Flood Directive 2007/60/CE), passando per l'importante Direttiva Europea sulle Acque (Water Framework Directive 2000/60/CE), si è assistito ad una crescente necessità di adottare un approccio sempre più di tipo deterministico e quantitativo per descrivere le dinamiche dell'idraulica fluviale, rendendo inevitabile l'utilizzo dei codici di simulazione numerica.

L'utilizzo della simulazione numerica fino a pochi anni fa aveva solamente un insieme ristretto di utilizzatori che riguardava soprattutto i soggetti istituzionali (Amministrazioni locali, Autorità di Bacino, ARPA e Consorzi irrigui e di bonifica). Negli ultimi anni la simulazione numerica si sta estendendo anche ai privati, i quali hanno a disposizione molti dati pubblici che contribuiscono alla costruzione di un robusto ed affidabile modello.

Dal supporto alla progettazione, alle analisi di rischio, dalle valutazioni di impatto ambientale alla previsione e gestione delle emergenze, i codici di simulazione numerica costituiscono quindi oggi uno strumento da cui non si può più prescindere ai fini di garantire la qualità tecnica che deve necessariamente caratterizzare ai giorni nostri le attività di studio e supporto alla progettazione nonché il rispetto dei più recenti indirizzi normativi.

I modelli numerici per l'idrodinamica costituiscono, in primo luogo, un valido strumento di supporto alla progettazione degli interventi strutturali o non strutturali finalizzati all'attenuazione del rischio idraulico gravante sul territorio. I primi consistono in opere di sistemazione attiva o passiva, che mirano a ridurre la pericolosità dell'evento, abbassando la probabilità di accadimento oppure attenuandone l'impatto (argini, vasche di laminazione, sistemazioni idraulico-forestali, consolidamento dei versanti, etc). Gli interventi non strutturali consistono in quelle azioni finalizzate alla riduzione del danno attraverso l'introduzione di vincoli che impediscano o limitino l'espansione urbanistica in aree a rischio, la pianificazione di emergenza, la realizzazione di sistemi di allertamento e di reti di monitoraggio.

Per la modellazione idraulica del deflusso nei corsi d'acqua sia naturali che artificiali si utilizzano dunque schematizzazioni diverse in funzione dei dati disponibili e del grado di accuratezza del risultato che si intende ottenere. La prima differenziazione riguarda la schematizzazione dimensionale utilizzata, in pratica si può utilizzare quella a una dimensione (monodimensionale) o a due (bidimensionale). Ai fini pratici la schematizzazione più utilizzata è sicuramente quella monodimensionale soprattutto per la semplicità che la caratterizza, essa dà in ogni caso risultati soddisfacenti quando la componente principale di moto è lungo una direzione prevalente. In questo caso le caratteristiche di moto vengono valutate su ogni singola sezione trasversale del corso d'acqua e poi viene valutata l'interferenza con le sezioni contigue. Si ricorre a modelli bidimensionali quando il moto non avviene lungo una direzione prevalente, come può essere il caso della diffusione delle acque di piena in una vasta piana alluvionale.

3.2 I software utilizzati

3.2.1 Geo Hec-Ras

GeoHECRAS è un software per lo studio delle piene alluvionali e l'analisi idraulica dei fiumi, esso va a migliorare l'interfaccia grafica del software HEC RAS del Corpo di Ingegneria dell'esercito americano. In particolare, il miglioramento principale è quello di aver introdotto una compatibilità con i software CAD e GIS. Infatti, è possibile definire sommità arginali (bank station), lunghezze di flusso, sezioni di flusso inefficaci, ostacoli al convogliamento, argini e altri dati di modellazione fluviale da dati CAD e GIS ed è possibile assegnare i coefficienti di scabrezza Manning mediante l'elaborazione immagine di poligoni GIS o di ortografie. Il software è in grado di generare sezioni trasversali direttamente da modelli digitali del terreno e viceversa, questo risulta molto utile nell'inserire la batimetria dei canali.

Un altro aspetto importante è la possibilità di annullare e ripetere in modo illimitato le operazioni effettuate, questo riduce i tempi di correzione degli errori, inoltre si ha la possibilità di aprire più modelli contemporaneamente e di copiare e trasferire dati da un modello all'altro. L'interfaccia grafica semplificata permette la creazione e la modifica di sezioni trasversali, intersezioni stradali di ponti e gallerie di drenaggio, sezioni di flusso inefficaci e altri elementi del modello.

È possibile passare senza problemi da prospettive di vista 2D a 3D e viceversa per una più facile identificazione dei problemi di modellazione e per apportare modifiche. Utilizzando le funzioni di rotazione, pan, zoom e di simulazione di volo all'interno del modello in qualsiasi prospettiva è possibile revisionare sezioni trasversali, strutture di ponti, gallerie di drenaggio, argini, sezioni di flusso inefficaci e altro.

Nel presente lavoro si sono utilizzate delle modellazioni di tipo 2D in moto vario e 1D in moto stazionario.

I modelli bidimensionali possono essere suddivisi in due sottogruppi distinti: i modelli completi e quelli semplificati. I primi risolvono le equazioni bidimensionali del moto vario in forma completa, mentre i secondi introducono alcune semplificazioni.

Geo HEC-RAS 2D consente l'uso di entrambi gli approcci in quanto risolve sia le equazioni di diffusione dell'onda 2D (Diffusion Wave), più veloce e stabile dal punto di vista computazionale, che quelle complete di De Saint Venant per le acque basse (Full Momentum).

Il metodo "diffusion wave" è quello di default, poiché è quello più veloce e con maggiore stabilità.

La maggior parte delle situazioni di modellazione 2D, come la modellazione di inondazioni, può essere accuratamente modellata utilizzando questo risolutore, in cui le forze inerziali tendono a dominare sulle forze di attrito e sulle altre forze.

Il metodo di calcolo 2D Full Momentum, spesso indicato come equazioni di Saint Venant per il flusso superficiale, tiene conto delle turbolenze e degli effetti di Coriolis, rendendolo applicabile a un insieme più ampio di condizioni. Tuttavia, la risoluzione delle equazioni di flusso 2D di Saint Venant richiede una maggiore potenza computazionale e quindi risultati in tempi di esecuzione più lunghi. Inoltre, le equazioni di flusso 2D Saint Venant possono diventare numericamente instabili nelle regioni della mesh 2D in cui il profilo della superficie dell'acqua o la direzione del flusso cambiano rapidamente. Per evitare un modello instabile, sarà necessario utilizzare una mesh più fine e un corrispondente passo temporale più piccolo.

L'algoritmo di soluzione per entrambi i metodi è di tipo implicito ai volumi finiti, questo vuol dire che le celle della mesh 2D considerano il terreno sottostante e generano delle curve riferite a proprietà geometriche e idrauliche: Curva Altezze idriche e volumi invasati e Altezze idriche rispetto all'area di flusso per ciascuna delle facce delle celle.

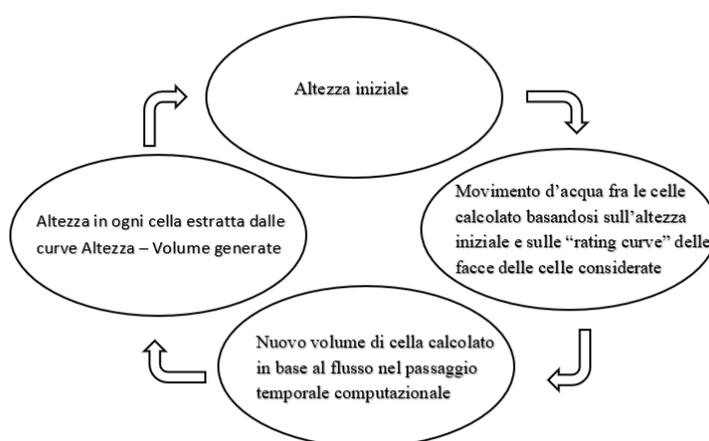


Fig. 5 - schema semplificato algoritmo di soluzione numerica

Questo algoritmo computazionale è molto robusto e consente alle celle 2D di bagnarsi e asciugarsi. Le aree di flusso 2D possono iniziare completamente a secco e possono gestire un'improvvisa ondata d'acqua al loro interno ed inoltre, si possono gestire regimi di flusso che cambiano nel tempo:

- Flusso subcritico
- Flusso supercritico
- Flusso misto (contiene flusso subcritico e supercritico, inclusi i salti idraulici in movimento)

Le celle degli elementi dell'area di flusso non hanno un fondo piatto o una singola profondità, Pertanto, una cella può essere parzialmente bagnata e, allo stesso modo, ciascuna delle facce delle celle viene trattata come una sezione trasversale in cui vengono calcolate tabelle dettagliate delle proprietà idrauliche per altezze idriche rispetto all'area del flusso, il perimetro bagnato, la rugosità, ecc. Ciò consente di utilizzare celle 2D più grandi nei calcoli del flusso senza perdere troppi dettagli del terreno sottostante che regolano il movimento del flusso e guadagnando in termini di oneri computazionali.

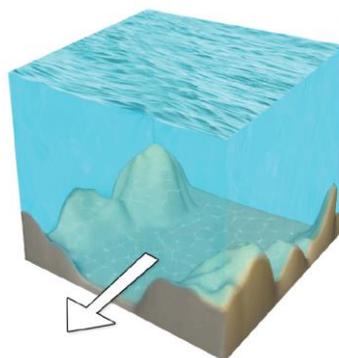


Fig. 6 – Schematizzazione elemento di calcolo

3.2.2 Delft 3D

Delft 3D è un software diventato open source dal gennaio 2011, questo è utilizzato principalmente per studiare Idrodinamica, trasporto solido, qualità dell'acqua, ambienti estuari e costieri.

Il software viene continuamente migliorato e sviluppato con tecniche di modellazione innovative ed è stato utilizzato ed ha dimostrato le sue capacità in molti luoghi in tutto il mondo, come Paesi Bassi, Stati Uniti, Hong Kong, Singapore, Australia, Venezia, ecc;

Il modulo FLOW, cioè il modulo inerente alla modellazione idraulica, è il cuore del software DELFT3D e consente di calcolare i fenomeni di flusso e trasporto non stazionari derivanti dalle forzature indotte dalle maree e meteorologiche su una griglia curvilinea flessibile.

Essendo un software open source, le implementazioni GIS sono limitate, così come risulta molto più complicato costruire un modello idraulico rispetto al software Geo-Hec-Ras, sia perché i formati che il software legge non sono comuni, per cui occorre effettuare una conversione per ogni elemento

esterno da inserire, sia perché non si ha la possibilità di controllare visivamente eventuali ostacoli o opere idrauliche inserite.

Il software risolve le equazioni “shallow-water”, le quali esprimono la conservazione della massa e della quantità di moto.

All'interno di queste equazioni DELFT3D, oltre a considerare la chiusura dovuta al fondo alveo, considera anche la chiusura dovuta all'azione del vento, e come nel caso di Geo-Hec-Ras risolve le equazioni una volta definite le condizioni al contorno. Ulteriori approfondimenti si possono trovare nel manuale di riferimento tecnico del software (Capitolo 6).

L'algoritmo utilizzato per la risoluzione implementa un risolutore di volumi finiti su una griglia sfalsata.

L'equazione di continuità è risolta in maniera implicita per tutti i punti, mentre l'integrazione temporale viene fatta in modo esplicito per il termine di avvezione, e la risultante limitazione temporale dinamica viene impostata automaticamente in base al criterio Courant. In fluidodinamica numerica, il criterio di Courant è una condizione necessaria per la convergenza numerica della soluzione di alcune equazioni alle derivate parziali. Questa condizione è sfruttata nell'impiego di schemi numerici espliciti temporali. Come conseguenza, il passo temporale deve essere più piccolo di un certo intervallo di tempo, altrimenti la simulazione produrrà risultati ampiamente scorretti.

Le possibili problematiche prestazioni possono derivare da questo approccio che può spesso essere migliorato dalla raffinazione della griglia di calcolo nei punti giusti.

Lo schema utilizzato (advection scheme) è adatto sia per flussi subcritici che critici e consente di riprodurre adeguatamente la velocità di propagazione della corrente.

Per capire meglio quanto detto sopra è bene inizialmente fare una differenza fra algoritmo di integrazione implicita ed esplicita:

- Nell'algoritmo di calcolo “implicito” si utilizza un metodo di calcolo step by step in cui un opportuno criterio di convergenza permette di proseguire o meno l'analisi, eventualmente riducendo l'incremento di tempo, a seconda dell'accuratezza dei risultati al termine di ogni step.
- Nell'algoritmo di calcolo “esplicito” non si presentano invece eventuali problemi di non convergenza ad una soluzione finita, dato che in questo caso l'analisi “non è condizionata da un criterio di convergenza” e l'incremento di tempo viene definito all'inizio dell'analisi e rimane costante durante il calcolo.

4. EQUAZIONI UTILIZZATE NELLA MODELLAZIONE IDRAULICA

4.1 Modellazione monodimensionale 1D

Il modello monodimensionale è lo schema numerico più semplice, prevede la definizione dell'asta fluviale mediante sezioni trasversali in corrispondenza delle quali sono calcolate tutte le grandezze idrauliche, mediate sia nella direzione verticale sia in quella trasversale alla corrente che, conseguentemente alle semplificazioni adottate, avviene lungo un'unica direzione. Lo schema risulta adeguato ed affidabile solamente nel caso in cui il deflusso sia prevalentemente unidirezionale, in quanto le equazioni in gioco non consentono la descrizione del deflusso tra l'alveo attivo e le zone golenali, né la distribuzione dei deflussi in una rete ramificata di canali di flusso. Il ridotto onere computazionale dato dai limitati punti di calcolo, la possibilità di descrivere la geometria delle opere presenti lungo i corsi d'acqua e la possibilità di collegarlo con altre tipologie di modelli lo rendono molto utilizzato.

4.1.1 Moto stazionario

Si riportano in seguito le equazioni utilizzate per la risoluzione del moto in condizioni stazionarie. Ulteriori approfondimenti sono riportati nel manuale del software HEC-RAS. Il software determina il profilo di corrente risolvendo l'equazione dell'energia, mediante un processo iterativo chiamato standard step. Indicando con 1 la sezione di monte e 2 la sezione di valle, questa equazione può essere scritta nella seguente forma:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1}{2g} + h_e$$

Con:

- Y_i tiranti idrici
- Z_i quote di fondo
- α_i coefficienti di ragguaglio delle altezze cinetiche
- V_i velocità
- g accelerazione di gravità
- h_e perdita di carico totale nel tratto

Le perdite di carico comprese fra due sezioni sono scorporabili in due contributi principali, uno dovuto alle perdite distribuite lungo il tratto dovuto all'attrito, l'altro relativo alle contrazioni ed espansioni della vena liquida.

$$h_e = L \cdot \bar{S}_f + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot V_2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1}{2g} \right|$$

Con:

- L lunghezza del tratto mediata sulle portate
- \bar{S}_f cadente della linea dei carichi totali
- C coefficiente di contrazione ed espansione

HEC-RAS in particolare suddivide le sezioni di calcolo in tre aree distinte, quella centrale interessata dall'alveo principale e due laterali che rappresentano le aree inondabili; tra due sezioni consecutive devono quindi essere riportate tre distanze, una per ogni porzione di interesse, in questo modo è possibile considerare l'andamento curvilineo dell'asse fluviale. Per il calcolo è necessario un solo valore di distanza ottenuta come media pesata sulle portate di competenza delle tre aree definite.

$$L = \frac{L_{lob} \cdot Q_{lob} + L_{ch} \cdot Q_{ch} + L_{rob} \cdot Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}}$$

L_i lunghezze del tratto relative alla zona inondabile di sinistra ($i = lob$), al canale principale ($i = ch$) e alla zona inondabile di destra ($i = rob$) Q_i portate medie relative interessate dalla zona inondabile di sinistra, dal canale centrale e dalla zona inondabile di destra.

La determinazione delle altezze cinetiche e della conducibilità idraulica richiede la suddivisione del flusso in porzioni all'interno delle quali si possa considerare la velocità uniformemente distribuita. L'approccio di default utilizzato da HEC-RAS consiste nel discretizzare le sezioni rispetto al valore della scabrezza in quanto per il calcolo della conducibilità idraulica (conveyance) utilizza la formula di Manning:

$$Q = K \cdot \sqrt{S_f} \quad \text{dove } K = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}}$$

Con

- K conducibilità idraulica (m^3/s)
- n coefficiente di scabrezza di Manning ($m^{-1/3}/s$)
- A area di flusso (m^2)
- R raggio idraulico (m)

Tutte le grandezze sono riferite alla singola porzione di flusso. I valori parziali relativi alle zone inondabili sono quindi sommati per ottenere i due soli valori associati alle aree laterali. Il canale centrale viene solitamente trattato come un unico elemento, dotato quindi di un solo valore di conducibilità idraulica. Come intuibile, il valore finale è dato dalla somma dei tre contributi appena descritti. Poiché il modello è monodimensionale, ad ogni sezione corrisponderà un solo valore di superficie libera, e di conseguenza una sola altezza cinetica.

L'equazione dell'energia normalmente utilizzata per la risoluzione del problema non è valida nel caso in cui vi sia il passaggio da un regime di moto all'altro, ovvero quando si verifica il passaggio

attraverso l'altezza critica. Questi casi che possono verificarsi in presenza di confluenze, restrizioni della sezione idrica o variazioni brusche di pendenza vengono affrontate facendo ricorso all'equazione dei momenti riportata di seguito:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q \cdot \rho \cdot \Delta V_x$$

Con

- $P_{1,2}$ spinta idrostatica in corrispondenza delle sezioni 1 e 2
- W_x componente della forza peso nella direzione del moto
- F_f forza resistente dovuta all'attrito
- Q portata
- ρ densità dell'acqua
- ΔV_x variazione di velocità fra le sezioni 1 e 2 nella direzione del moto.

Esplicando i vari termini si ottiene la forma funzionale dell'equazione dei momenti utilizzata dal programma:

$$\frac{\beta_2 \cdot Q_2^2}{gA_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot L \cdot \bar{S}_0 - \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot L \cdot \bar{S}_f = \frac{\beta_1 \cdot Q_1^2}{gA_1} + A_1 \bar{Y}_1$$

Dove:

- $A_{1,2}$ = area bagnata relativa alle sezioni 1 e 2
- L = distanza fra le sezioni 1 e 2 misurate lungo la direzione x
- $\beta_{1,2}$ = coefficiente di ragguglio che tiene conto delle variazioni nella distribuzione della velocità in canali irregolari (permette di modellare il problema in termini di valori medi V)
- \bar{S}_0 = pendenza del canale
- \bar{S}_f = cadente della linea dei carichi totali
- \bar{Y}_i tiranti idrici

4.1.2 Moto Vario

I modelli monodimensionali risolvono equazioni alle derivate parziali generalmente assicurando la conservazione della massa e della quantità di moto nell'intervallo compreso fra due sezioni consecutive.

Conservazione della massa:

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

Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

Dove Q è la portata, $Q = uA$ definibile come prodotto della velocità mediata lungo la sezione, e la sezione interessata dal deflusso idrico; t rappresenta il tempo; h il tirante idrico, g l'accelerazione gravitazionale, S_f la cadente della linea dei carichi totali e S_0 la pendenza del letto del canale.

Queste equazioni sono conosciute come equazioni 1D di De Saint-Venant.

Al fine di derivare tali equazioni è necessario adottare le seguenti ipotesi:

- Distribuzione della pressione idrostatica (teoricamente valida solo quando le linee di flusso non presentano curvature accentuate)
- Alveo poco pendente, così che la sezione trasversale si confonde con quella verticale
- Alveo prismatico, ovvero non vengono considerate le variazioni di sezione e pendenza fra due sezioni trasversali
- Utilizzo dell'equazione di Manning per la definizione delle perdite di carico, la quale è rigorosamente valida solo in caso di moto uniforme
- Velocità e accelerazioni verticali trascurabili rispetto alle stesse grandezze nella direzione del moto
- Incompressibilità del fluido.

Possono essere ricavate mediando lungo la direzione verticale e trasversale le equazioni del moto scritte in forma più generale. Come ben noto le equazioni non presentano una soluzione analitica, ma possono essere risolte numericamente, ottenendo i valori di portata e tirante per ciascuna delle sezioni di calcolo ad ogni passo temporale.

Le equazioni utilizzate dal software sono le medesime riportate in precedenza, riscritte con l'aggiunta del contributo dato dal deflusso laterale.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A_t}{\partial t} - q_1 = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

Dove

A_t è l'area bagnata, q_1 è il flusso laterale per unità di lunghezza, $\frac{\partial z}{\partial x}$ è la pendenza del fondo, S_f la pendenza piezometrica esprimibile tramite la formula di Manning:

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{2.208R^{\frac{4}{3}}A^2}$$

Dove

- n è il coefficiente di scabrezza di Manning
- R il raggio idraulico.
- A = area bagnata

Le equazioni sono valide nel caso in cui vi sia un solo canale. La presenza di aree esondabili laterali viene gestita come se fosse presente un ulteriore canale laterale mediante la definizione di equazioni di continuità e conservazione della quantità di moto.

4.2 Modellazione bidimensionale 2D

Lo schema 2D consente la simulazione dettagliata del deflusso nelle due direzioni piane partendo da una rappresentazione bidimensionale della morfologia dell'alveo e delle aree golenali limitrofe, definita tipicamente con un modello digitale del terreno (DTM). Determina in ogni punto del dominio di calcolo livello idrico, velocità e direzione della corrente.

Nel corso degli ultimi anni la modellistica bidimensionale è stata oggetto di importanti sviluppi principalmente dovuti all'aumento di precisione e risoluzione degli elementi topografici, basti pensare ai rilevamenti LIDAR, all'utilizzo di elementi GIS combinati con la modellazione, alle tecniche innovative di discretizzazione spaziale (Mesh), si è passati da una modellazione con maglia di calcolo strutturata non flessibile ad una maglia di calcolo non struttura e flessibile, e dall'orientamento sempre più mirato verso le soluzioni a volumi finiti più che ad elementi finiti.

Per quanto esposto in precedenza i modelli bidimensionali oggi consentono di utilizzare un maggior dettaglio laddove necessario, riducendo la dimensione delle celle di calcolo e di impostare una risoluzione grossolana nelle aree che sono meno interessate dal deflusso o dai fenomeni di esondazione. Nonostante questo, una modellazione bidimensionale richiede necessariamente tempi computazionali più lunghi rispetto ai modelli 1D, in funzione del numero di celle e della discretizzazione temporale richiesta per lo studio.

Lo sviluppo tecnico-scientifico degli ultimi anni ha portato ad una progressiva migrazione verso questo approccio che si dimostra meno oneroso in fase di generazione del modello e più affidabile nel caso di direzioni di deflusso complesse come la rappresentazione del deflusso in ambito urbano.

4.2.1 Moto Vario

Le equazioni del modello rappresentano il flusso idrico mediante un campo bidimensionale, la terza dimensione è considerata bassa rispetto alle altre due. Sono conosciute come equazioni 2D di De Saint Venant, dette anche Shallow Water Equations, ottenibili mediando le equazioni del moto più complete di Navier Stokes rispetto alla direzione verticale e imponendo la conservazione della quantità di moto e massa all'interno di un volume di controllo.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = Q_{in} - Q_{out}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}\right) = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - c_f u + f v$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - c_f v + f u$$

La prima equazione rappresenta la conservazione della massa, ovvero il bilancio fra la portata in ingresso e uscita con la variazione di volume dove:

- H è il livello idrico una volta fissata una quota z di riferimento;
- $\frac{\partial H}{\partial t}$ la variazione del livello idrico nel volume di controllo;
- $\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y}$ la variazione spaziale della portata in ingresso e uscita, con u e v i vettori velocità nelle due direzioni principali x e y .
- Q_{in} e Q_{out} determinano le portate localizzate in ingresso e uscita.

Le altre due equazioni esprimono la conservazione della quantità di moto dove:

- $\frac{\partial u}{\partial t}$ accelerazione locale
- $(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y})$ accelerazione convettiva
- $g \frac{\partial H}{\partial x}$ gradiente della pressione idrostatica
- $\nu_t (\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2})$ termini legati alla viscosità
- $c_f u$ resistenza dell'alveo
- $f v$ parametro di Coriolis.

Le equazioni riportate sono applicate ad ogni cella della maglia di calcolo determinata mediante metodi numerici alle differenze o volumi finiti.

La complessità della trattazione ha comportato l'adozione di una serie di semplificazioni quali l'esclusione dei termini inerziali relativi alle accelerazioni locali e convettive prese in considerazione dall'equazione di De Saint Venant. Il risultato di questa operazione è il modello diffusivo, che riduce l'onere computazionale e aumenta la stabilità della soluzione.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = Q_{in} - Q_{out}$$

$$g \frac{\partial H}{\partial x} = c_f u$$

$$g \frac{\partial H}{\partial y} = c_f v$$

5. COSTRUZIONE MODELLI IDRAULICI

5.1 Geo Hec-Ras Modello 2D

La costruzione del modello sul software Geo Hec Ras può essere schematizzata nei seguenti passaggi:

- Raccolta dei dati (Modello digitale del Terreno, batimetria del canale, land cover, opere idrauliche ed elementi che ostacolano il normale corso dell'asta fluviale, elementi che ostacolano la propagazione delle inondazioni laterali, arginature, rilevati, Edifici ecc.)
- Interpolazione delle sezioni batimetriche lungo il canale
- Scelta della discretizzazione spaziale (Mesh)
- Assegnazione delle cosiddette breaklines
- Assegnazione di Edifici, opere idrauliche e Pile dei ponti
- Definizione spaziale della Copertura del suolo (Land Cover)
- Definizione delle condizioni al contorno (Boundary Condition)

Visualizziamo in dettaglio le procedure e le scelte effettuate in relazione alla tipologia del problema oggetto della presente tesi.

5.1.1 Raccolta dei dati

La raccolta dati è stata agevolata dalla collaborazione che il Politecnico di Torino ha con l'autorità distrettuale di bacino del fiume Po (AdbPo), la quale ha consentito agli studenti il libero accesso al database contenente informazioni sul fiume Po e suoi affluenti. I dati principalmente usati sono stati i seguenti:

- modello digitale del terreno (DTM) riferito agli anni 2004 – 2005 avente una maglia di due metri, rilevamento più recente del tratto in esame (fonte AdbPo)
- un modello quasi bidimensionale da dove si è estratta la batimetria del Canale mediante interpolazione delle sezioni batimetriche presenti, la geometria e le caratteristiche idrauliche di ponti, traverse e dighe presenti lungo il tratto in esame, ed infine i coefficienti di scabrezza dell'alveo. (fonte AdbPo)

Si sono confrontate principalmente le sezioni presenti nel modello fornito con quelle del geoportale AIPO (Agenzia interregionale per il fiume Po) e si sono inglobate le sezioni mancanti.

Per quanto riguarda la copertura del suolo, si sono utilizzati i file OPENDATA riferiti al progetto CORINE land cover presenti sul sito Copernicus, quest'ultimo è un sistema europeo per il monitoraggio della Terra. I dati vengono raccolti da diverse fonti, tra cui satelliti per l'osservazione della Terra e sensori in situ. I dati vengono elaborati e forniscono informazioni affidabili e aggiornate in sei aree tematiche: terra, marina, atmosfera, cambiamenti climatici, gestione delle emergenze e sicurezza.

L'inserimento di ostacoli laterali quali rilevati, arginature ed edifici, sono stati ricavati dalla Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti (BDTRE – Geoportale Piemonte) che è la base dati geografica del territorio piemontese promossa dalla Regione Piemonte, con i contenuti propri di una cartografia tecnica, strutturata secondo le "Regole tecniche per la definizione delle specifiche di contenuto dei database geotopografici" nazionale e in primo luogo finalizzata a supportare le attività di pianificazione, governo e tutela del territorio.

La BDTRE assume quindi il ruolo di "contenitore" condiviso di tutti i dati geografici, da cui deriva la base cartografica di riferimento regionale.

Per consentirne la sua piena fruizione ai molteplici soggetti interessati, dagli Enti della PA Piemontese, ai professionisti, agli enti universitari e di ricerca e ai cittadini, la Regione Piemonte rende disponibile la BDTRE in modalità open.

Un altro ruolo importante, ma non fondamentale, ha avuto anche il SICOD, Catasto opere di difesa dove è possibile trovare informazioni messe a disposizione dal servizio riguardanti le opere di difesa idrauliche e di versante censite sul territorio regionale, rilevate in sito e sottoposte a procedure di validazione.

Purtroppo, gli elementi presenti all'interno di questo database sono obsoleti per cui occorre verificare che le opere siano ancora effettivamente presenti nel territorio, un confronto speditivo può essere eseguito utilizzando Google Heart, caricando, ad esempio, i file in formato shape forniti dal SICOD direttamente sul software.

5.1.2 Interpolazione delle sezioni batimetriche lungo l'asta fluviale

Come è ben noto oggi si utilizza la tecnologia LIDAR per la restituzione di rilievi topografici ad alta risoluzione. Il LIDAR è un sensore Laser, che rileva la distanza relativa tra il target e il sensore, in abbinamento con una piattaforma IMU (GPS+INS) che permette la georeferenziazione 3D dei suddetti punti. Scansionando la superficie, viene creata una nuvola di punti che discriminano i punti relativi al terreno (DTM) e quelli relativi agli "oggetti" presenti sul terreno (DSM). Misurando la coltre vegetativa, penetrando fino al suolo, si ottengono informazioni sul terreno e sulle quote, con un'accuratezza centimetrica. I prodotti ottenuti dai rilievi LIDAR forniscono le informazioni fondamentali per rappresentare puntualmente la morfologia delle aree di pericolosità idrogeologica. Costituiscono quindi un supporto basilare per le attività di modellazione idraulica, per la perimetrazione delle aree di potenziale esondazione dei principali corsi d'acqua, e per la modellazione idrologica e di individuazione delle aree maggiormente esposte a pericolo in caso di eventi alluvionali. Il problema dei rilievi LIDAR nella modellazione idraulica è che l'acqua viene attraversata parzialmente dal laser per cui la restituzione del DTM lungo le aste fluviali presenta le quote dello specchio liquido. Per risolvere questo problema si è pensato di generare un modello digitale della batimetria del canale sfruttando le sezioni piane come punto di partenza. (Modello quasi 2D fornito dall'AdbPo e Sezioni AIPO presenti sul Geoportale AIPO).

Usando il software Geo Hec Ras la procedura risulta abbastanza semplice, infatti esso consente di importare file di tipo CSV, cioè ogni riga della tabella (o record della base dati) è normalmente rappresentata da una linea di testo, che a sua volta è divisa in campi (le singole colonne) separati da un apposito carattere separatore, ciascuno dei quali rappresenta un valore, impostando il sistema di riferimento corretto si genera una disposizione spaziale delle sezioni batimetriche.

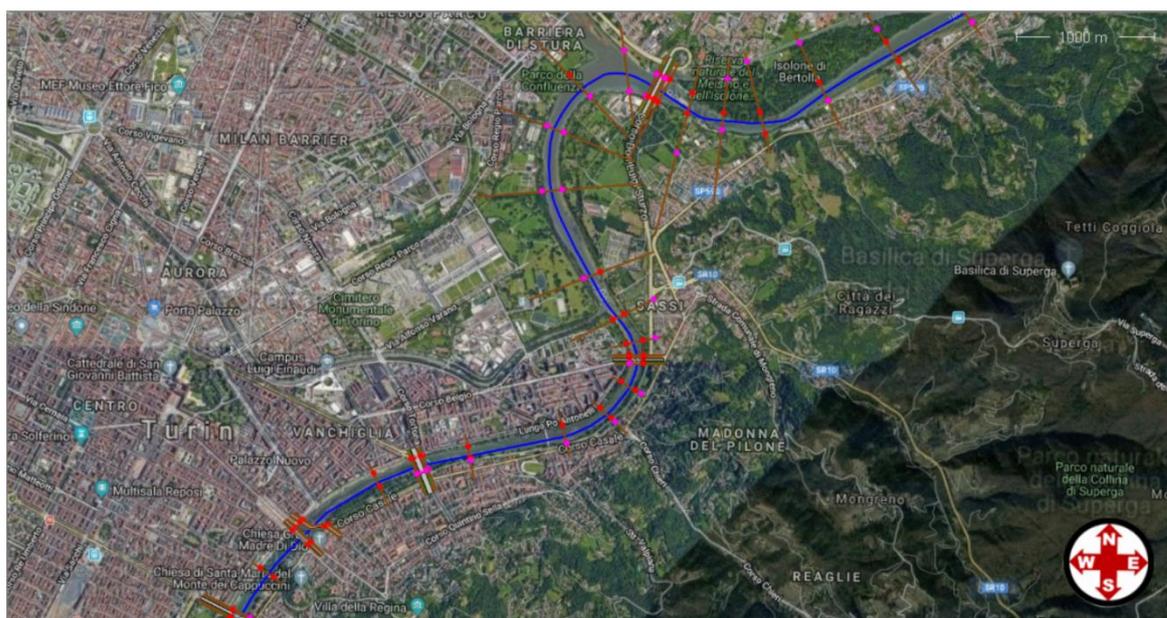


Fig. 7 – Stralcio sezioni batimetriche

Ogni sezione contiene un certo numero di coppie di punti che definiscono la geometria. Il software consente dapprima di interpolare le sezioni così da ridurre la distanza fra le stesse e successivamente consente di generare una superficie continua, la quale rappresenta con una grossa approssimazione la batimetria del canale.



Fig. 8 – Stralcio DTM batimetria

A questo punto per ottenere un DTM “pulito”, basta semplicemente mergere il DTM iniziale con la batimetria ottenuta, avendo l’accortezza di considerare dunque le quote batimetriche lungo l’asta fluviale e non quelle dello specchio liquido.



Fig. 9 - Stralcio DTM interpolato con la batimetria

5.1.3 Scelta della discretizzazione spaziale (Mesh)

I tipi di discretizzazione spaziale supportate dal software sono:

- Uniform Mesh
- Hexagonal Mesh
- Adaptive mesh

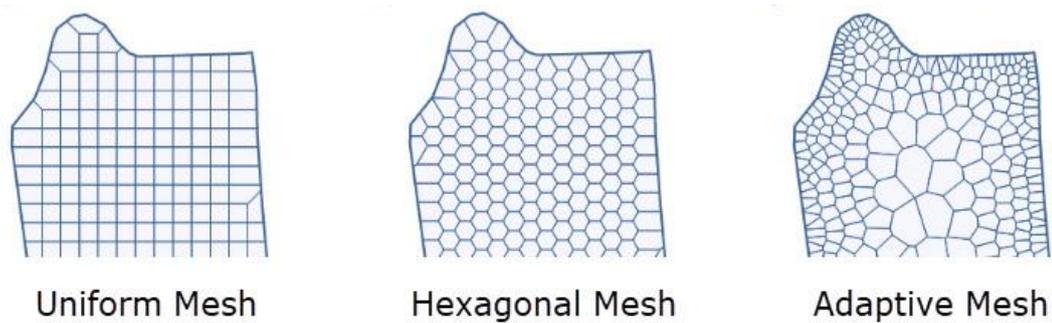


Fig. 10 - Tipologie di Mesh

Ognuna di queste ha i suoi vantaggi e svantaggi, si rimanda al manuale del Software per ulteriori approfondimenti. Nel caso in esame, eseguite alcune prove con queste differenti tipologie, si è deciso di utilizzare una Uniform Mesh perché, sebbene abbia bisogno di più onere computazionale, risulta molto stabile e si riesce ad avere una mappatura del territorio in cui vengono perse pochissime informazioni.

GeoHECRAS semplifica il processo di definizione degli elementi mesh creando sempre elementi di forma quadrata. Dove vengono definite le linee di discontinuità (breaklines), il motore di mesh HEC-RAS perfeziona la mesh nell'intorno utilizzando elementi mesh irregolari in modo che le facce delle celle della mesh si allineino con le linee di discontinuità.

Occorre controllare con attenzione la mesh generata perché è uno degli elementi principali che contribuisce al buon funzionamento del modello, per cui bisogna evitare angoli acuti quando si definiscono i confini della mesh e si definiscono linee di discontinuità e altri elementi.

Se esistono bordi frastagliati per un limite o una linea di discontinuità della mesh 2D, saranno necessarie modifiche significative. In genere questi problemi vengono risolti spostando i confini della mesh oppure modificando le breaklines anziché spostare le celle.

5.1.4 Assegnazione delle breaklines

Le linee di discontinuità vengono utilizzate per definire interruzioni improvvise della superficie del terreno e dove si verificheranno interruzioni nel flusso dell'acqua superficiale.

Esse in genere si inseriscono dove si ha:

- Variazione improvvisa di batimetria: Talweg (linea che unisce tutti i punti più bassi lungo un corso d'acqua) e Overbanks (linea che separa il canale con le aree golenali adiacenti)
- Ostacolo al flusso: Argini e terrapieni stradali
- Direzione di deflusso: Impluvi e Displuvi
- Perfezionamento delle dimensioni delle celle, dove per esempio si verificano molti cambiamenti in una piccola area



Fig. 11 – Stralcio Modello – Breaklines segnate in nero

Quando si definisce una linea di discontinuità, l'utente può specificare la dimensione della cella (o la spaziatura delle celle) lungo la linea per perfezionare la mesh 2D in cui è necessario acquisire dettagli aggiuntivi.

La creazione di una mesh 2D è spesso un processo iterativo, in cui il modellatore modifica la mesh 2D per rappresentare le caratteristiche di flusso 2D per la regione da modellare aggiungendo o modificando le breaklines.

Dopo aver eseguito una simulazione iniziale, dovrebbe essere chiaro dove sono presenti punti problematici significativi ed è importante dunque prestare attenzione a perfezionare la mesh 2D per garantire una modellazione accurata del modo in cui il flusso viaggia.

Una volta inserite le breaklines le facce della mesh vengono allineate a queste in modo tale da impedire il passaggio del flusso il quale è consentito solamente quando è abbastanza elevato da sovrastare l'ostacolo rappresentato dalla breakline stessa come dettato dalla topografia circostante.

Il software consente l'assegnazione delle breaklines utilizzando come supporto dei file shape. È bene dire che questa automatizzazione velocizza il processo di modellazione ma aumenta l'onere computazionale qualora le breaklines inserite fossero in gran numero. A tal proposito si è eseguita una semplificazione dei file a disposizione (BDTRE e SICOD) considerando solamente le breaklines fondamentali ed eliminando quelle secondarie, nonché aggiungendo breaklines manualmente nelle zone in cui si è ritenuto necessario. La scelta di quali breaklines tenere in considerazione e quali breaklines aggiungere è stata dettata dal controllo del comportamento del flusso dopo le simulazioni iniziali.

5.1.5 Assegnazione di edifici, opere idrauliche e pile di ponti

Gli ostacoli al trasporto vengono assegnati alla mesh 2D per tenere conto delle regioni bloccate in modo permanente dal flusso di trasporto. Gli ostacoli al trasporto, come edifici e altre strutture, riducono l'area di flusso e aggiungono un ulteriore perimetro bagnato quando in una zona si hanno ostruzioni.

Il software consente l'aggiunta di questi ostacoli utilizzando dei poligoni a cui si può assegnare una determinata elevazione. Si sono utilizzate le sagome degli edifici presenti nel BDTRE come file di tipo shape e si è deciso di assegnare un'elevazione costante di 12 metri per non appesantire ulteriormente il modello e perché oltretutto le altezze d'acqua che lambiscono gli edifici nei centri urbani di certo saranno inferiori ai dodici metri.

Una volta inserite le ostruzioni è necessario ridefinire la mesh nell'intorno delle ostruzioni stesse per cui occorre effettuare un "Update" della mesh.



Fig. 12 – Stralcio Modello – Edifici segnati in Giallo

Quando si lavora con ponti con geometria complessa, la modellazione dell'idraulica in 2D offre una comprensione più chiara e una rappresentazione più accurata del comportamento del flusso in prossimità del ponte. L'acqua può fluire attraverso più percorsi e direzioni al di sotto del deck del ponte. Un modello HEC-RAS 1D supporrà che l'elevazione della superficie dell'acqua sia costante attraverso le aperture delle campate del ponte, mentre un modello 2D HEC-RAS mostrerà che l'elevazione della superficie dell'acqua varia mentre il flusso si fa strada attraverso il ponte. Inoltre, un modello 1D assume una velocità media all'apertura del ponte, mentre un modello 2D rappresenterà accuratamente il campo di velocità in prossimità del ponte.

Esistono altri svantaggi nell'utilizzo di un modello HEC-RAS 1D per l'analisi dei ponti:

- Aree di flusso inefficaci per contrassegnare le aree di non trasporto
- Perdite di energia da curve di canale
- Perdite di energia dovute ai vortici sui ponti inclinati

Ma esistono anche dei vantaggi, come quella di valutare il livello idrico al di sotto del “deck”, questo non è possibile nei modelli 2D perché i software consentono solamente l'assegnazione delle pile e non tengono in considerazione il deck.

Nonostante ciò, esistono molte situazioni di modellazione dei ponti gestite in modo efficace con un modello 2D, ma ciò sarebbe problematico con un modello 1D. Ad esempio, la modellazione di ponti obliqui può causare ulteriori perdite di energia e aumenti di elevazione della superficie dell'acqua, condizioni che non sarebbero evidenti quando si utilizza un modello 1D.

GeoHECRAS consente il posizionamento delle pile dei ponti direttamente nella mesh dell'area di flusso 2D. È possibile scegliere fra le seguenti forme di pile:

- Pile circolari
- Pile rettangolari a fronte arrotondato
- Pile rettangolari a fronte appuntito
- Pile rettangolari a fronte quadrato
- Pile quadrate

Una volta definito il pilone del ponte, è possibile spostare e ruotare interattivamente le pile per posizzarli nella posizione corretta utilizzando anche delle immagini satellitari come background. Quindi, il software aggiorna la mesh 2D per incorporare le pile del ponte nella geometria della mesh.

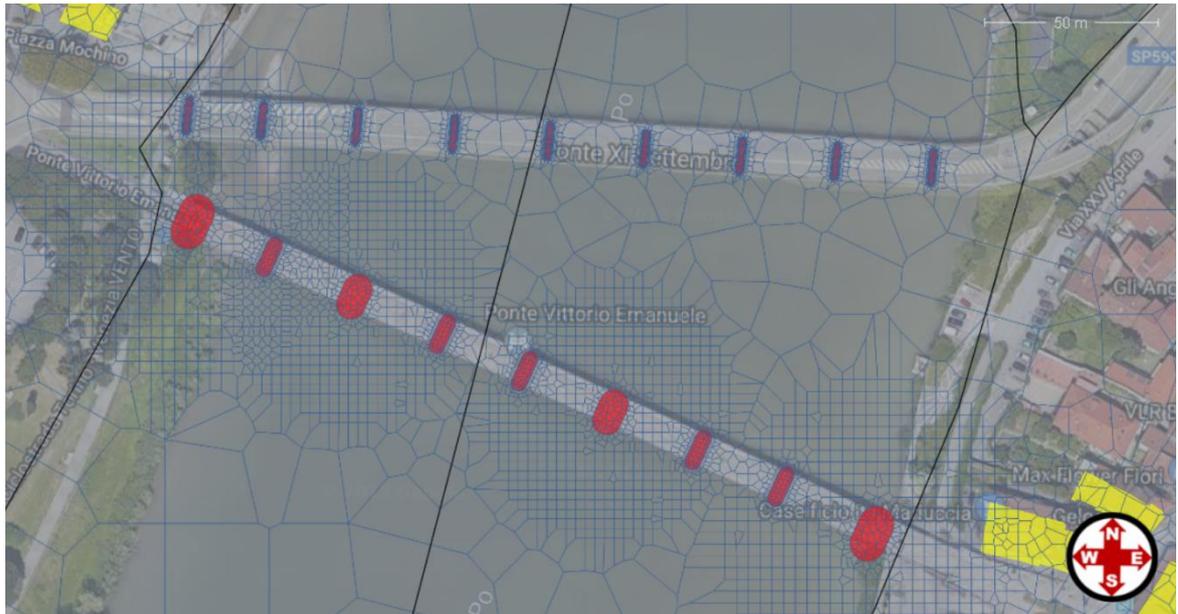


Fig. 13 – Stralcio Modello – Pile dei ponti segnate in rosso

Per la modellazione di opere idrauliche quali dighe e traverse fluviali, si sono utilizzate delle “Connections”.

Il software utilizza questi elementi per modellare una struttura idraulica tra due aree di stoccaggio adiacenti, un'area di stoccaggio e un'area di flusso 2D, due aree di flusso 2D adiacenti o all'interno di una singola area di flusso 2D. La connessione dell'area di flusso all'interno di una singola area di flusso 2D rappresenta il modo in cui una struttura idraulica interna consente al flusso di spostarsi da un set di celle a un altro set di celle.

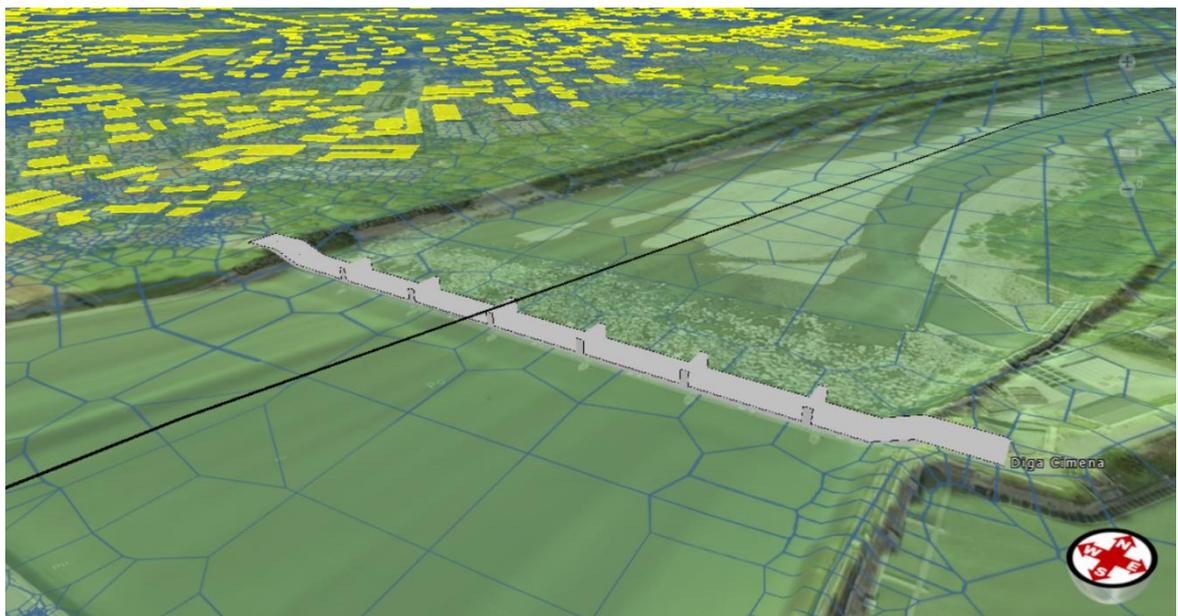


Fig. 14 – Stralcio Modello – Modellazione Diga Cimena

5.1.6 Definizione spaziale della copertura del suolo (Land Cover)

La definizione spaziale della copertura del suolo si è basata sull'inventario CORINE land cover, scaricabile dal sito Copernicus. È costituito da un inventario della copertura del suolo in 44 classi, prodotto dalla maggior parte dei paesi attraverso l'interpretazione visiva di immagini satellitari ad alta risoluzione. In alcuni paesi vengono applicate soluzioni semiautomatiche, utilizzando dati nazionali in situ, elaborazione di immagini satellitari, integrazione GIS e generalizzazione. Si è cercato di realizzare quattro classi differenti, aventi caratteristiche simili in termini di scabrezza, in modo tale da assegnare lo stesso coefficiente di Manning, parametro che si usa nello studio dei flussi dei fiumi e che rappresenta la scabrezza della superficie di riferimento.

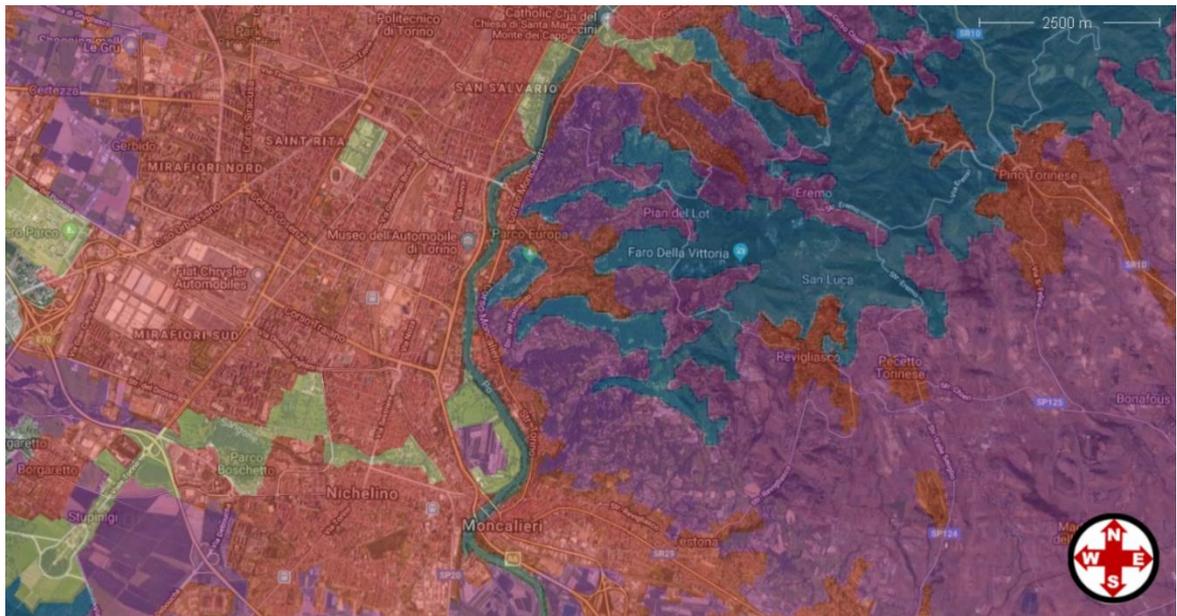


Fig. 15 – Stralcio classi identificative Land Cover

La scelta di considerare solamente quattro classi ha come fine quello di ridurre le variabili che entrano in gioco nella taratura del modello, infatti il coefficiente di Manning è uno degli elementi che in genere bisogna tarare al fine di ottenere risultati che rispecchiano la realtà, per cui, risulta più semplice gestire e far variare iterativamente quattro classi piuttosto che 44.

5.1.7 Definizione delle condizioni al contorno (Boundary Condition)

Le aree di flusso 2D vengono create costruendo aree poligonali che rappresentano le regioni da modellare. Lungo il bordo della mesh poligonale dell'area del flusso 2D, le polilinee delle condizioni al contorno sono definite per rappresentare diverse condizioni del flusso o vincoli che devono essere applicati all'area del flusso 2D. Queste condizioni al contorno rappresentano i confini del flusso, in cui questo entra o esce dall'area.

Le condizioni al contorno che il software permette di inserire sono:

- Variazione portata in funzione del tempo (Flow Hydrograph);
- Variazione livello idrico in funzione del tempo (Stage Hydrograph);
- Altezza di moto uniforme (Normal Depth);
- Scala di deflusso (Rating Curve);

I bordi poligonali in cui non è definita alcuna condizione al contorno sono chiamati limiti di scorrimento. Questi confini agiscono fondamentalmente come pareti "vetrate" senza attrito, infinitamente alte. Il flusso 2D che incontra un limite di scorrimento verrà contenuto nell'area del flusso 2D, come i lati verticali di una vasca.

5.2 Geo Hec-Ras Modello 1D

Come già esposto in precedenza, uno degli svantaggi della Modellazione 2D è quello di non poter inserire il deck dei ponti. Qualora i livelli idrici siano talmente alti da arrivare all'impalcato, il rigurgito a monte del ponte sarebbe maggiore con conseguente innalzamento dei tiranti che potrebbero causare l'aumento dell'estensione delle aree allagate. Per tal motivo si è deciso di costruire un modello 1D per valutare i livelli idrici in prossimità dei ponti.

La costruzione del modello sul software Geo Hec Ras può essere schematizzata nei seguenti passaggi:

- Raccolta dei dati: Modello digitale del Terreno (fonte AdbPo), sezioni batimetriche (fonte AdbPo), land cover (CORINE land cover – Copernicus), opere idrauliche ed elementi che ostacolano il normale corso dell'asta fluviale (fonte SICOD, BDTRE, Modello quasi bidimensionale fornito da AdbPo)
- Definizione del Talweg e delle Overbanks
- Interpolazione delle sezioni batimetriche lungo il canale
- Assegnazione di opere idrauliche e Pile dei ponti
- Definizione della scabrezza (coefficiente di Manning)
- Definizione delle condizioni al contorno

La raccolta dati è stata già descritta nel capitolo della modellazione 2D (5.1.1), si sono sfruttati gli stessi dati anche per la costruzione del modello 1D.

La creazione della geometria del tratto di corso d'acqua in esame è stata agevolata dal software, in quanto, una volta ricavato il DTM "pulito", è stato necessario definire manualmente il talweg e le overbanks tramite linee e da queste, fissando un certo passo e una determinata lunghezza, il software estrae automaticamente le sezioni idrauliche dal DTM. A questo punto è possibile decidere di diminuire il passo fra le varie sezioni per aumentare la stabilità del modello.

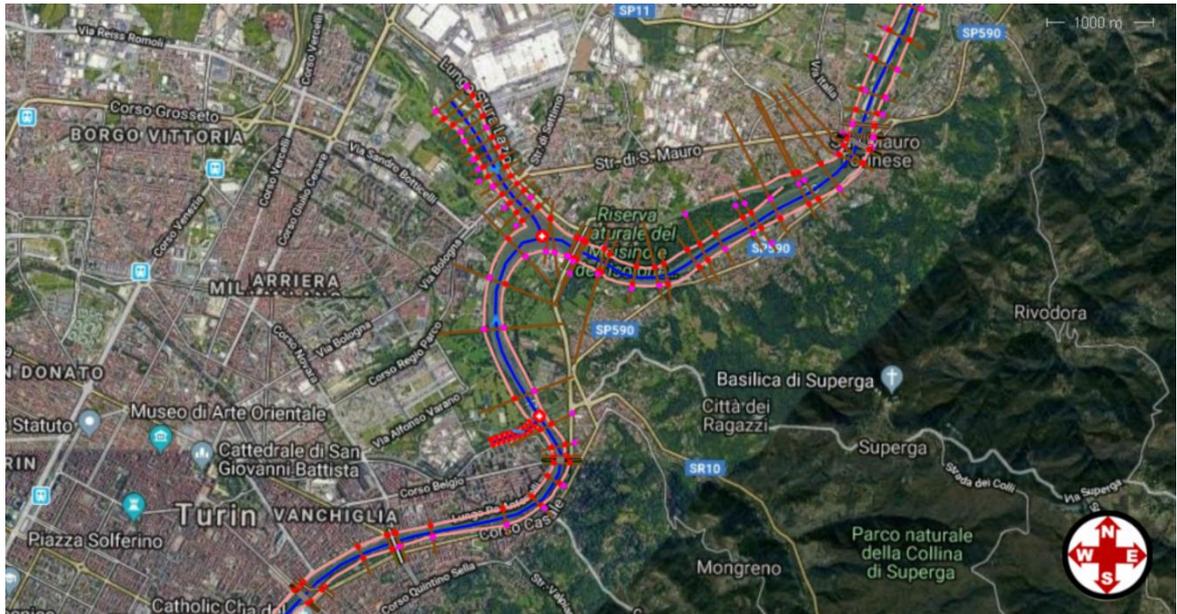


Fig. 16 – Stralcio Modello 1D

L'assegnazione dei ponti, all'interno del software avviene definendo 4 sezioni:

- La sezione 1, ubicata a valle del ponte, a una distanza pari ad almeno quattro volte il semirestringimento causato dal ponte nella sezione 2 con le spalle e le eventuali pile;
- Le sezioni 2 e 3 ubicate rispettivamente subito a valle e subito a monte del ponte;
- La sezione 4, ubicata a monte del ponte, a una distanza pari almeno al semirestringimento causato dal ponte nella sezione 3.

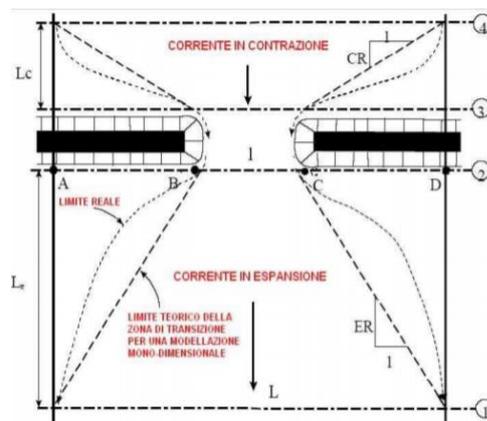


Fig. 17 – Schema Modellazione ponte all'interno del software Hec-Ras

All'interno della sezione dedicata alla modellazione dei ponti vi è una finestra per l'inserimento della geometria nella quale si richiede:

- La descrizione dell'impalcato: per ogni valore di y inserito si devono fornire le quote corrispondenti dei punti sull'intradosso (low cord) e sull'estradosso (high cord);

- La descrizione delle pile (pier): se sono presenti pile in alveo, va specificato il loro numero, l'ordinata corrispondente all'asse e gli spessori alle varie quote sotto l'impalcato.

La definizione delle opere idrauliche richiede le stesse sezioni viste per i ponti.

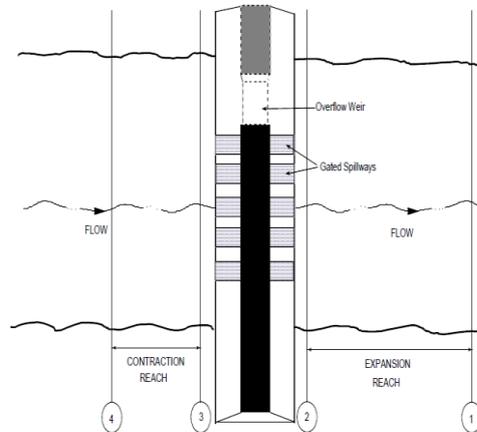


Fig. 18 – Schema modellazione opera idraulica all'interno del software Hec-Ras

Anche in questo caso la modellazione permette infatti di tenere conto del fenomeno di contrazione e espansione della vena liquida a monte e a valle del restringimento della sezione generato dalla presenza dell'infrastruttura.

All'interno della sezione dedicata alla modellazione delle opere idrauliche vi è una finestra per l'inserimento della geometria nella quale si richiede:

- La descrizione della geometria dell'opera: ad ogni valore di x corrisponde una certa quota y fino a definire il profilo dell'opera, inoltre occorre inserire la distanza fra la sezione 3 e l'opera, lo spessore dell'opera, la pendenza dell'opera nella faccia di valle e nella faccia di monte.
- Le specifiche idrauliche del profilo di sfioro: Tipologia profilo di sfioro (Larga soglia, Creager-Scimemi), coefficiente di deflusso (Weir Coefficient)

La definizione della scabrezza può definirsi direttamente dalle sezioni idrauliche, dove il software consente di dividere le zone del "channel", alveo in magra, e le zone delle "overbanks", zone golenarie. È possibile definire anche un coefficiente di Manning in modo più speditivo dalle tabelle delle proprietà delle varie sezioni idrauliche considerate.

Anche nel caso della modellazione 1D, per la risoluzione delle equazioni alle differenze finite, occorre definire delle condizioni al contorno all'estremità di monte e all'estremità di valle del modello.

Queste condizioni al contorno rappresentano i confini del flusso, in cui il flusso entra o esce dal modello e dipendono principalmente dal tipo di moto che si utilizza, il quale può essere stazionario

(steady flow) o vario (unsteady flow). Si è deciso di utilizzare una condizione di moto stazionario in cui si è considerata la portata di picco (Paragrafo 6.1 Alluvione ottobre 2000) sia per il Po che per ogni affluente in modo da considerare la condizione più gravosa possibile.

Tab. 1 – Portate di Picco Riferite all'alluvione dell'Ottobre 2000

Corso d'acqua	Stazione idrometrica	Q [m ³ /s]
Po	Carignano	2050
Chisola	La Loggia	200
Sangone	Torino	400
Dora	Torino	800
Stura di Lanzo	Torino	2000

Il risultato di tale analisi ha fatto luce sul fatto che tutti di tiranti risultano più bassi di 1,5m mediamente, degli impalcanti dei ponti presenti lungo il corso d'acqua. Si riportano alcune immagini tratte dalla soluzione fornita dal modello idraulico:

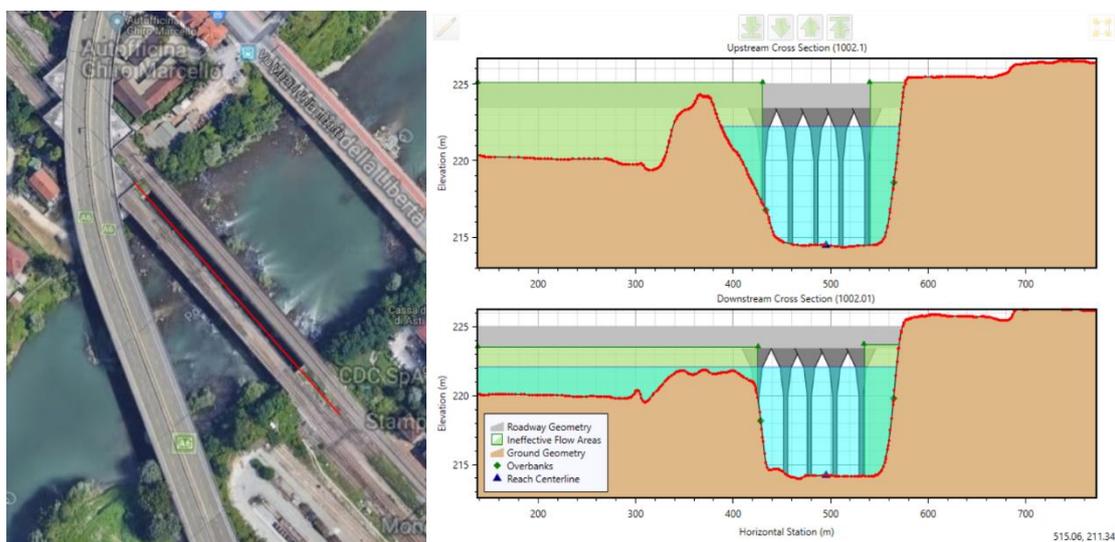


Fig. 19 – Attraversamento Ferroviario Moncalieri

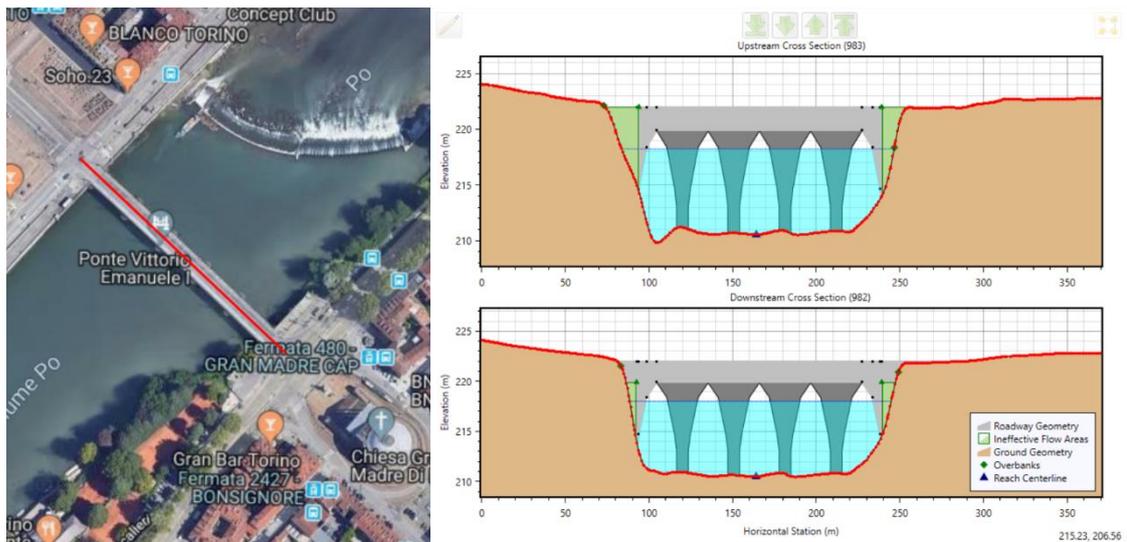


Fig. 20 – Ponte Vittorio Emanuele I (Torino)

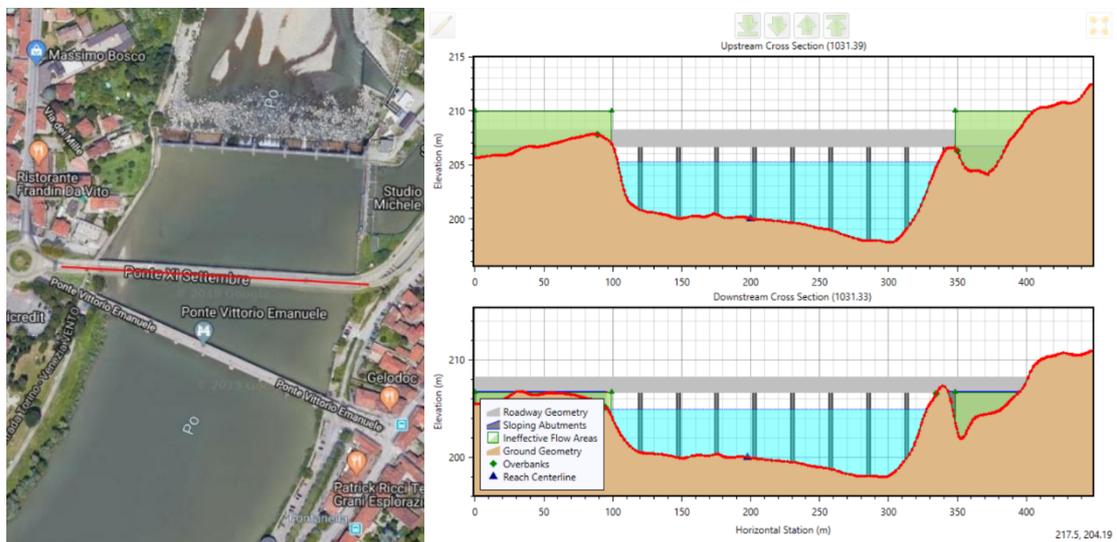


Fig. 21 – Ponte XI Settembre (San Mauro Torinese)

5.3 Delft3D Modello 2D

La costruzione del modello sul software DELFT3D può essere schematizzata nei seguenti passaggi:

- Raccolta dei dati (già descritta nel paragrafo 5.1.1)
- Definizione delle land boundaries
- Scelta della discretizzazione spaziale (Grid)
- Allineamento della griglia alle land boundaries
- Definizione spaziale del terreno (Bed level)
- Definizione spaziale della Copertura del suolo (Roughness)
- Assegnazione di Edifici, opere idrauliche e Pile dei ponti
- Definizione delle condizioni al contorno (Boundary Condition)

Visualizziamo in dettaglio le procedure e le scelte effettuate in relazione alla tipologia del problema oggetto della presente tesi.

5.3.1 Raccolta dati e definizione Land Boundaries

La raccolta dati è già stata trattata nel paragrafo 5.1.1, mentre la definizione delle land boundaries altro non è che l'assegnazione delle breaklines.

5.3.2 Discretizzazione spaziale (Grid)

Il primo passo per la costruzione del modello è quello di costruire la "GRID", cioè la griglia di calcolo.

La griglia è composta da celle che presentano nodi di cella (spigoli della cella), bordi di cella (contorni delle celle, collegamento dei nodi), nodi di flusso (circoentro della cella), bordi di flusso (segmento che collega due nodi di flusso).

Questa topologia a griglia deve rispettare delle importanti proprietà quali l'ortogonalità e la regolarità. L'ortogonalità è definita come il coseno dell'angolo tra un bordo di flusso e un bordo di cella. Idealmente 0. La regolarità di una mesh è definita come il rapporto tra le aree di due celle adiacenti. Idealmente 1, le aree delle celle sono uguali.

Si è deciso di generare una griglia flessibile con maglie rettangolari lungo i corsi d'acqua e maglie triangolari nelle aree restanti, tale scelta è stata dettata dal fatto che, con maglie rettangolari è possibile monitorare meglio le velocità del flusso lungo le celle, inoltre essendo una modellazione idraulica creare delle maglie rettangolari allungate lungo il normale corso del flusso favorisce una maggiore stabilità alle risoluzioni numeriche del software.

La griglia viene costruita da un tool esterno al Software chiamato RGFGRID, quest'ultimo consente di generare una griglia rettangolare prendendo come riferimento delle "splines", mentre la griglia triangolare è generata con l'ausilio di poligoni.

La griglia rettangolare necessita dei seguenti passaggi per essere generata:

- Importare Land boundaries (overbanks estratti dal software Geo-Hec-Ras)
- Generare splines "appoggiate" alle land boundaries
- Settare le impostazioni della griglia (passo, lunghezza, larghezza etc)
- Generare la griglia

Una volta generata la griglia occorre verificare che l'ortogonalità sia rispettata e cioè che questa stia al di sotto del valore consigliato 0.02.

La griglia rettangolare necessita dei seguenti passaggi per essere generata:

- Importare Land boundaries (breaklines)
- Generare poligoni “appoggiati” alle land boundaries
- Suddividere i lati del poligono in segmenti, dalla lunghezza di quest’ultimi dipendono le dimensioni dei triangoli della mesh
- Generare la griglia

Anche in questo caso, generata la griglia, occorre verificare che l’ortogonalità sia rispettata.

Seguendo i passaggi sopracitati entrambe le griglie risulteranno allineate alle Land Boundaries.

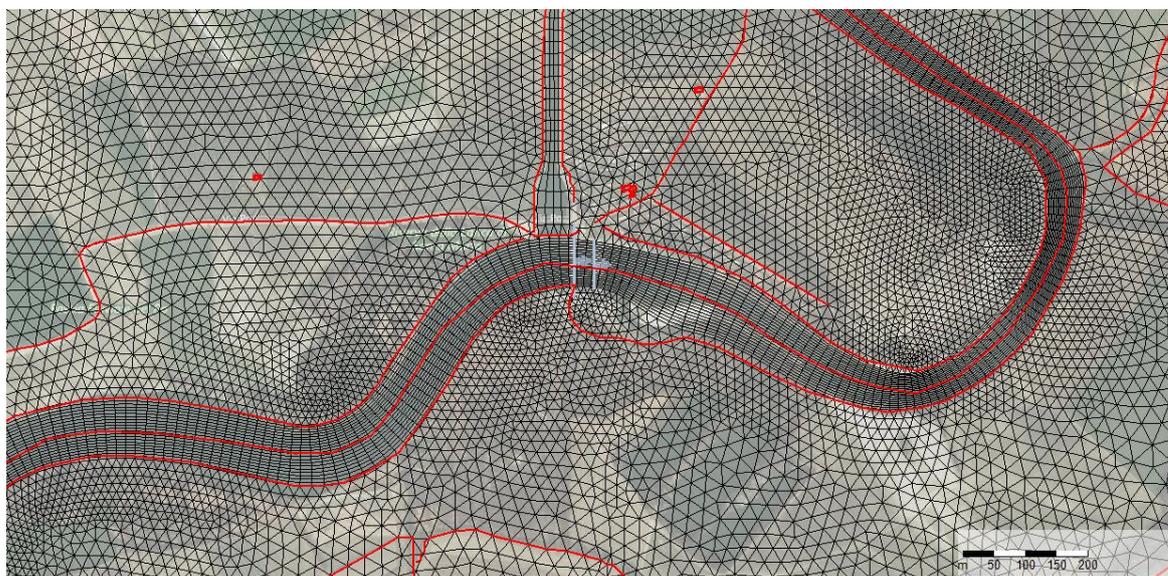


Fig. 22 – Stralcio Grid – Land Boundaries segnate in rosso

5.3.3 Definizione spaziale del terreno e della scabrezza (Bed level e Roughness)

La definizione del terreno avviene tramite file che contengono delle coordinate spaziali (x,y,z), per cui avendo a disposizione il modello digitale del terreno con annessa batimetria (fonte AdbPo), occorre semplicemente caricarlo nel software. La creazione del file avente coordinate spaziali richiede l’ausilio di un editor di testo, questo limita la risoluzione del DTM inserito, poiché ogni editor di testo presenta dei limiti in termini di righe contenute in un file, per cui è stato necessario ricampionare il DTM, portandolo da una risoluzione di 2m ad una risoluzione a 5m. È evidente che questo fa perdere informazioni importanti del terreno che però, ai fini del modello, non influenzano eccessivamente i risultati perché il software per la definizione del “bed level” considera i nodi della griglia, assegnando la quota del terreno ad ogni nodo genera un volumetto finito in cui successivamente risolve le equazioni numeriche per il calcolo delle proprietà idrauliche. Questo giustifica il ricampionamento del terreno, poiché la griglia utilizzata presenta lati variabili dai 15 metri ai 50 metri in base al livello di dettaglio che si è voluto ottenere nelle diverse zone.

La definizione spaziale della scabrezza, va inserita allo stesso identico modo del terreno, quindi anche qui si è pensato di effettuare un ricampionamento.

5.3.4 Assegnazione di Edifici, opere idrauliche e pile di ponti

L'assegnazione degli edifici avviene attraverso il comando "thin Dam", il software genera nel contorno degli edifici oggetti infinitamente alti che proibiscono scambio di flusso tra le celle computazionali adiacenti senza ridurre l'area bagnata totale e il volume del modello. Lo scopo di una diga sottile è quello di rappresentare piccoli ostacoli nel modello con dimensioni della griglia secondaria, ma sufficientemente grandi per influenzare il flusso locale.

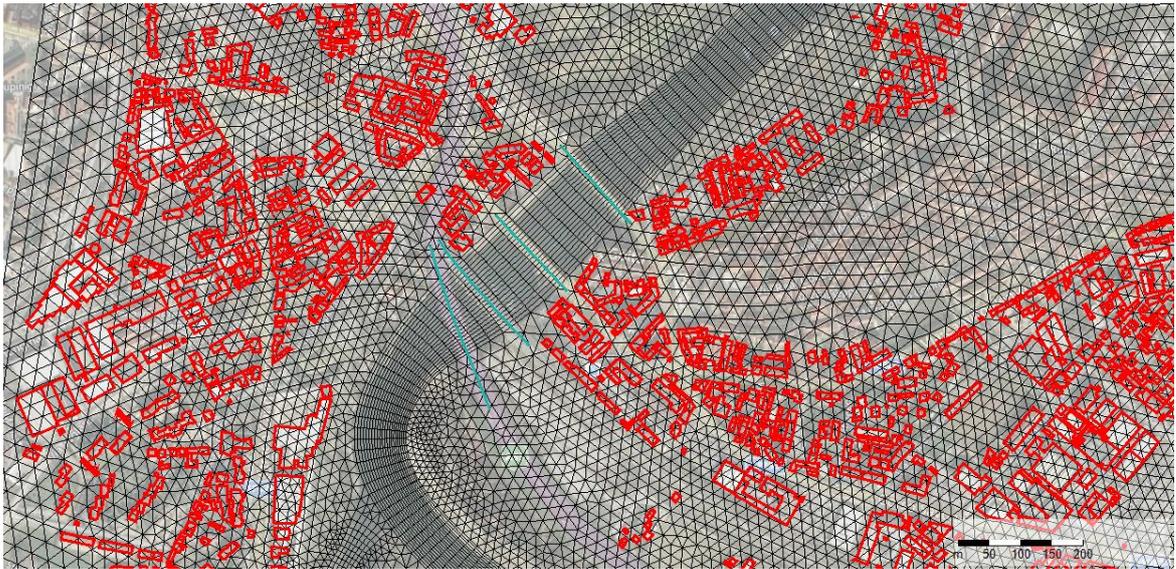


Fig. 23 – Stralcio Modello – Thin Dam segnate in rosso

Le traverse fluviali sono state aggiunte tramite il comando "Weir", il quale consente di inserire strutture sormontabili, semplicemente definendo l'altezza, lo spessore e il coefficiente di contrazione della soglia di sfioro.

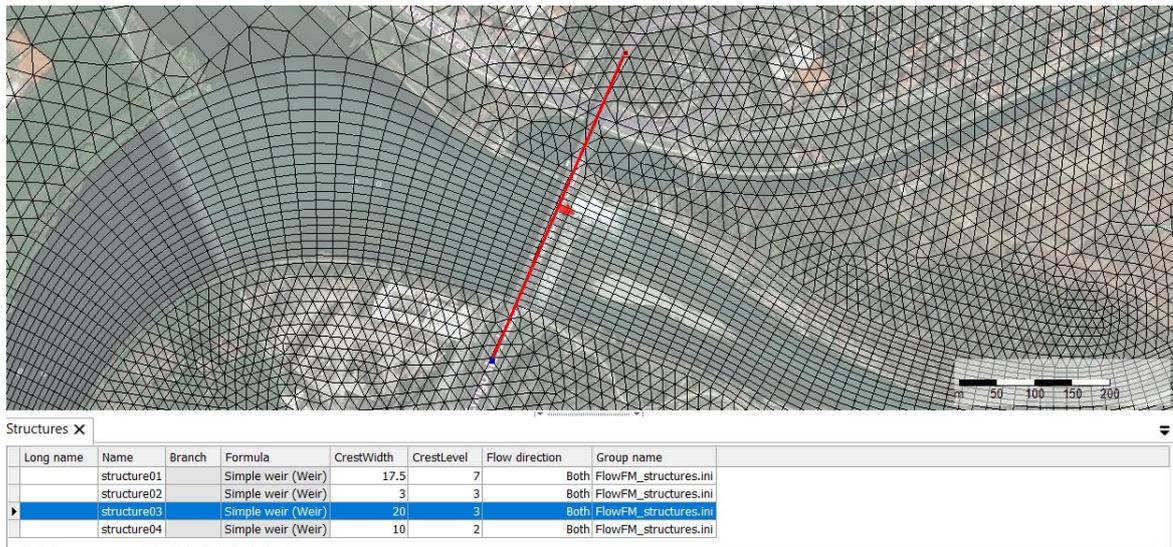


Fig. 24 – Modellazione Ponte Diga

L'assegnazione delle pile dei ponti è molto semplice in DELFT3D, bisogna semplicemente tracciare una poligonale sull'asse del ponte ed ogni punto della poligonale rappresenta una pila. Occorre poi definire per ogni pila, il diametro e il "Drag Coefficient", quest'ultimo dipende dalla geometria del pilone in alveo.

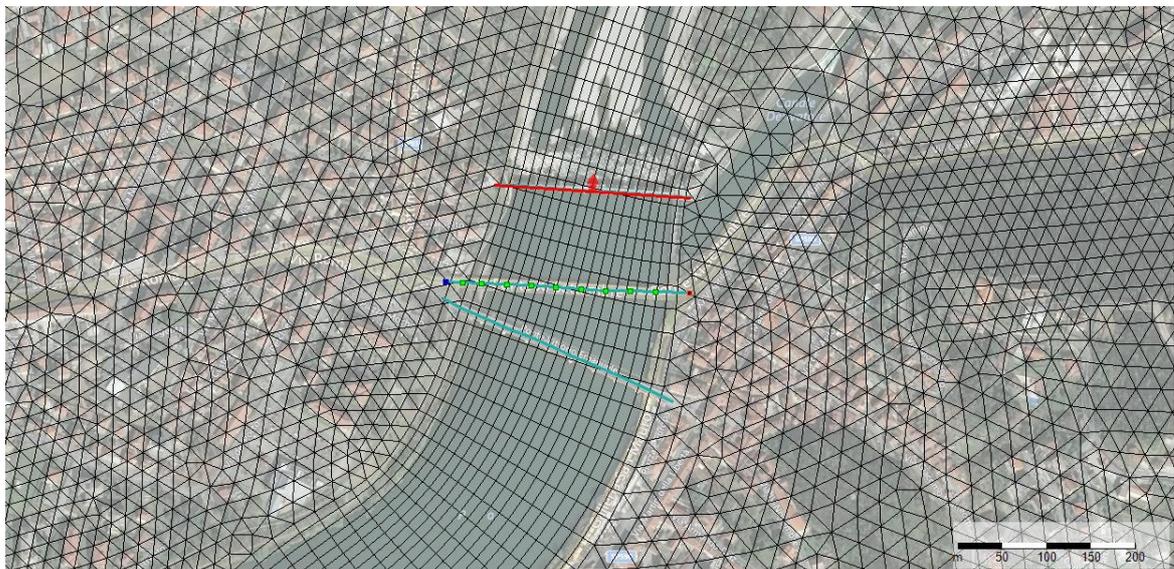


Fig. 25 – Stralcio Modello – Ponte XI Settembre segnato in verde

5.3.5 Definizione delle condizioni al contorno

Per ultimo si ha la definizione delle condizioni al contorno, le quali sono identiche a quelle trattate nel paragrafo 5.1.7.

Si sono inserite le stesse condizioni al contorno e si sono valutate le differenze fra i software.

6. TARATURA DEI MODELLI 2D

La taratura di un modello idraulico ha un ruolo chiave nella rappresentazione delle fenomenologie fisiche corrette, infatti risulta importante confrontare i dati risultanti dal modello con quelli misurati e raccolti in campo. Questo consente di individuare delle discrepanze fra dati misurati e output del modello così che si possano eseguire le regolazioni necessarie alla taratura.

Questa operazione non è semplice e la sua complessità deriva da molti fattori, fra i quali si hanno:

- Ipotesi proprie del modello numerico adottato
- Limiti di applicabilità dello schema di calcolo
- Risoluzione, qualità e anno di riferimento dei dati di input
- Carenza nella discretizzazione numerica
- Definizione dei parametri del modello
- Imperfetta conoscenza delle condizioni iniziali ed al contorno
- Disponibilità, risoluzione, qualità e anno di riferimento di osservazioni utili per tarare e validare il modello

I problemi associati alla taratura riguardano tutte le fonti di errore attinenti al modello, il matematico George Box sostiene che "Tutti i modelli sono sbagliati, ma molti sono utili." I modelli rientrano in un ampio spettro di valori, che vanno dalla perfezione all'inadeguatezza. La precisione dei risultati è direttamente proporzionale alla qualità del processo di taratura eseguito e all'analogia tra la condizione analizzata e quella riscontrata nella realtà.

Il procedimento di taratura consiste dunque nell'effettuare più simulazioni facendo variare alcuni parametri del modello per poi confrontare i risultati generati con le osservazioni raccolte. Occorre però sottolineare che la rappresentazione della dinamica del processo fisico non deve mai essere pregiudicata da una eccessiva ricerca di congruenza con le osservazioni, questo perché i dati di input possono avere anni di riferimento diversi rispetto alle osservazioni per cui è bene studiare il comportamento del modello ed eventualmente cercare di capire le ragioni per le quali esiste una discrepanza fra risultato ed osservazione.

La taratura del modello è stata eseguita basandosi sulle osservazioni ricavate dell'evento alluvionale verificatosi nell'Ottobre 2000. Informazioni e dati importanti sono stati scaricati dal sito dell'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte (ARPA Piemonte), fra i quali:

- Descrizione dell'evento alluvionale regionale del 13-16 Ottobre 2000
- Aree allagate in Piemonte osservate post-evento (formato shape)
- Informazioni sulle direzioni di deflusso laterale (formato shape)
- Osservazioni idrometriche puntuali (formato shape)
- Osservazioni lineari sui danni accaduti (formato shape)

6.1 L'evento alluvionale dell'Ottobre 2000

Nelle giornate fra Venerdì 13 Ottobre e Domenica 15 Ottobre del 2000 intense precipitazioni hanno colpito la regione Piemonte causando allagamenti, frani e danni ad edifici ed infrastrutture.

Nelle aree maggiormente colpite si è registrata una precipitazione media areale di 400 mm in 60 ore con punte diffuse di oltre 600 mm.

L'intensità e l'ampia distribuzione spaziale delle precipitazioni hanno generato significative onde di piena sui principali corsi d'acqua del reticolo idrografico piemontese, che hanno raggiunto carattere di eccezionalità in tutto il settore settentrionale del bacino del Po, interessando tutti gli affluenti di sinistra sino al Ticino.

In questa trattazione ci limitiamo a riportare tutte le informazioni riguardanti l'asta del Po oggetto di studio e i relativi affluenti di sinistra.

L'evento alluvionale appare eccezionale sull'intera asta del Po. A Carignano, grazie ai contributi della parte montana del Po, del Pellice e del Chisone, la portata ha superato i 2000 m³/s.

Ulteriore notevole contributo alla formazione della piena del Po a monte di Torino è stato quello del Sangone per cui tuttavia non si dispone di dati misurati. La portata massima a Torino, registrata nella mattinata del 16 ottobre, è valutabile in 2350 m³/s ed è quindi superiore alla massima storica di 2230 m³/s verificatasi nel corso dell'evento del 1949. A valle di Torino i deflussi hanno risentito degli apporti di Dora Riparia, Stura di Lanzo, Malone e Orco. È inoltre importante segnalare che le onde di piena formatesi in questi corsi d'acqua risultano sfasate rispetto a quelle dei bacini di monte; questo ha avuto effetti positivi sul fiume Po.

Sulla Dora Riparia l'evento di piena rappresenta una dei più gravosi e la corrente ha mandato in avaria la stazione presente a Susa, tuttavia basandosi su considerazioni riferite ad altre sezioni della Dora Riparia e alle onde di piena formatesi negli affluenti della stessa è stato possibile stimare un valore di colmo pari a 500/600 m³/s. Inoltre, è stato possibile stimare, anche grazie alle tracce della piena, il valore di 700 m³/s il valore della portata di picco per Torino.

Nei bacini dello Stura di Lanzo, del Malone e dell'Orco le precipitazioni hanno registrato valori elevati già a partire dalle prime ore dell'evento. Il colmo più gravoso è quello riferito alla Stura di Lanzo, il quale ha raggiunto valori di 2000 m³/s, valore che risulta essere uno dei più grandi registrati.

Di seguito vengono riportati gli idrogrammi registrati dalle stazioni idrometriche nelle sezioni più significative.

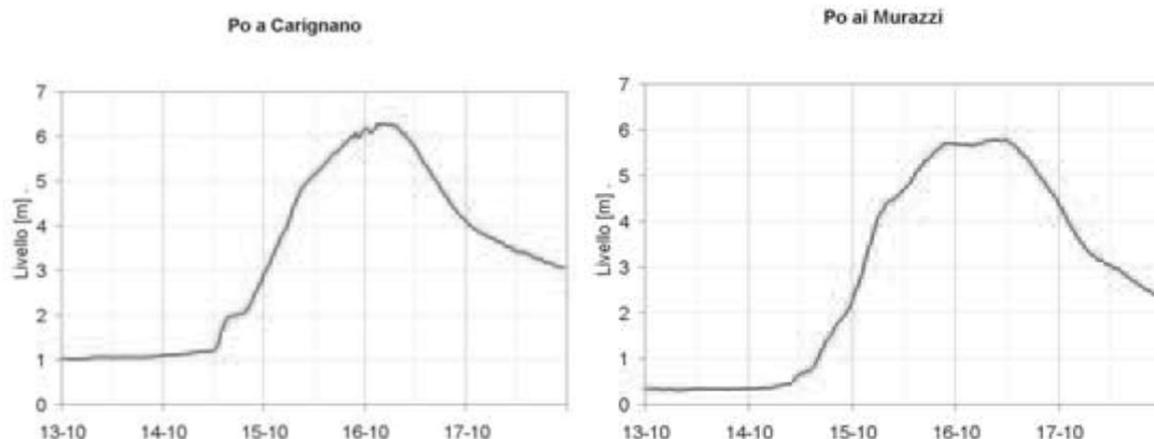


Fig. 26 – Idrogrammi nelle stazioni di Carignano e Murazzi (ARPA evento alluvionale Ottobre 2000)

La dinamica dell’evento ha prodotto uno sfasamento tra le onde di piena degli affluenti a valle della Stura di Lanzo e quella generatasi nella parte di bacino a monte di Torino.

Questo ha contribuito a non incrementare ulteriormente i valori del colmo di piena nelle sezioni a valle di Torino ma ha favorito la formazione di un’onda di piena estremamente allungata nel tempo con portate che hanno mantenuto valori di colmo per 8-10 ore consecutive rendendo poco sensibili gli effetti della laminazione.

Di seguito si riporta uno stralcio di una tabella presente nell’elaborato “Evento alluvionale regionale 13-15 Ottobre 2000” presente sul sito di ARPA Piemonte:

Tab. 2 – Portate al colmo di piena (ARPA evento alluvionale Ottobre 2000)

Stazione Corso d’acqua	Sezione	Bacino imbrifero sotteso		Stima della portata al colmo		
		Superficie [km ²]	Altitudine media [m slmm]	Colmo [m ³ /s]	Tempo di ritorno [anni]	Affidabilità
Asta PO	PO a Cardè	496	936	900	20	
	PO a Carignano	3976	1087	2050	80	Alta
	PO ai Murazzi	5362	907	2350	90	
Dora Riparia	Dora di Bardonecchia a Beaulard	200	2195	70	<10	
	Dora Riparia a Oulx	258	2169	100	<10	
	Dora Riparia a Susa	827	2022	500*	50	Bassa
	Cenischia a Susa	145	1984	165	40	
Stura di Lanzo	Stura di Lanzo a Lanzo	580	1763	2000 *	>200	Bassa
	Ceronda a Venaria	173	527	480	>200	Alta

Questi valori devono essere interpretati alla luce del diverso grado di affidabilità, infatti durante l’evento la geometria dell’alveo di alcune sezioni dei corsi d’acqua maggiormente colpiti ha subito significative modifiche. Inoltre, alcuni degli strumenti, sono stati irrimediabilmente danneggiati o addirittura asportati dal passaggio dell’onda di piena non consentendo una registrazione attendibile dei livelli.

6.2 Applicazione della taratura al modello

Dopo una serie di simulazioni iniziali e dopo uno studio accurato del comportamento del modello si è deciso di agire principalmente su:

- Coefficiente di scabrezza
- Variazioni geometriche delle pile dei ponti
- Modellazione di Fornici e canaletti di scolo non presenti nel DTM
- Sfasamento degli idrogrammi

Per quanto riguarda i coefficienti di scabrezza, questi sono stati fissati inizialmente basandosi sui valori presenti in letteratura (Open-Channel Hydraulics, CHOW, 1959)

Tab. 3 – Tabella dei coefficienti di scabrezza – Chow,1959

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
A. Natural streams			
1. Main Channels			
a. Clean, straight, full, no rifts, or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Veryweedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
2. Flood Plains			
a. Pasture no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
2. Same as above, but heavy sprouts	0.050	0.060	0.080
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.080	0.100	0.120
4. Same as above, but with flow into branches	0.100	0.120	0.160
5. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.110
3. Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, with trees and brush on banks submerged			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070

Successivamente, basandosi sulle osservazioni in campo, si sono iterati i valori fino ad ottenere dei risultati congruenti. Come detto in precedenza (Paragrafo 5.1.6), si sono utilizzate quattro classi differenti ed i risultati ottenuti sono riassunti nella seguente tabella:

Tab. 4 – Coefficienti di Manning usati per la taratura

Uso del suolo	Coeff. Manning
Zone Urbane	0.16
Zone Boschive ed Alberate	0.13
Aree Agricole e Campi	0.04
Aree Verdi	0.035

Al fine di simulare eventuali ostruzioni delle luci dei ponti causati dal trasporto di elementi flottanti durante la piena, e la variabilità del diametro delle pile (Archi), si è pensato di aumentare il coefficiente di scabrezza in prossimità dei ponti, nei casi in cui la suddetta ipotesi non si è dimostrata sufficiente, si è aumentata leggermente le dimensioni delle pile.

Come condizioni al contorno, vista l'assenza di idrogrammi misurati durante l'evento, si sono considerati degli idrogrammi triangolari di durata 24h con colmi coincidenti a quelli riportati nella descrizione dell'evento del 2000 svolta da ARPA Piemonte.

La scelta di considerare degli idrogrammi di durata 24h è motivata dal voler simulare un evento di piena a carattere relativamente impulsivo.

È ben noto inoltre che la dinamica dell'evento ha prodotto uno sfasamento tra le onde di piena degli affluenti a valle della Stura di Lanzo e quella generatasi nella parte di bacino a monte di Torino.

Questo ha contribuito a non incrementare ulteriormente i valori del colmo di piena nelle sezioni a valle di Torino ma ha favorito la formazione di un'onda di piena estremamente allungata nel tempo.

Per simulare un evento simile si è deciso dunque di sfasare i colmi degli idrogrammi e di far variare la durata del colmo di piena, trasformando, di fatto, alcuni degli idrogrammi triangolari in trapezoidali.

Quanto esposto risulta molto più chiaro dal diagramma riportato di seguito:

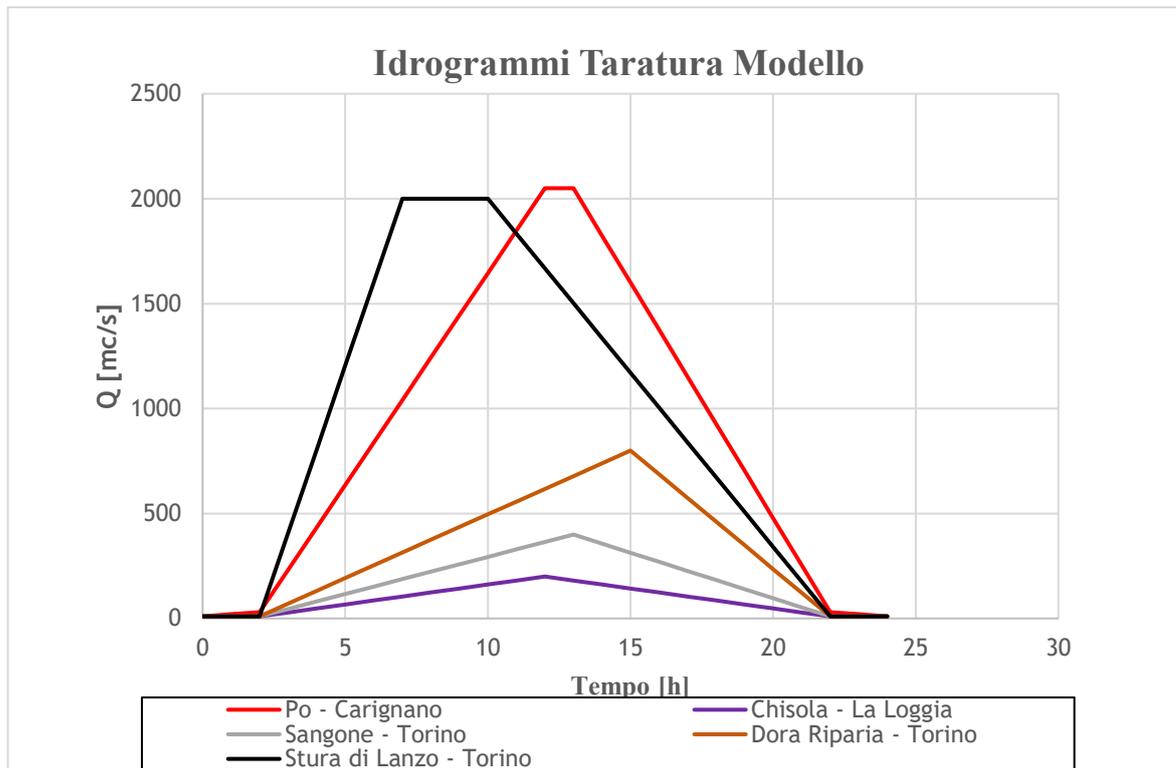


Fig. 27 – Idrogrammi utilizzati per la taratura

Nella descrizione dell'evento del 2000, non si hanno informazioni numeriche sugli affluenti Sangone e Chisola, ma è chiaramente riportato che questi hanno contribuito con un apporto sostanziale di portata. Le uniche informazioni a disposizione sono il colmo di piena nella stazione di Carignano (2050 m³/s) ed il colmo di piena nella stazione dei Murazzi (2350 m³/s). Queste sezioni definiscono proprio le condizioni a monte e valle degli affluenti Sangone e Chisola, per cui basandosi su questi dati, sulle aree allagate misurate e sui valori di portata annuali presenti nella banca dati dell'ARPA, si sono stimati i colmi riferiti ai due affluenti.

6.3 Risultati taratura Geo Hec-Ras e Delft3D

Tenuto conto della qualità e della quantità dei dati in possesso (input ed osservazioni), si può certamente affermare che le soluzioni ottenute dai modelli creati con entrambi i software presentano poche discrepanze rispetto alle osservazioni Post-processing, principalmente da imputare al possesso di un DTM con riferimento temporale diverso dall'evento alluvionale accaduto in ottobre 2000. Inoltre, tali differenze sono dovute all'impossibilità di poter simulare il rigurgito generato dalle reti sotterranea, eventuali canali di erosione generati e danneggiamenti arginali. Si riporta di seguito il confronto fra risultati ed osservazioni.

A monte i risultati ottenuti sono identici a quelli osservati, proseguendo verso valle la prima discrepanza si ha nei pressi del Comune di Gorra, dove il modello restituisce delle aree allagate discontinue. In realtà anche qui il modello è fedele alle osservazioni perché le aree allagate post-processing sono state tracciate in modo continuo ma interrogando il file shape fornito nella stessa zona (ARPA Piemonte), è possibile visionare la descrizione dell'allagamento, la quale riporta: "Area allagata in modo discontinuo o di incerta interpretazione".



Fig. 28 – Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Comune Gorra

Per quanto concerne gli allagamenti avvenuti nel Comune di Moncalieri il modello, sia in sinistra che in destra, fornisce delle aree allagate minori, dovute principalmente al passaggio del flusso attraverso sottopassi stradali, forni e canaletti di scolo che attraversano gli argini.



Fig. 31 - Sottopassi strada brandina Comune di Moncalieri



Fig. 32 – Sottopassi strada tiro a segno Comune di Moncalieri



Fig. 33 – Canale che attraversa l’argine sinistro del Chisola Comune di Moncalieri

La sottostima delle aree allagate è giustificata dall’impossibilità di simulare il rigurgito della rete sotterranea di smaltimento delle acque piovane. Infatti, interrogando il file shape fornito, le descrizioni dell’allagamento riporta: “Area inondata per rigurgito della rete sotterranea di smaltimento delle acque piovane”.

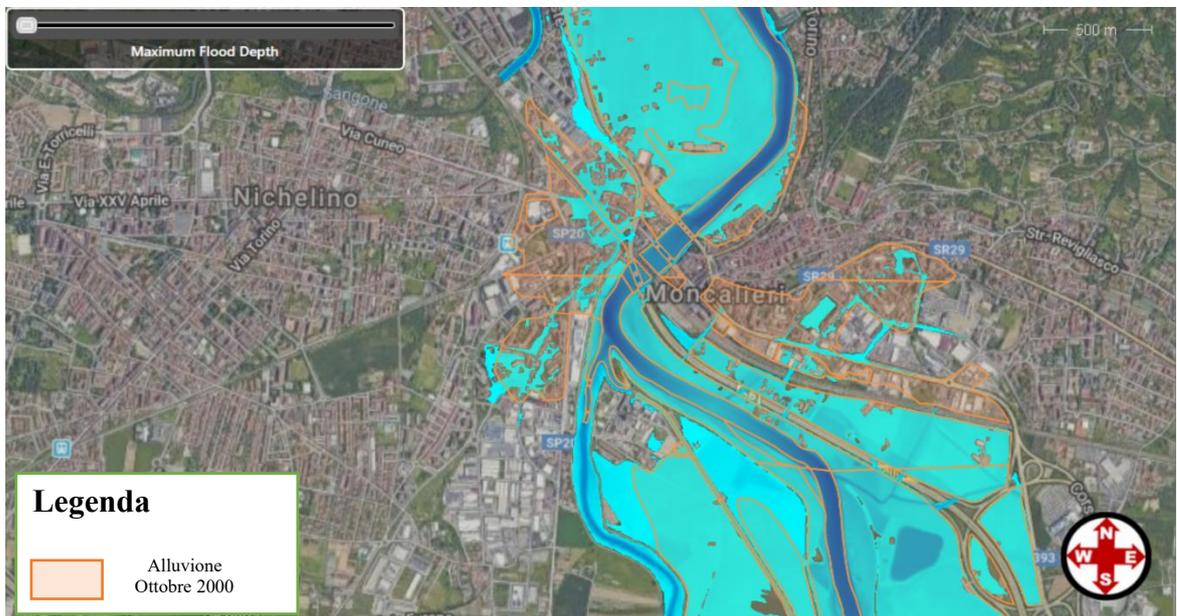


Fig. 34 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Comune di Moncalieri

Da Moncalieri fino alla Confluenza del Po con la Dora Riparia il modello restituisce circa le stesse soluzioni delle osservazioni.



Fig. 35 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Comune di Torino 1

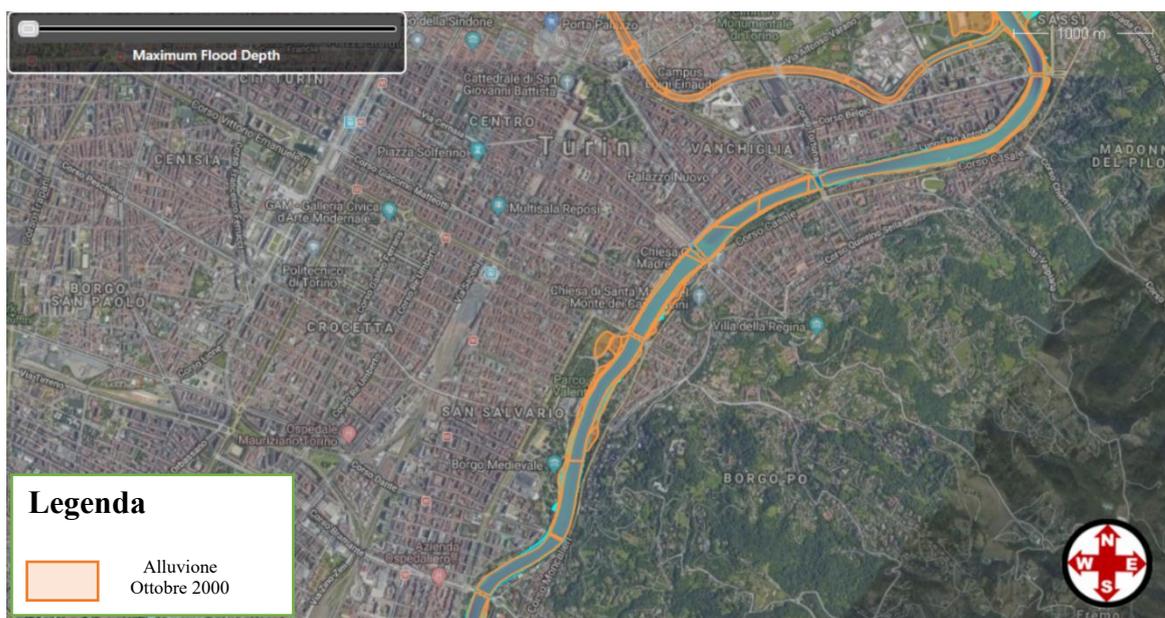


Fig. 36 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Comune di Torino 2

In prossimità del Parco Colletta, Vivaio Comunale regio parco e Parco della confluenza nel Comune di Torino, il modello restituisce delle aree allagate minori. Occorre però precisare che la descrizione dell'area allagata riporta: "Area caratterizzata da mobilizzazione dei sedimenti e principali forme deposizionali"; pertanto, è probabile che l'incremento di area allagata sia stato dovuto ad apporti proveniente dalla rete idrografica minore ed alla presenza di canali irrigui, nonché al rigurgito di canali di scolo presenti che attraversano l'argine in sinistra orografica. (Fig.37-38)



Fig. 37 – Opere Presenti nel Lungo Dora Pietro Colletta Comune di Torino



Fig. 38 – Opere presenti lungo il Corso F. Guerrazzi Comune di Torino

Proseguendo verso valle, il modello restituisce delle soluzioni conformi alle osservazioni, fino al comune di San Mauro Torinese dove, per lo stesso motivo del Comune di Moncalieri, le aree allagate sono minori perché non è stato possibile modellare il rigurgito dovuto alla rete di smaltimento. Occorre fare particolare attenzione invece alla parte di Comune alla destra del Po. Il modello non restituisce nessun tipo di allagamento, questo perché durante l'evento c'è stato un danno all'opera di difesa spondale (Muro di sostegno galleria SP590), che non è stato possibile modellare.

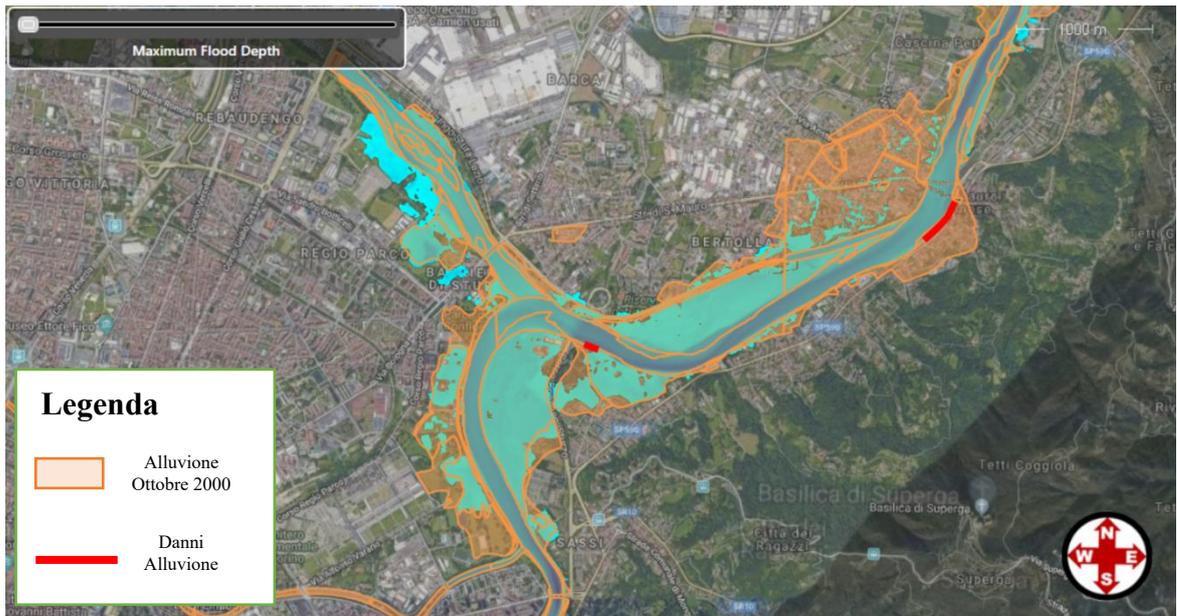


Fig. 39 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Parco Colletta, Vivaio Comunale regio parco e Parco della confluenza

A valle del Comune San Mauro Torinese, un’osservazione importante va fatta nell’area compresa fra il canale di derivazione Cimena e il Po. In questa zona il modello restituisce delle aree allagate minori, dovute alla generazione di un “canale di erosione” dal Po verso il lago sorgente Po, formatosi durante l’alluvione dell’ottobre 2000, che non è stato possibile modellare e che ha contribuito notevolmente all’ingresso di portata all’interno di questa zona.

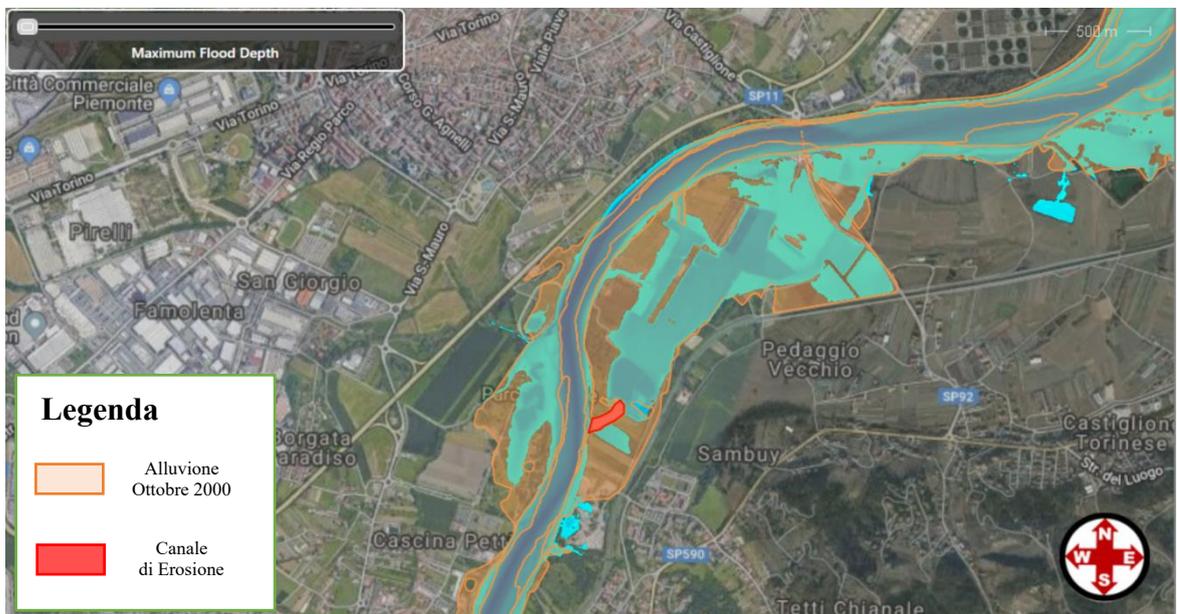


Fig. 40 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Lago Sorgente Po

Superata l’area compresa fra il canale di derivazione Cimena e il Po, fino alla fine del modello le soluzioni ottenute sono conformi con le osservazioni.

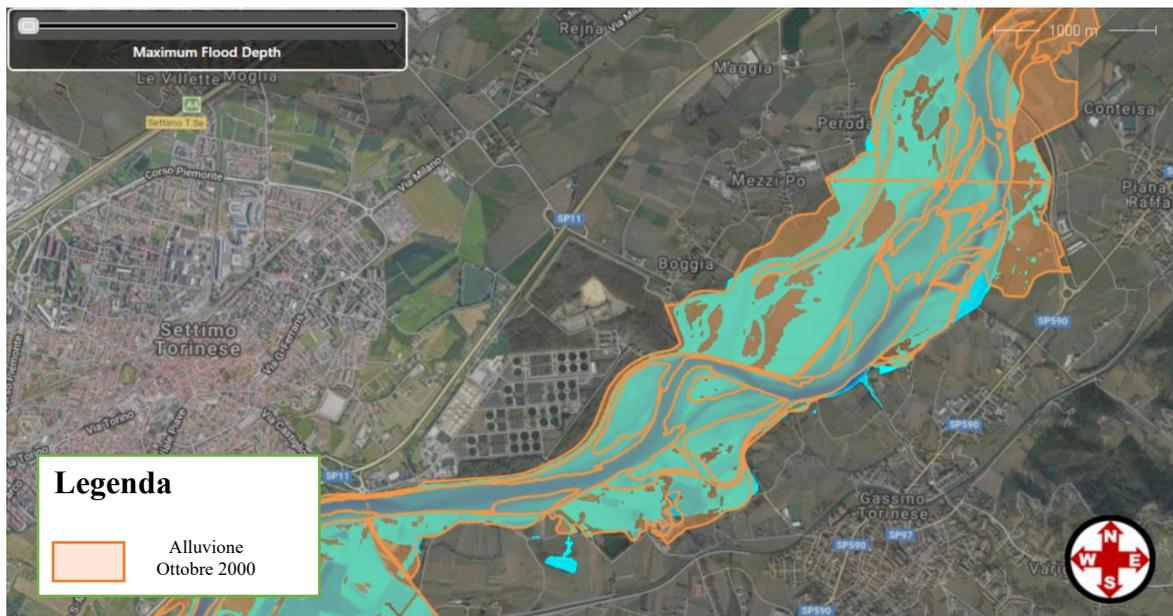


Fig. 41 - Confronto Risultato taratura con osservazioni post processing – Tratto finale Modello

L'utilizzo dei due software ha portato a risultati quasi identici; le piccole differenze fra le aree allagate sono dovute principalmente al tipo di elemento volumetrico che il software utilizza e come questo viene generato. Riprendendo quanto esposto al paragrafo 5.3.3, il software Geo-Hec-Ras, considera il terreno non piatto, per cui non si perde nessuna informazione sul terreno anche se si utilizza una mesh molto grande. Delft3D invece lavora in modo differente, infatti il software proietta la griglia sul DTM, assegna ad ogni nodo della griglia il corrispondente valore di quota e genera un piano passante per quei punti. Questo approccio spesso fa perdere delle informazioni sul terreno che, soprattutto nelle zone in cui si hanno variazioni di quota in spazi ristretti, vanno a generare delle piccole differenze di aree allagate. Inoltre, il software Delft3D presenta delle limitazioni in termini di dimensioni del file riferito al DTM e per tal motivo è stato necessario eseguire un ricampionamento dello stesso, portandolo ad una maglia di 5 metri.

Si riportano di seguito il confronto fra i due software:

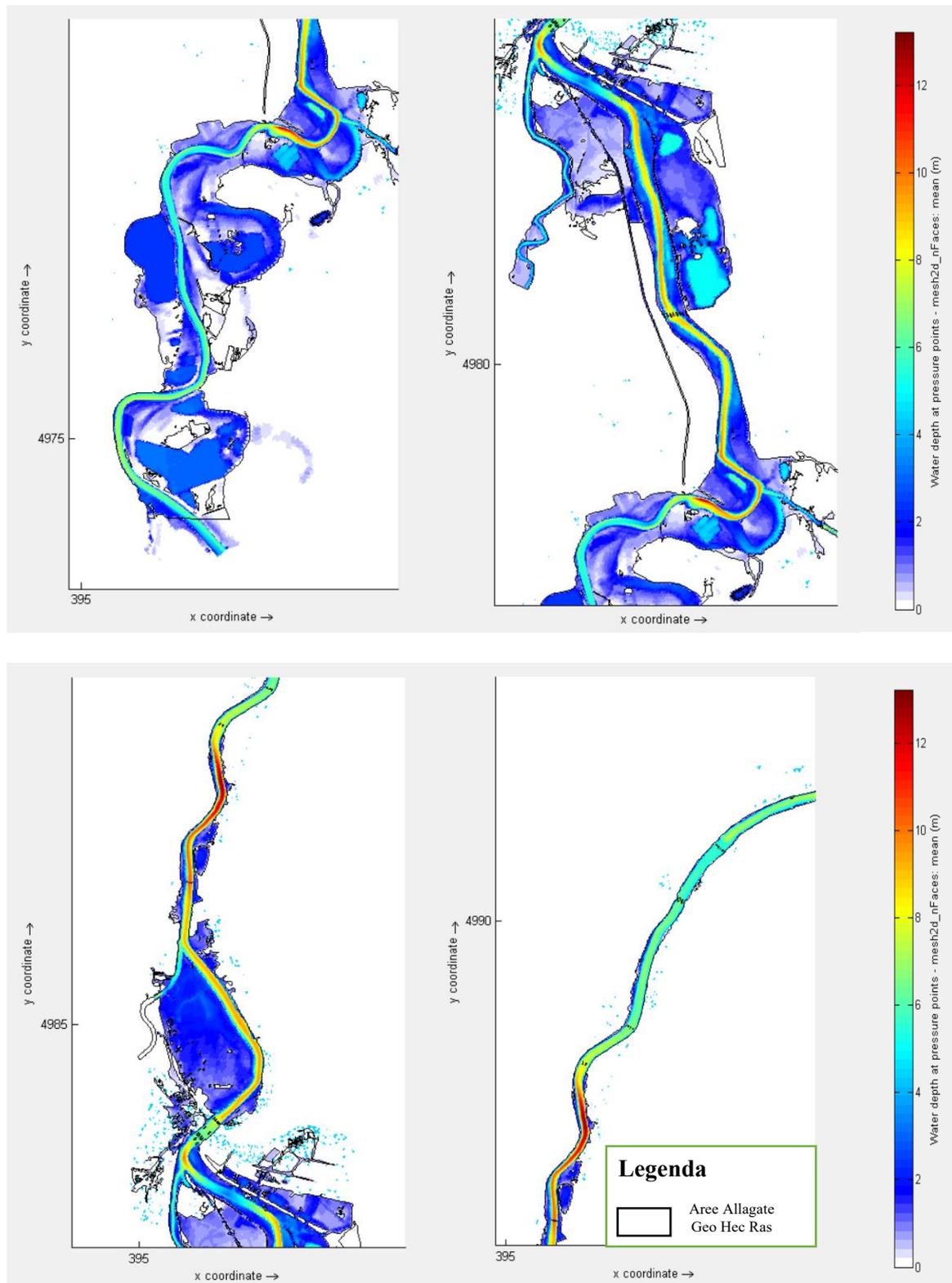


Fig. 42 – Confronto Taratura Geo Hec Ras – Delft3D (Aree allagate Geo Hec Ras segnate come contorno in nero) dalla stazione Carignano fino a valle di Torino

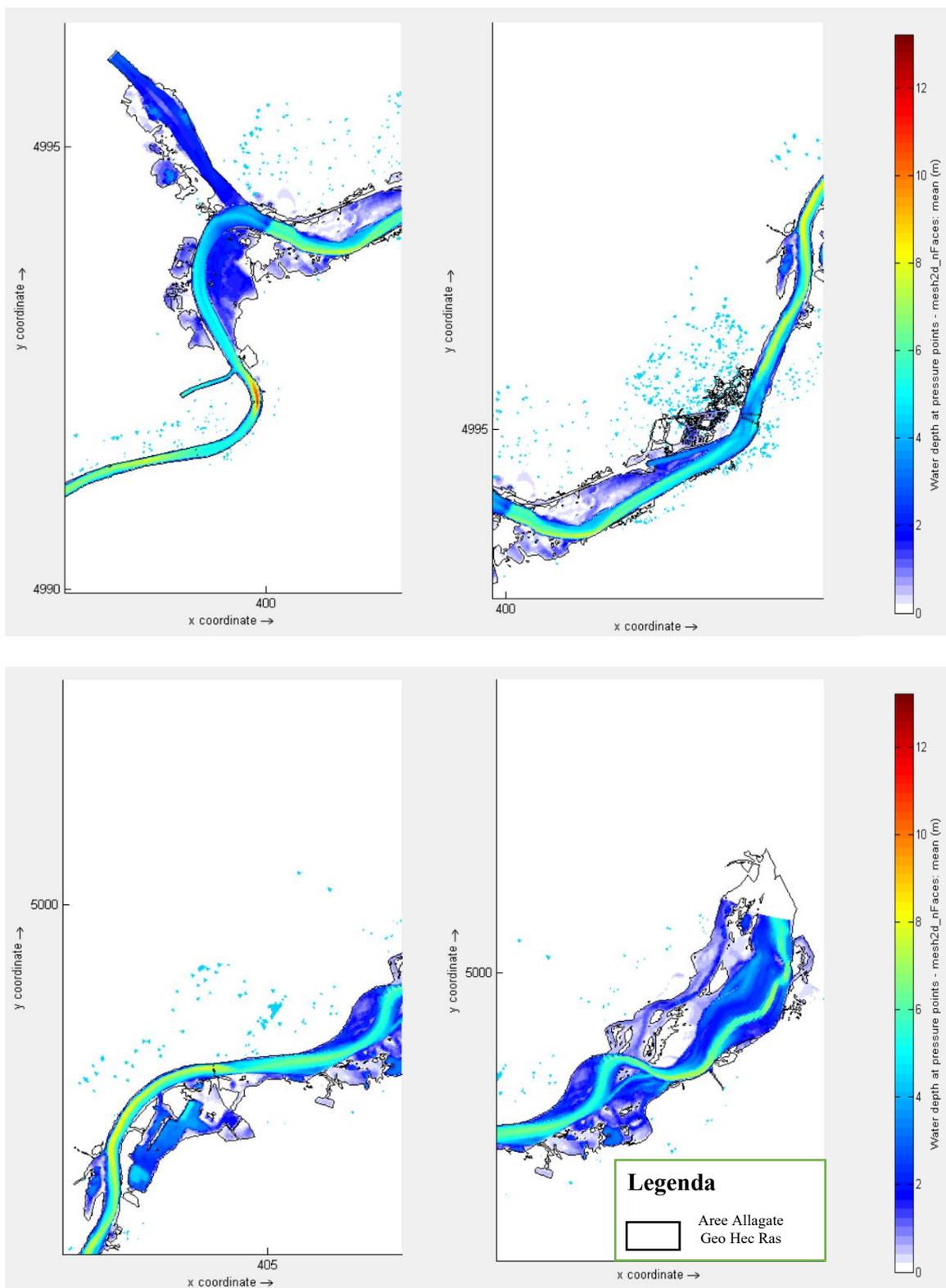


Fig. 43 - Confronto Taratura Geo Hec Ras – Delft3D (Aree allagate Geo Hec Ras segnate come contorno in nero) dalla confluenza Dora Riparia fino a valle modello idraulico

7. SCENARI DI CALCOLO

In questo capitolo verranno discussi gli scenari di calcolo utilizzati dopo la taratura del modello, le ipotesi fatte, i motivi della scelta degli scenari supposti e le metodologie adottate nel calcolo e nella valutazione dei risultati.

Si è deciso di proseguire le analisi con il solo software Geo Hec Ras, in quanto risulta molto più semplice gestire modelli idraulici di grandi dimensioni e consente di effettuare modifiche in maniera semplice e veloce, aspetto fondamentale nella modellazione idraulica. Come è ben noto, infatti, spesso la discretizzazione spaziale ha bisogno di essere infittita in determinate aree, oppure si può avere la necessità di inserire delle nuove breaklines o di espandere l'area in esame qualora le aree allagate interessino i limiti di scorrimento. Tali modifiche risultano leggermente più complicate nel software Delft3D poiché occorre rigenerare parti della griglia, allinearle alle "land boundaries" e simultaneamente rispettare il parametro di ortogonalità. Questa operazione è automatica in Geo Hec Ras, poiché basta semplicemente infittire la mesh in zone in cui si vuole maggior precisione, tracciare le nuove breaklines oppure effettuare un "reshape" dei limiti di scorrimento, e successivamente effettuare un "rebuilt" della mesh; in tal modo il software crea la nuova mesh con le modifiche effettuate in modo automatico.

Come già accennato all'inizio di questo documento, si è pensato di valutare le aree allagate considerando lo scenario per cui gli idrogrammi degli affluenti sono in fase con l'idrogramma del corso d'acqua principale (condizione più gravosa) e la condizione in cui questi risultano invece sfasati.

Purtroppo non si hanno a disposizione gli idrogrammi riferiti ai diversi tempi di ritorno, ma gli unici dati a disposizione sono i valori di picco delle portate per i diversi tempi di ritorno, presenti nel documento "Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni (Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010) - Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale" redatto dall'autorità di bacino del fiume Po. (Tab. 5). Questo ha portato all'utilizzo di idrogrammi triangolari di durata ventiquattro ore nelle trattazioni successive.

Tab. 5 - Portate di Picco a diversi tempi di ritorno (* fornita da AIPO)

Corso d'acqua	Stazione	Portata di Picco [mc/s]		
		TR 20	TR 200	TR 500
Po	Carignano	1600	2400	2720
	Moncalieri	1750	2700	3100
	San Mauro Torinese	2800	4300	4800
Chisola	La Loggia	313*	400	450
Sangone	Torino	217	580	900
Dora Riparia	Torino	300	630	890
Stura di Lanzo	Torino	1240	2080	2440

7.1 Propagazione dell'onda di Piena nel Po

Per studiare il comportamento e l'evoluzione delle portate dei maggiori corsi d'acqua, l'ingegneria civile idraulica si basa su differenti e molteplici modelli, con rispettivi pregi e difetti. Essi fanno tutti riferimento a due equazioni fondamentali che li governano, ovvero l'equazione del moto (teorema di Bernoulli applicato alle correnti di moto vario) e l'equazione di continuità applicata alle correnti. Insieme prendono anche il nome di equazioni di De Saint-Venant, già trattate nel paragrafo 4.2.1.

Nella pratica si sfruttano modelli meno sofisticati che approssimano le equazioni di S. Venant; fra i più importanti si hanno: il modello idraulico cinematico e il modello idraulico parabolico.

Il primo è fin troppo semplicistico e trascura totalmente il contributo dell'altezza d'acqua h e della velocità u . La sua semplicità ha come difetto la scarsa precisione. Come conseguenza lo studio delle portate di piena nel tempo risente solo dell'effetto di traslazione, trascurando totalmente l'effetto di laminazione delle portate. L'onda nel propagarsi, inoltre, si deforma e ciò a causa della dipendenza dalla portata dalla celerità, che quindi risulta massima per la portata di picco. Il modello fa parte a sua volta dei modelli detti espliciti.

Il secondo, ovvero il modello parabolico, trascura solamente il contributo della velocità nell'equazione del moto. Esso è il modello che più si avvicina allo studio esatto dell'equazione di S. Venant e permette un'analisi accurata della portata di piena con possibilità di previsione precisa della portata a valle in quanto tiene conto sia dell'effetto di traslazione che dell'effetto di laminazione. Questo è quello maggiormente utilizzato dai software di modellazione idraulica. (Si rimanda al Manuale del Software Hec-Ras per ulteriori approfondimenti).

La propagazione dell'onda di piena nel Po è stata ricavata semplicemente simulando il modello idraulico bidimensionale con le sole condizioni al contorno di Monte e Valle, non tenendo conto cioè del contributo dovuto agli affluenti. In questo modo, tracciando delle sezioni in prossimità degli affluenti, è stato possibile ricavare la portata in funzione del tempo nella suddetta sezione. Da questi idrogrammi si è ricavato, approssimativamente, l'istante in cui il picco di piena arriva alla confluenza di ogni affluente.

È chiaro che la precisione dell'istante di arrivo del picco di piena dipende dalla discretizzazione temporale di output, la quale è stata fissata a cinque minuti.

Si sono eseguite simulazioni utilizzando portate con tempi di ritorno rispettivamente di venti, duecento e cinquecento anni. Si riportano di seguito gli idrogrammi riferiti alla propagazione dell'onda di piena nel Po considerando i suddetti tempi di ritorno ottenuti nelle rispettive sezioni di confluenza considerate.

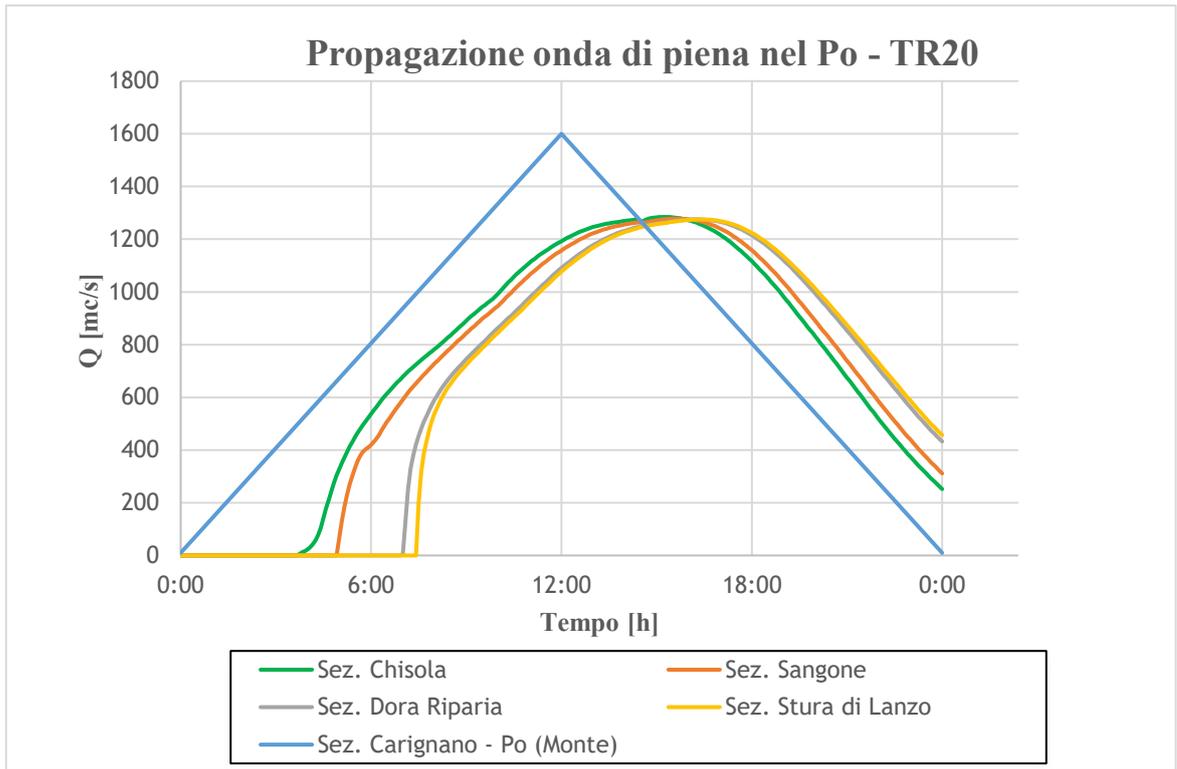


Fig. 44 – Idrogrammi propagazione onda di piena nel Po – TR20

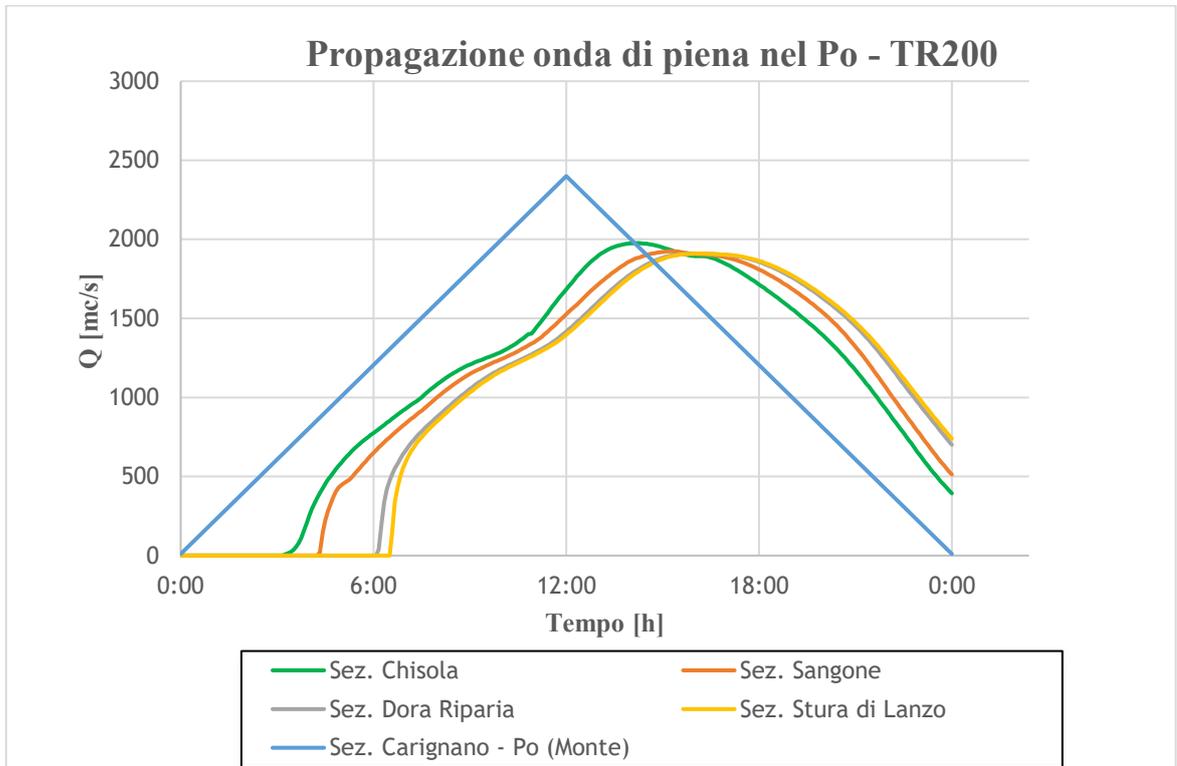


Fig. 45 - Idrogrammi propagazione onda di piena nel Po – TR200

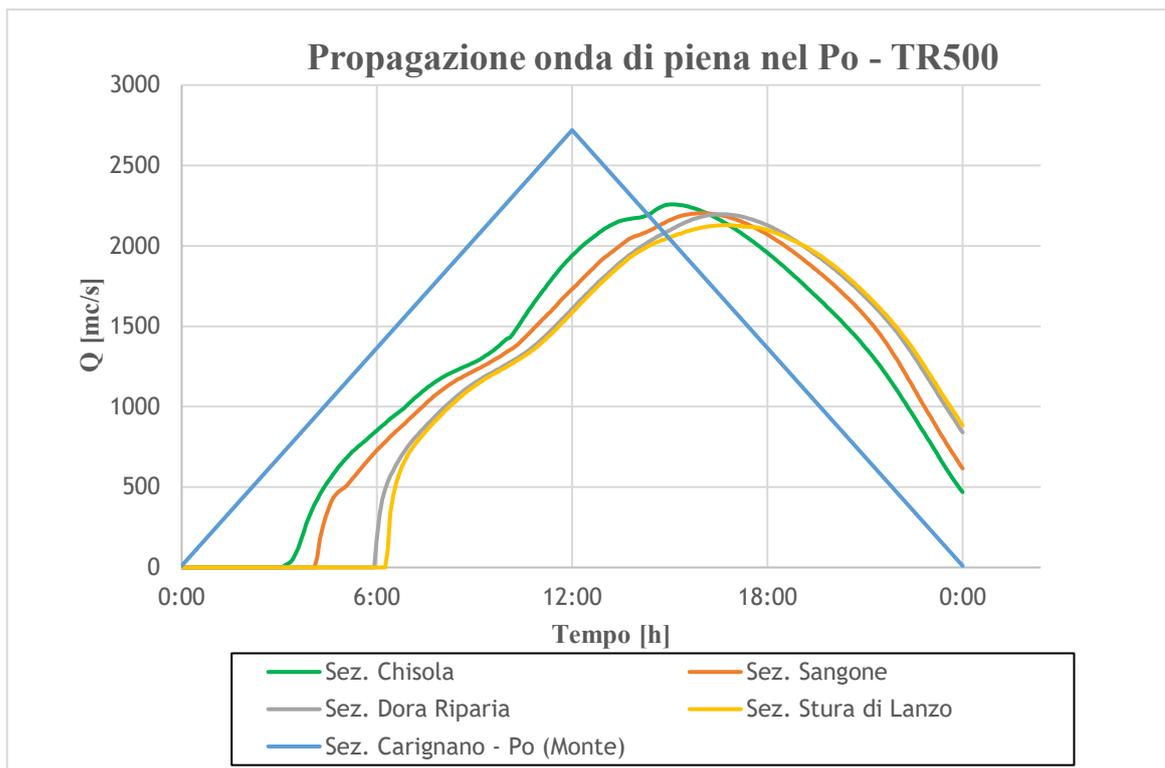


Fig. 46 - Idrogrammi propagazione onda di piena nel Po – TR500

Da questi si evince l'istante di arrivo dei picchi in corrispondenza degli affluenti, come riassunto dalla tabella seguente:

Tab. 6 - Dati riferiti alla propagazione dell'onda di piena nel Po

	Istante di arrivo del picco di piena [h:m]		
Sezione	TR =20	TR=200	TR=500
Carignano - Po (Monte)	12:00 AM	12:00 AM	12:00 AM
Confluenza Chisola	15:15 PM	14:10 PM	15:05 PM
Confluenza Sangone	15:40 PM	15:15 PM	16:00 PM
Confluenza Dora Riparia	16:15 PM	16:00 PM	16:35 PM
Confluenza Stura di Lanzo	16:25 PM	16:10 PM	16:45 PM
	Valore del picco di piena [mc/s]		
Sezione	TR =20	TR=200	TR=500
Carignano - Po (Monte)	1600	2400	2720
Confluenza Chisola	1284.294	1975.739	2258.179
Confluenza Sangone	1277.727	1924.628	2203.224
Confluenza Dora Riparia	1275.222	1910.477	2196.802
Confluenza Stura di Lanzo	1275.085	1909.715	2128.778

7.2 Scenario idrogrammi in fase – TR20

Una volta calcolati gli istanti di arrivo del picco dell'onda di piena che si propaga nel Po, si è deciso di effettuare delle simulazioni considerando gli idrogrammi degli affluenti in fase con quelli del corso d'acqua principale, di fatto operando una traslazione rigida sull'asse dei tempi.

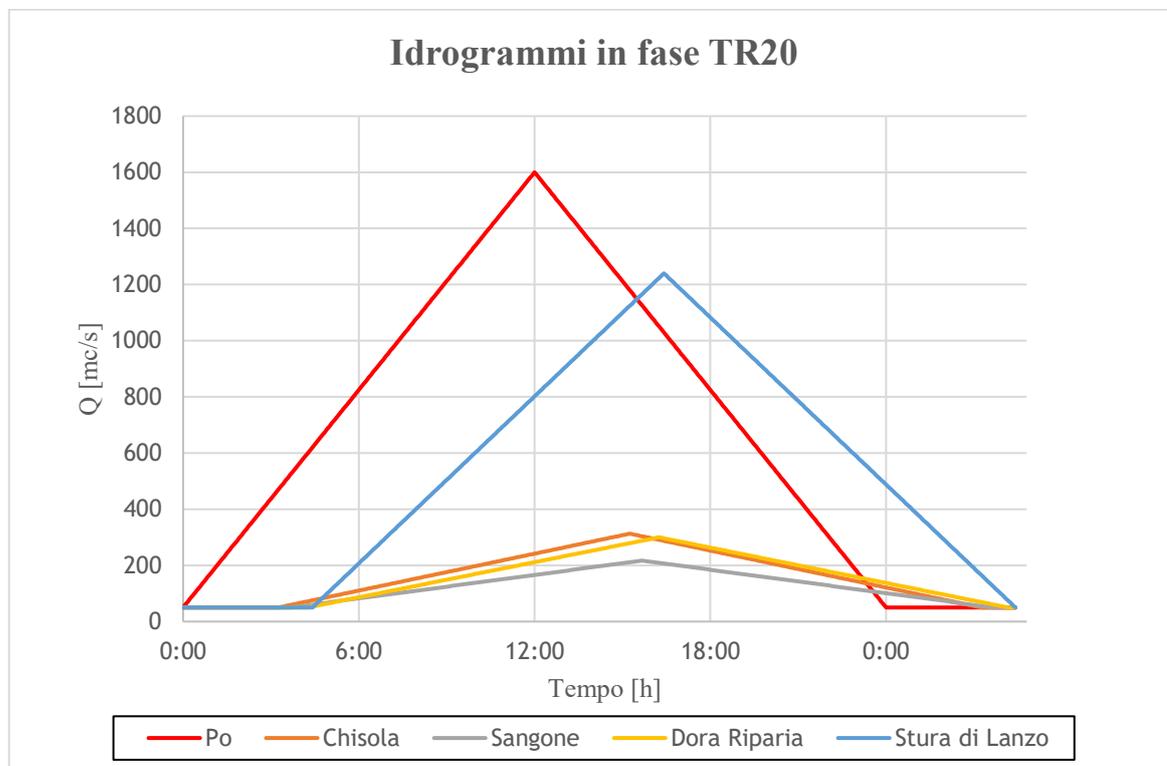


Fig. 47 – Idrogrammi in fase TR20

Le aree allagate sono riportate negli allegati 1,2 e 3. Da questi è possibile visionare che, nonostante i tempi di ritorno siano relativamente bassi, l'ipotesi "idrogrammi in fase" genera delle problematiche non particolarmente rilevanti ma che è bene tenere in considerazione.

A monte del modello le aree allagate interessano principalmente campi e laghi per cui non si hanno particolari problematiche, a differenza delle zone nei pressi del Comune di Moncalieri dove il flusso, causa della presenza di sottopassi lungo l'autostrada A6 e lungo la ferrovia, riesce a raggiungere anche Corso Savona e via Luigi Einaudi provocando allagamenti anche in una ristretta zona periferica dove si trovano principalmente attività commerciali.



Fig. 48 – Aree Allagate in prossimità dell’autostrada A6 e la ferrovia nel Comune di Moncalieri

Proseguendo verso valle, particolare attenzione va posta nella zona del Parco delle Vallere (Moncalieri) poiché la presenza della confluenza con il fiume Sangone genera delle aree allagate molto estese che, nonostante portate con tempo di ritorno venti anni, si estendono fino al rilevato stradale dell’autostrada A6.



Fig. 49 - Aree Allagate nella zona del Parco delle Vallere nel Comune di Moncalieri

Occorre segnalare che in sinistra orografica del Sangone si ha una piccola zona allagata che interessa dei lotti privati adibiti a parcheggio.

In destra orografica, invece, si hanno degli allagamenti che interessano zone di verde pubblico e zone private adibite a sport e ricreazione, mentre la zona residenziale non viene raggiunta.

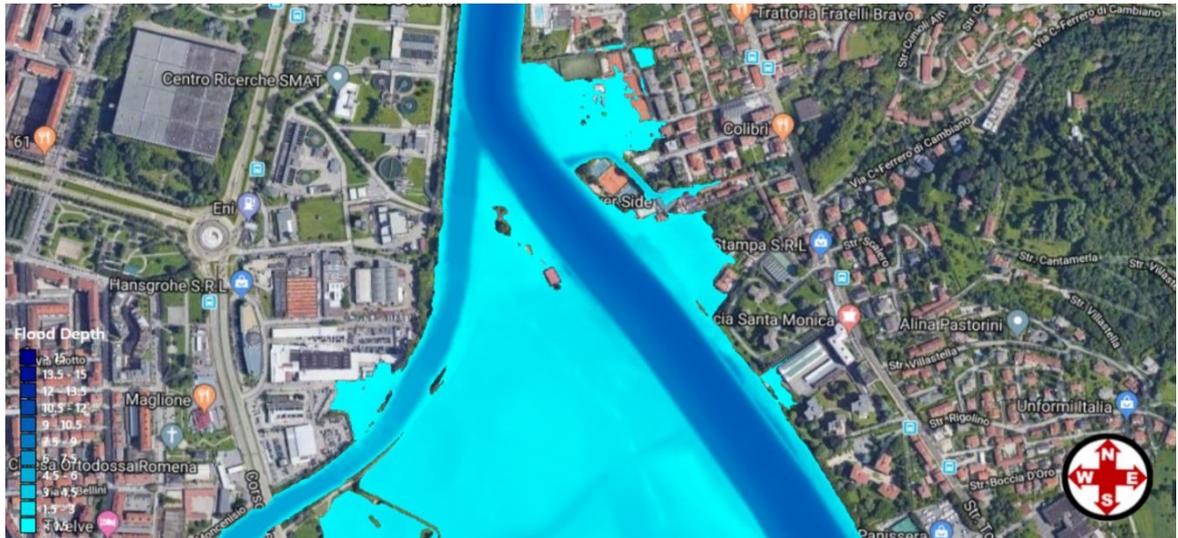


Fig. 50 – Aree allagate in prossimità della confluenza con il torrente Sangone

Proseguendo verso valle, non si hanno particolari zone di allagamento da segnalare, principalmente perché il corso d'acqua presenta argini in destra e sinistra orografica.

In prossimità del cimitero di Sassi, occorre riportare che l'argine in destra orografica viene sormontato ma questo non crea particolari problemi alle zone residenziali poiché si generano inondazioni che interessano parchi e campi.

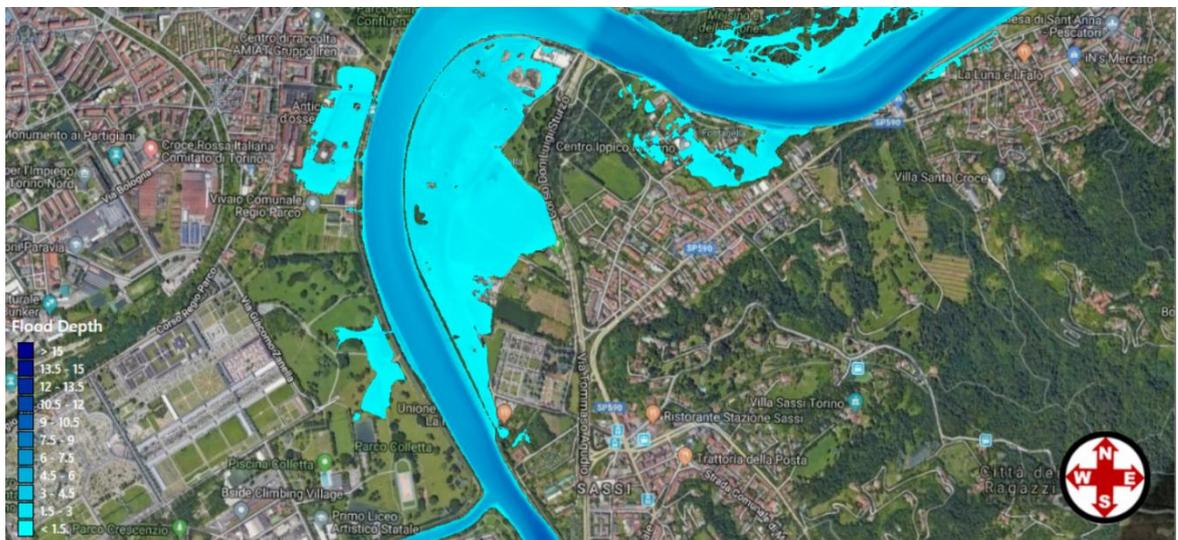


Fig. 51 - Aree allagate in prossimità delle confluenze con i fiumi Dora Riparia e Stura di Lanzo

Dal Ponte Diga fino alla fine del modello non ci sono altre problematiche da segnalare. L'acqua rimane per la maggior parte del percorso all'interno dell'alveo di magra e dove questo non si verifica si generano delle inondazioni non troppo estese che interessano campi.

7.3 Scenario idrogrammi in fase - TR200

Gli idrogrammi utilizzati per questo scenario sono i seguenti:

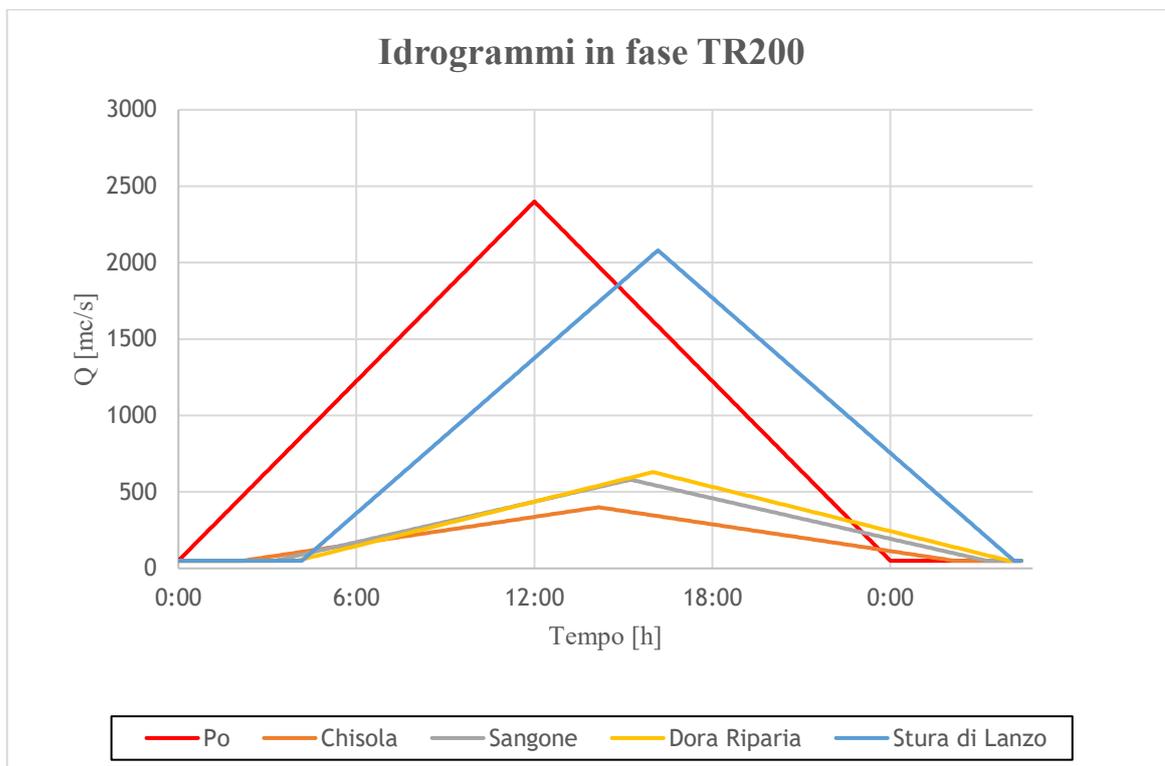


Fig. 52 - Idrogrammi in fase TR200

Le aree allagate sono riportate negli allegati 4,5,6,7,8 e 9. Da questi è facilmente intuibile la maggior estensione delle aree allagate rispetto al caso precedente. E' bene precisare che la condizione considerata è quella più sfavorevole poiché, la condizione per cui la portata di un corso d'acqua eguagli quella riferita a tempo di ritorno duecento anni risulta un evento con probabilità di accadimento bassa. In aggiunta, ipotizzare che sia il corso d'acqua principale che i suoi affluenti abbiano tutti portate uguali a tempo di ritorno duecento e che queste arrivino in fase al corso d'acqua principale risulta una condizione ancora più svantaggiosa, che conduce a sovrastime delle aree allagate. Ai fini della presente tesi di laurea, considerare un evento così definito ci consente di valutare le criticità a cui si può andare incontro nel caso in cui si dovessero verificare nella realtà scenari così svantaggiosi.

A monte il modello genera inondazioni che interessano principalmente campi, che si estendono in larghezza fino alla borgata "La Gorra" (TO) e fino alla frazione "Tetti Sapini" nel comune di Moncalieri. (Allegato 4)

L'argine in destra orografica del Chisola viene sormontato, in quanto gli idrogrammi del torrente Chisola e del fiume Po arrivano in fase. Infatti, nel tratto di torrente considerato si genera un rigurgito che fa incrementare i tiranti idrici all'interno del torrente facendo sì che l'argine non riesca a contenere tali tiranti. Nonostante i sormonti, questo apporto d'acqua non crea particolari problemi alle zone residenziali vicine ad eccezione del comune di Moncalieri, in cui la presenza di 4 attraversamenti ravvicinati fra di loro (Attraversamento autostrada A6, Attraversamento Ferroviario, Attraversamento Via Martiri della Libertà, Ponte dei Cavalieri Templari) riduce consistentemente la sezione fluviale, generando dunque un rigurgito e incrementando i tiranti idrici che riescono a sormontare anche l'argine sinistro del Chisola. La parte situata in sinistra orografica del comune di Moncalieri presenta delle zone inondate che si estendono dalla strada Carpice fino al rilevato ferroviario. Parziale contributo ha anche il torrente Sangone che, incrementando l'apporto d'acqua nella zona parco delle Vallere, spinge le aree allagate a passare sotto i piloni del viadotto dell'autostrada A6, contribuendo a far estendere l'area fino alla Strada Carignano.

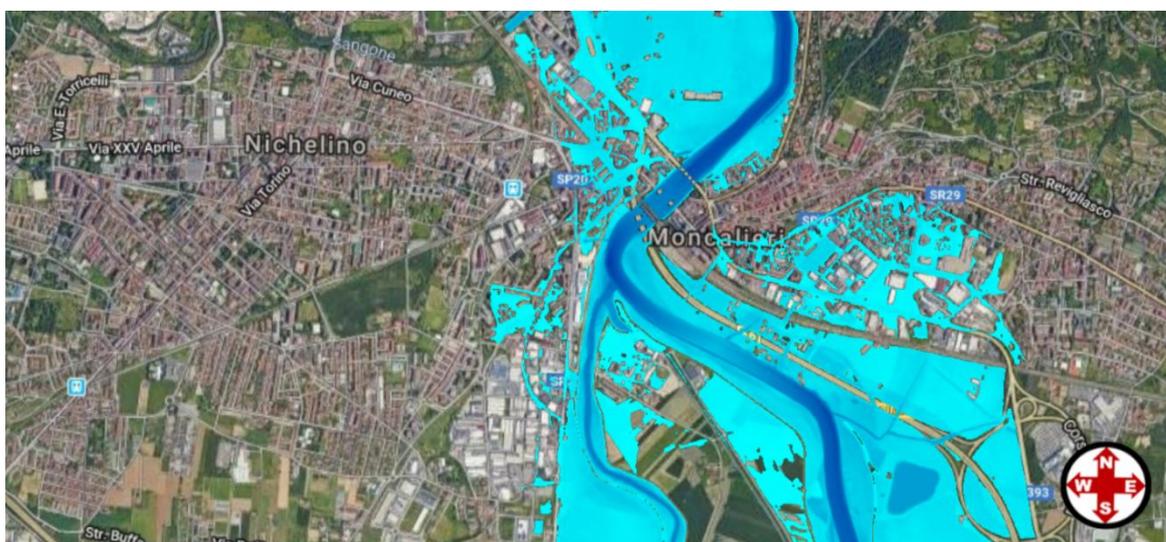


Fig. 53 – Aree allagate Comune di Moncalieri

La parte situata in destra orografica del Comune di Moncalieri presenta delle aree allagate che si estendono dal rilevato ferroviario fino alla strada regionale 29 (SR29). Tale area allagata è dovuta principalmente alla presenza di fornici e di sottopassi, sia nel rilevato autostradale sia nel rilevato ferroviario (Fig.31 e 32).

In prossimità del Parco lungo Po, si hanno degli allagamenti che interessano, oltre al parco stesso, anche un lotto residenziale fino alla Strada Torino.



Fig. 54 - Aree allagate zona parco lungo Po – segnata in rosso

A monte e a valle di Corso Trieste il Sangone genera degli allagamenti in sinistra orografica: a monte del ponte le aree allagate sono confinate da Corso Roma e via V.Bellini interessando anche degli edifici residenziali, mentre a valle le aree allagate interessano un lotto con edifici prettamente commerciali e confinate dallo stesso corso Trieste.



Fig. 55 - Aree allagate zona Corso Trieste

Alla confluenza con il torrente Sangone si hanno aree allagate sia in destra che in sinistra orografica: la parte destra riguarda strutture sportive, verde pubblico e in parte edifici residenziali, mentre la parte sinistra riguarda l'International training centre of the ILO e United Nation System Staff College.

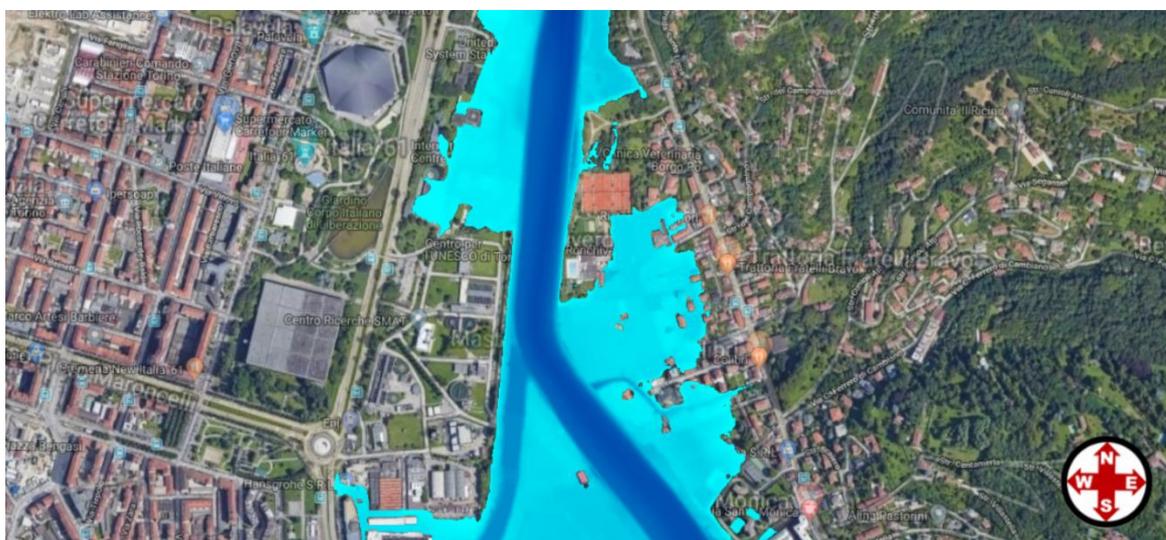


Fig. 56 – Aree allagate confluenza Sangone

Poco più a valle si osserva un'intera zona alla sinistra di corso Moncalieri completamente allagata, all'interno della quale si trovano strutture sportive e ricreative.

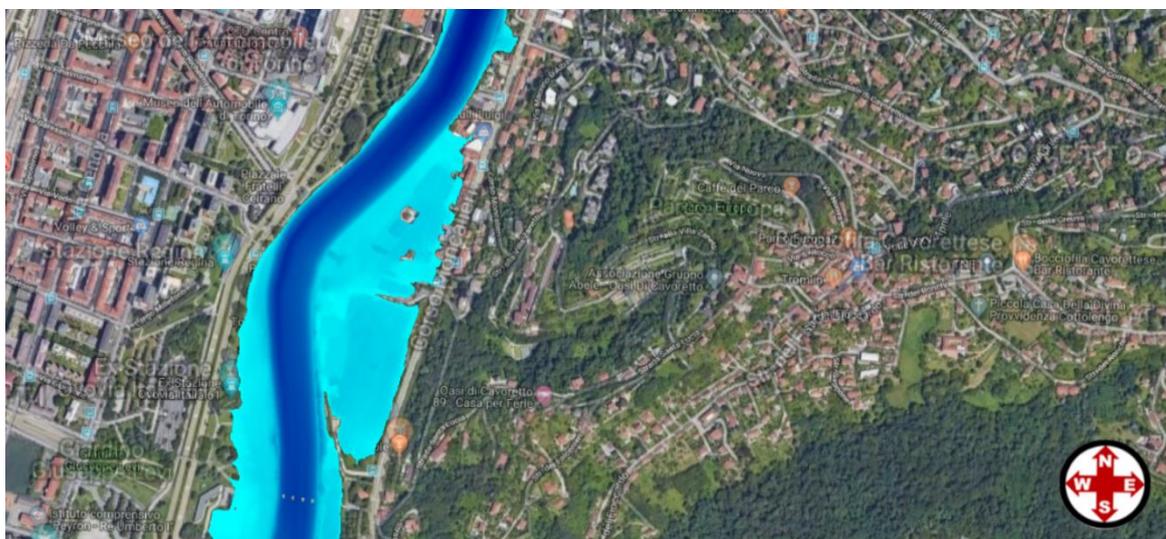


Fig. 57 – Aree allagate in prossimità di Corso Moncalieri

In zona Borgo Pilonetto si hanno delle zone allagate che interessano perlopiù strutture a carattere ricreativo estivo e il parco del Fioccardo.

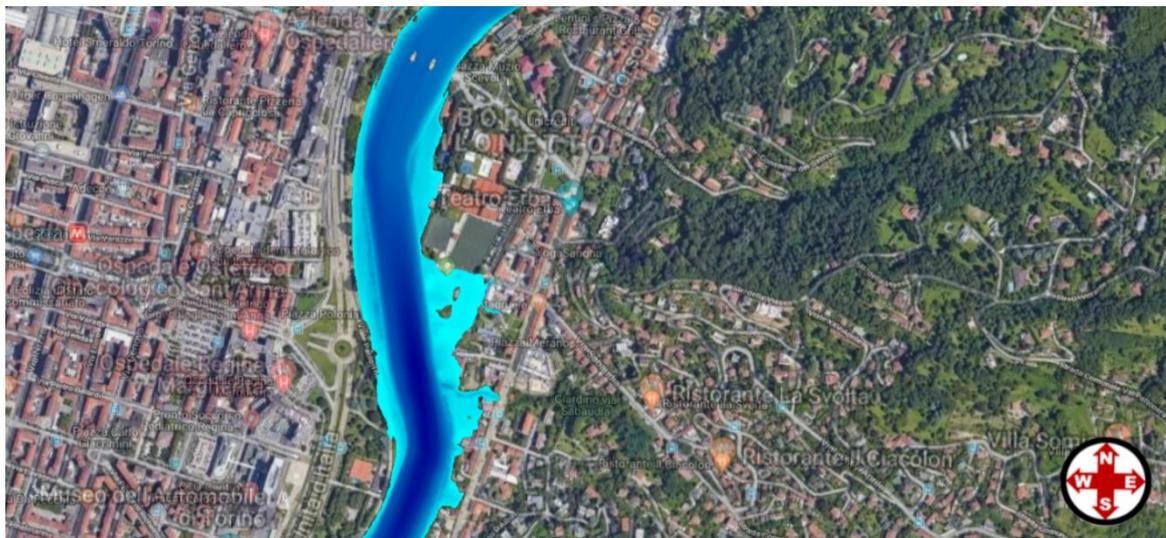


Fig. 58 - Aree allagate in prossimità del Borgo Pilonetto

Occorre segnalare anche una zona allagata del borgo Medievale e altre zone più a valle come le strutture della Società Canottieri Cerea, Strutture in prossimità delle sponde fluviali come ristoranti lungo il Po, strutture sportive e discoteche.

In zona Vanchiglietta è importante segnalare delle piccole inondazioni in destra orografica, le quali hanno generato dei tiranti di trenta-quaranta centimetri che interessano corso Casale e alcune zone residenziali subito a ridosso della sponda del fiume.

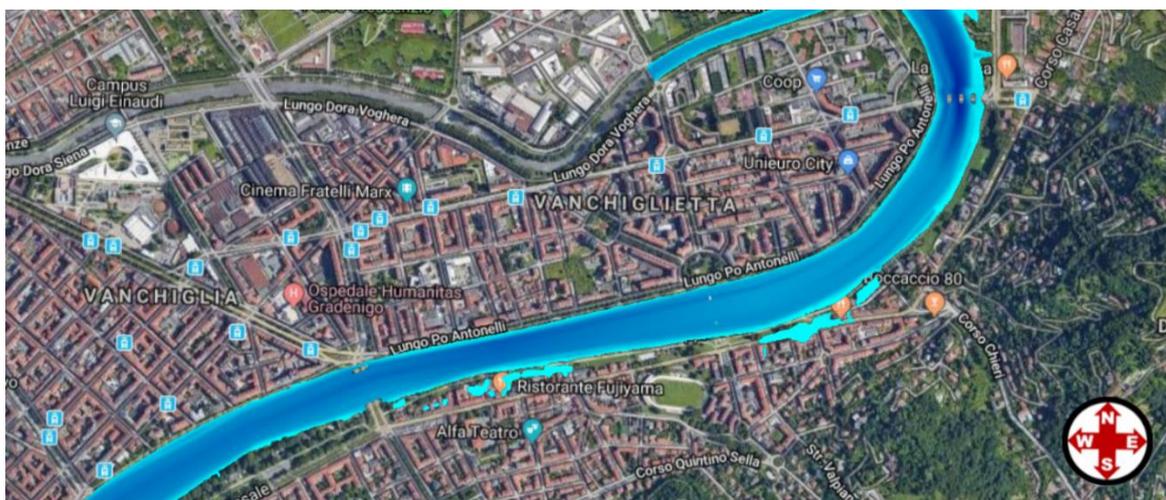


Fig. 59 - Aree allagate zona Vanchiglietta

Alla confluenza con il torrente Stura di Lanzo l'acqua copre completamente la zona del Meisino, risparmiando comunque la zona residenziale in destra orografica; sono interessate aree verdi, il centro ippico del Meisino e la Spiaggia paradiso dei cuori. In sinistra orografica invece l'allagamento comprende tutto l'isolone di Bertolla e alcune zone residenziali dell'omonimo quartiere di Torino oltrepassando il canale derivatore AEM.

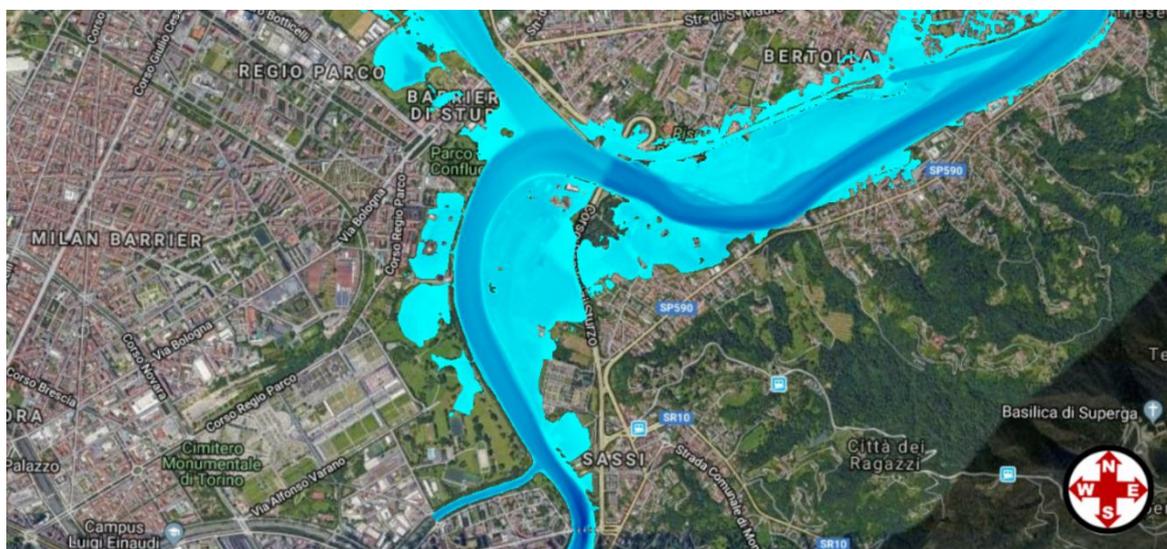


Fig. 60 - Aree Allagate nei pressi di Bertolla

Parallelamente al canale derivatore AEM ma sul fronte opposto si ha una zona residenziale/commerciale interessata da allagamenti, in particolare alcuni edifici presenti a ridosso del lungo Po Venezia e gli edifici confinati dalla Via Po e dalla SP590.

Particolare attenzione va posta al Comune San Mauro Torinese, uno dei comuni che viene spesso colpito durante le piene. Esso si trova confinato da due opere idrauliche, Ponte Diga subito a valle della confluenza con il torrente Stura di Lanzo e Diga Cimeno a valle del Comune. Inoltre, a monte della diga si hanno il Ponte XI Settembre e il Ponte Vittorio Emanuele che contribuiscono ad ostacolare il normale corso della portata.

Gli allagamenti interessano sia la parte di città in destra orografica (in quantità minore) con tiranti idrici medi di quaranta centimetri, sia la parte di città in sinistra orografica dove le aree allagate si estendono fino a Via Speranza e Via Aosta ma con tiranti dell'ordine dei settanta centimetri in media.

Occorre osservare che già durante l'alluvione dell'Ottobre 2000 ci furono allagamenti nel Comune di San Mauro Torinese con portate misurate dell'ordine di 2000 mc/s, mentre con lo scenario ipotizzato le portate arrivano a più di 5000 mc/s, più del doppio dell'alluvione. Pertanto, ci si aspetta un comportamento di questo tipo.



Fig. 61 - Aree Allagate nei pressi del Comune di San Mauro

Proseguendo verso valle non si riscontrano problematiche particolari, nonostante le portate siano molto alte, le aree allagate interessano campi, boschi e parchi, in particolare il Parco Fluviale del Po e il Bosco dei Goretto mentre il Depuratore Centrale SMAT non viene interessato dagli allagamenti.



Fig. 62 - Aree Allagate nei pressi del Depuratore Centrale Smat

7.4 Scenario idrogrammi in fase – TR500

Si è visto come considerare gli idrogrammi degli affluenti in fase con il Po porti a conseguenze e criticità da non sottovalutare. È chiaro che, come già detto in precedenza, l'evento ha una probabilità bassa di accadimento, per tal motivo si riporta il caso di TR500 in fase solo a scopo illustrativo.

Gli idrogrammi utilizzati per questo scenario sono i seguenti:

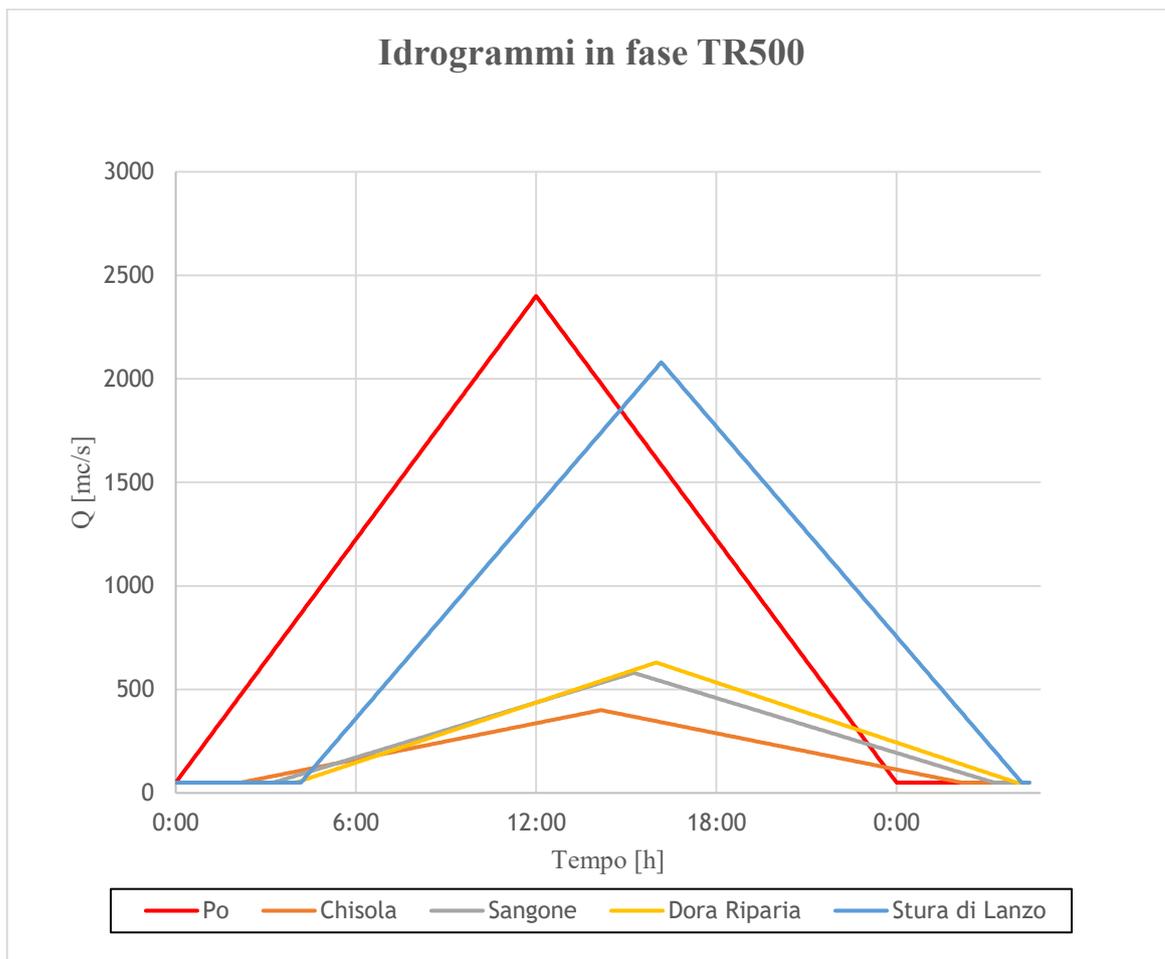


Fig. 63 - Idrogrammi in fase TR500

Le aree allagate sono riportate negli allegati 10,11,12,13 e 14.

Le criticità e le problematiche riscontrate nel caso precedente si ripresentano anche in questo caso con aree allagate molto più estese. Tuttavia, possono essere osservate alcune differenze sostanziali con il caso precedente: gli allagamenti in sinistra e in destra orografica del Chisola sono molto più ampi, il canale AEM che si diparte dalla diga La Loggia è completamente sommerso e le aree allagate, oltre ad interessare il Comune di Moncalieri, si estendono fino a Via Milano nel Comune di Nichelino.

In prossimità della confluenza con il torrente Sangone fino a monte del borgo Pillonetto si hanno degli allagamenti che si estendono in destra fino a Corso Moncalieri, mentre in sinistra fino a Corso Unità D'Italia non riuscendo ad oltrepassare, né nell'uno né nell'altro caso, i rilevati stradali. A valle non si hanno problematiche differenti rispetto al caso duecentennale fino alla zona Vanchiglia dove, in sinistra, il lungo Po Antonelli non viene mai sormontato, mentre in destra l'area allagata si estende fin oltre Corso Casale, interessando anche Via Boccaccio con annessi edifici residenziali e commerciali.

Alla confluenza con il Fiume Dora Riparia si hanno degli allagamenti nel Parco di Sassi, mentre più a valle si hanno le stesse problematiche viste per il caso precedente soprattutto nel Comune di San Mauro Torinese dove lo scenario è ancora più gravoso: le aree allagate sono più estese sia nella parte di comune in destra sia nella parte in sinistra ed inoltre i tiranti idrici adesso hanno l'ordine del metro. A valle del comune di San Mauro Torinese le aree allagate interessate sono molto simili al caso precedente, ma ovviamente l'estensione è maggiore.

7.5 Scenario idrogrammi non in fase – TR20

In questo scenario, per sfasare gli idrogrammi si è preso come riferimento il valore della portata di picco a San Mauro Torinese (Tab.5), portata che si ha dopo che tutti gli affluenti tenuti in considerazione hanno dato il loro apporto idrico. Con l'ausilio del software Excel si sono traslati gli idrogrammi sull'asse dei tempi (sempre considerati triangolari) in modo da ottenere come picco dell'idrogramma totale quello fornito a San Mauro Torinese. Si riportano di seguito gli idrogrammi traslati e la somma di questi; da notare come tale curva risultante assume una forma che generalmente caratterizza gli idrogrammi.

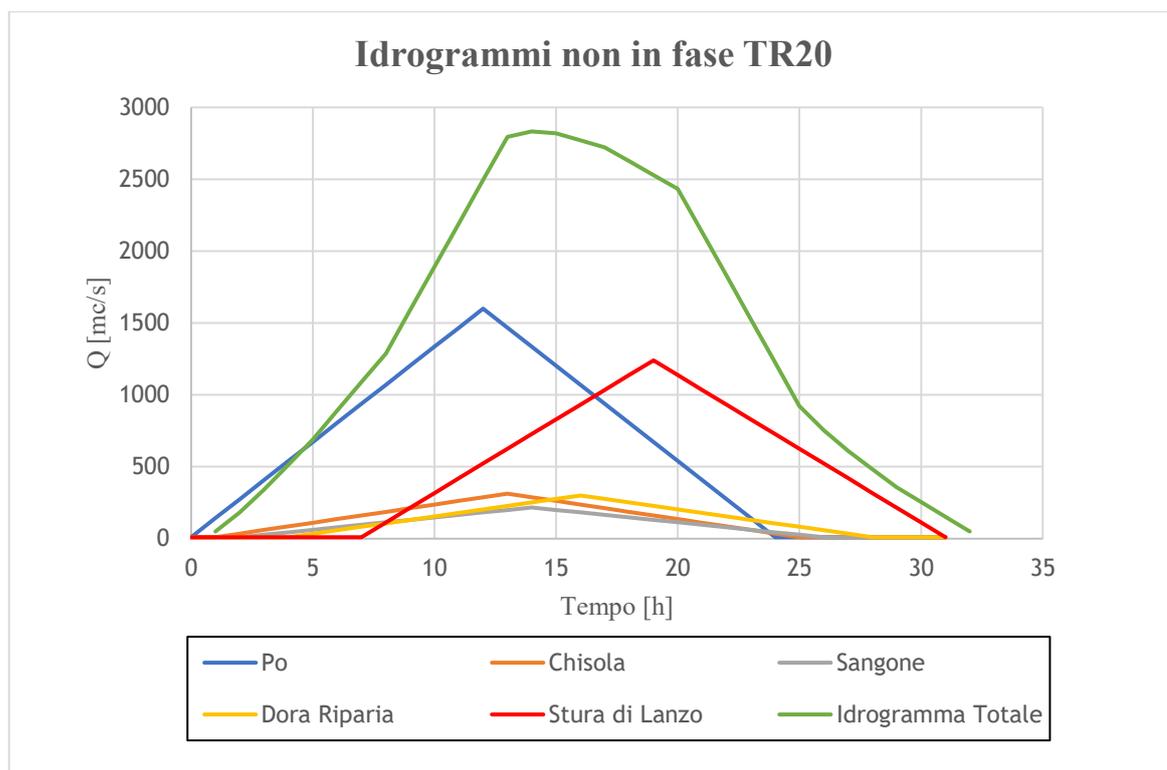


Fig. 64 - Idrogrammi non in fase TR20

Nella tabella seguente si riportano le traslazioni in termini di ore e il colmo ottenuto nell'idrogramma risultante:

Tab. 7 - Traslazione idrogrammi e colmo ottenuto TR20

	Po	Chisola	Sangone	Dora Riparia	Stura di Lanzo	Idrogramma Totale
Traslazione [h]	0	1	2	4	7	\
Q_{colmo} [mc/s]	1600	313	217	300	1240	2833

Come è possibile notare si è ottenuta una portata di colmo pari a 2833 mc/s a fronte dei 2800 mc/s forniti.

Così facendo i colmi di Chisola, Sangone e Stura di Lanzo arrivano prima di quello del Po mentre quello riferito alla Dora Riparia arriva quasi in fase con quello del Po.

Nonostante gli idrogrammi siano sfasati rispetto al caso precedente, le aree allagate risultano molto simili con differenze minime in relazione all'estensione di alcune aree allagate. Si riportano le principali differenze.

A monte le aree allagate sono identiche in quanto l'idrogramma di monte è uguale a quello del caso precedente. In prossimità della confluenza con il Chisola, a differenza di quanto ci si poteva aspettare, le aree allagate si presentano identiche allo stesso caso con gli idrogrammi in fase: questo è dovuto al fatto che il Chisola contribuisce all'apporto idrico con una portata molto più bassa rispetto a quella del Po, la quale rappresenta la componente principale che genera esondazioni soprattutto in destra orografica.

Fra i due affluenti Chisola e Sangone si ha una zona golenaria che in questo scenario presenta aree allagate leggermente minori.

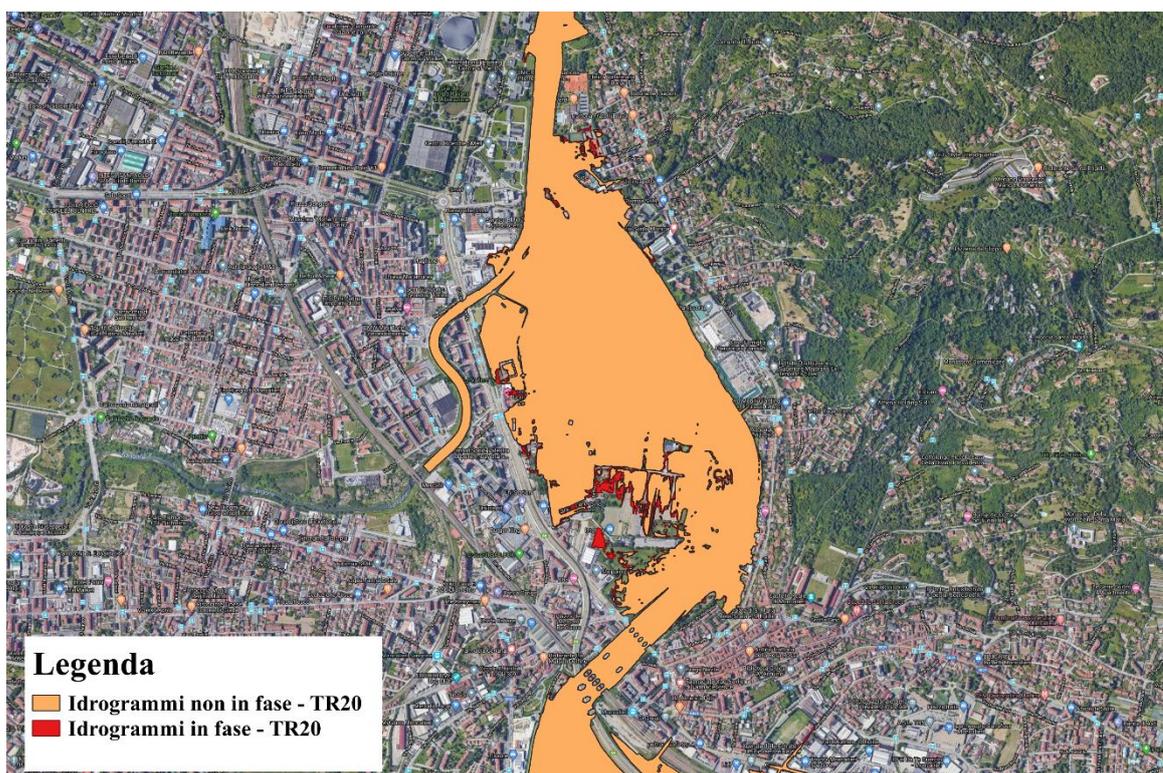


Fig. 65 -Confronto aree allagate nella zona golenale compresa fra Chisola e Sangone

Poiché le portate sono abbastanza basse, proseguendo verso valle l'acqua rimane all'interno del canale di magra fino alla confluenza con il fiume Dora Riparia; dunque le aree allagate risultano identiche al caso considerato con gli idrogrammi in fase.

Alcune differenze si hanno invece in prossimità della Stura di Lanzo e a valle della stessa, dove si hanno delle aree allagate minori soprattutto a valle del cimitero di Sassi e nell'isolone di Bertolla.

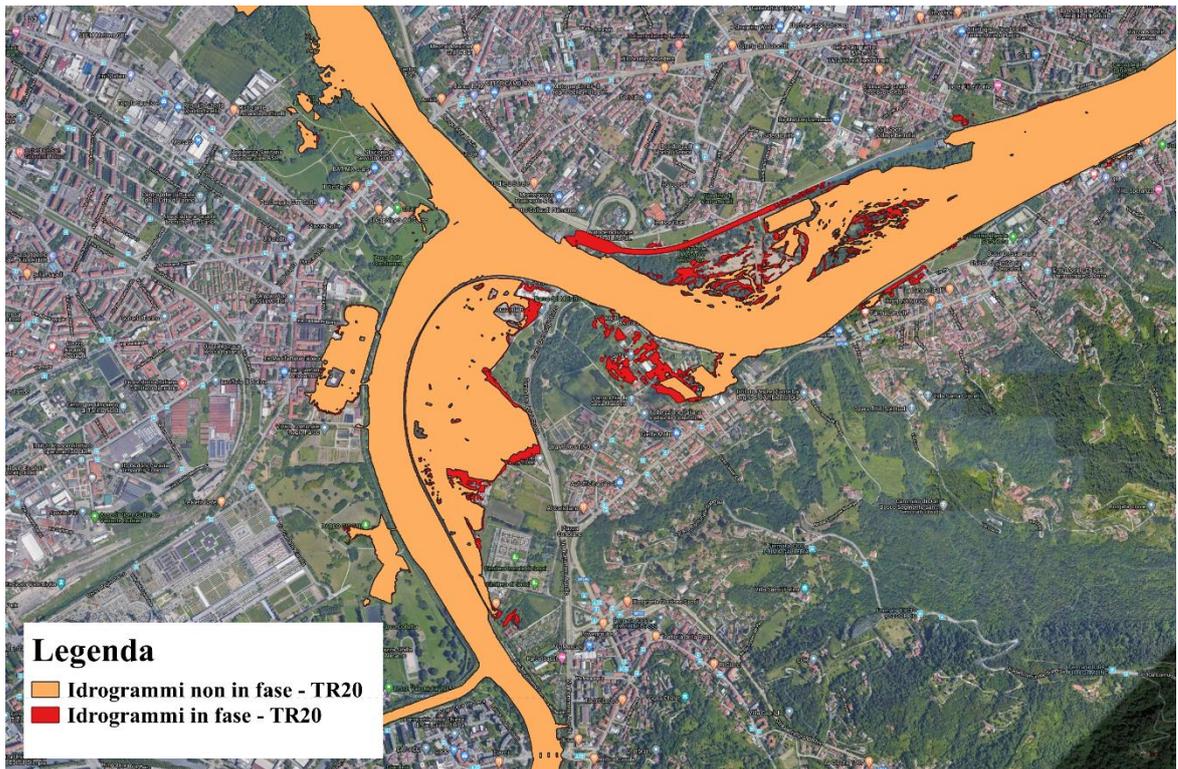


Fig. 66 - Confronto aree allagate nella zona di confluenza con il fiume Stura di Lanzo

A valle le aree allagate sono molto simili, solamente da segnalare la minor estensione in corrispondenza del parco fluviale del Po.

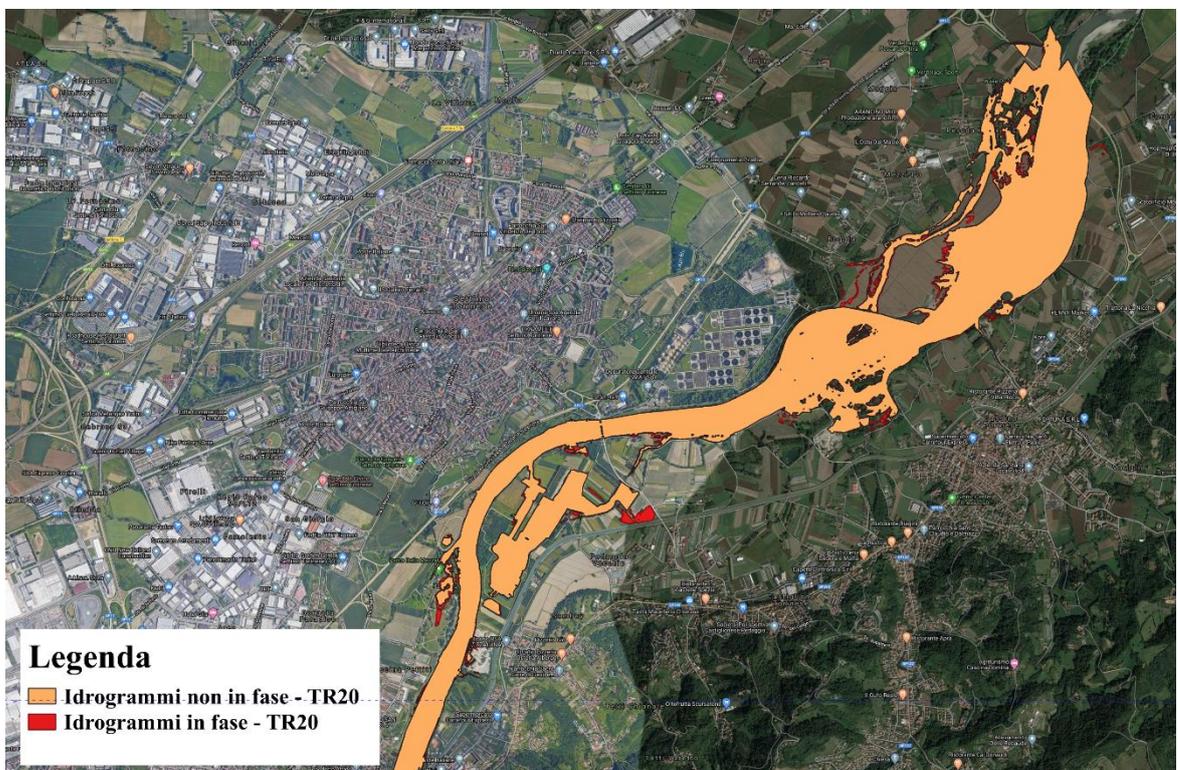


Fig. 67 - Confronto aree allagate nella zona di valle del Modello

7.6 Scenario idrogrammi non in fase – TR200

Analogamente al caso precedente si sono traslati gli idrogrammi in modo tale che l'idrogramma risultante restituisca un valore di colmo pari a quello fornito a San Mauro Torinese.

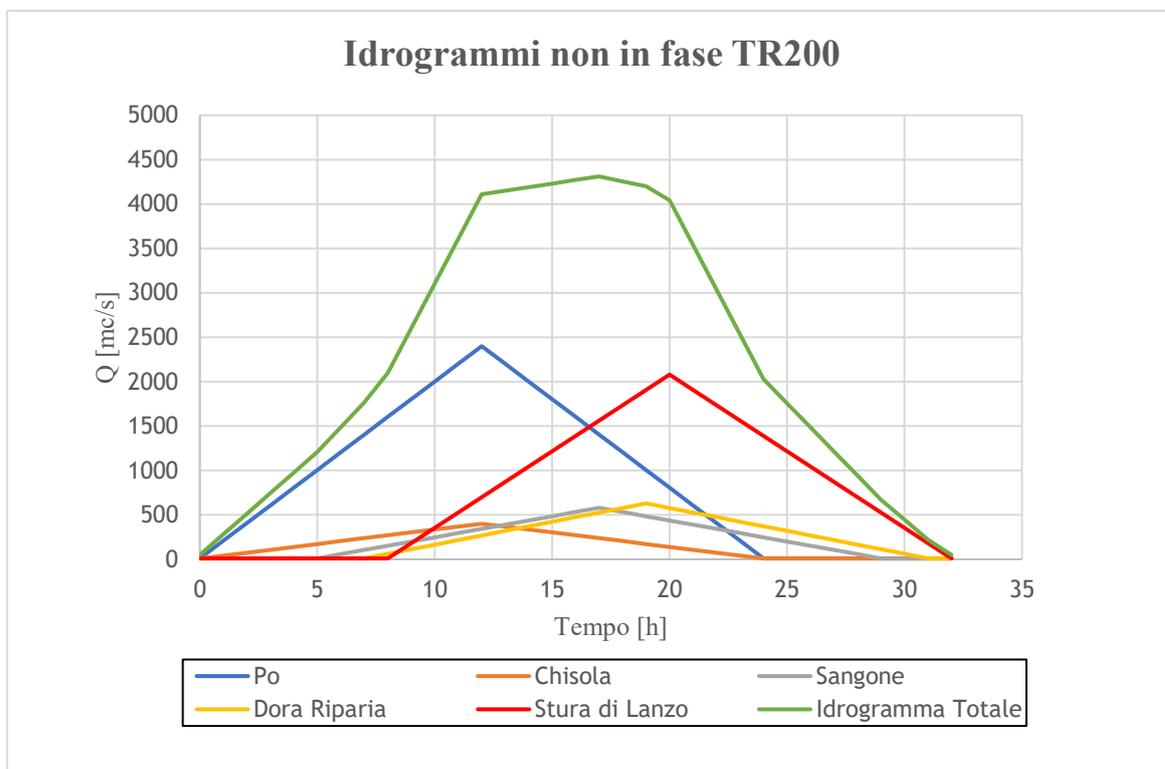


Fig. 68 - Idrogrammi non in fase TR200

Nella tabella seguente si riportano le traslazioni in termini di ore e il colmo ottenuto nell'idrogramma risultante:

Tab. 8 - Traslazione idrogrammi e colmo ottenuto TR200

	Po	Chisola	Sangone	Dora Riparia	Stura di Lanzo	Idrogramma Totale
Traslazione [h]	0	0	5	7	8	\
Q_{colmo} [mc/s]	2400	400	580	630	2080	4311

Come è possibile notare si è ottenuta una portata di colmo pari a 4311 mc/s a fronte dei 4300 mc/s forniti.

Con queste traslazioni quello che si ottiene è che il colmo del Chisola arriva prima del colmo del Po, mentre tutti gli altri arrivano dopo.

In prossimità del torrente Chisola si hanno aree allagate minori, principalmente dovute al minor rigurgito generato all'interno del torrente stesso; infatti, come precedentemente detto, il picco del torrente arriva prima alla confluenza rispetto al picco proveniente dal Po per cui il flusso viene ostacolato meno.

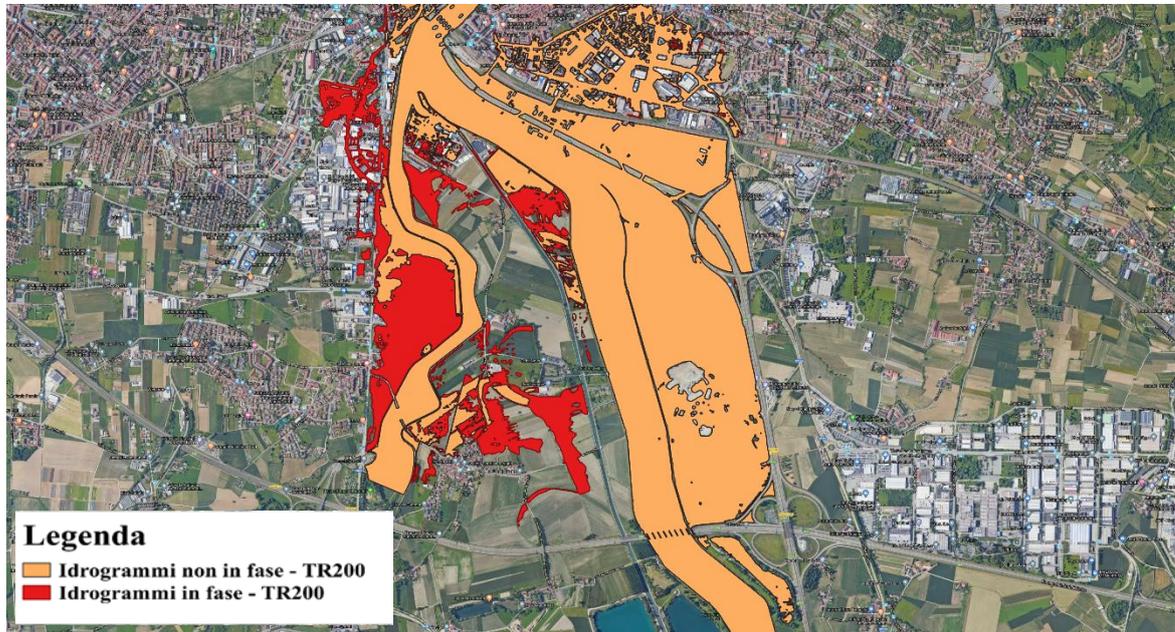


Fig. 69 – Confronto aree allagate in prossimità del tratto considerato del torrente Chisola

L'estensione delle aree allagate all'interno del Comune di Moncalieri si riducono soprattutto nella parte Sud, in quanto le aree allagate rimangono limitate alla Via Pastrengo, alla strada provinciale 20 e al rilevato ferroviario.

Anche nella parte di comune situata in destra orografica le aree allagate risultano meno estese ma sia nell'una che nell'altra parte i tiranti idrici rimangono mediamente gli stessi al caso studiato in cui si sono considerati gli idrogrammi in fase.

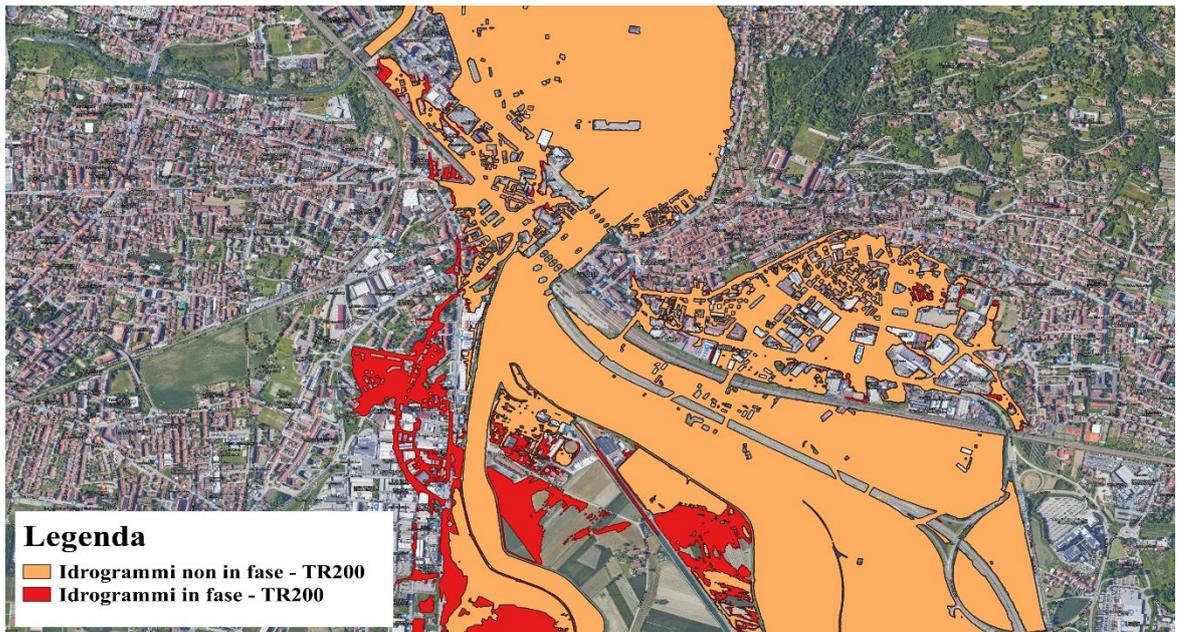


Fig. 70 - Confronto aree allagate in prossimità del Comune di Moncalieri

Dalla confluenza con il torrente Sangone fino alla zona Vanchiglietta, le aree allagate sono molto simili, indice del fatto che incrementi o decrementi di portata in questi tratti non generano particolari differenze in termini di estensione di aree allagate.

Nella zona Vanchiglietta, soprattutto la parte situata in destra orografica, presenta delle aree allagate minori che interessano questa volta solamente le aree verdi a ridosso della sponda destra del Po, qualche parcheggio e pochissimi edifici residenziali e commerciali, con tiranti idrici dell'ordine dei venti centimetri.

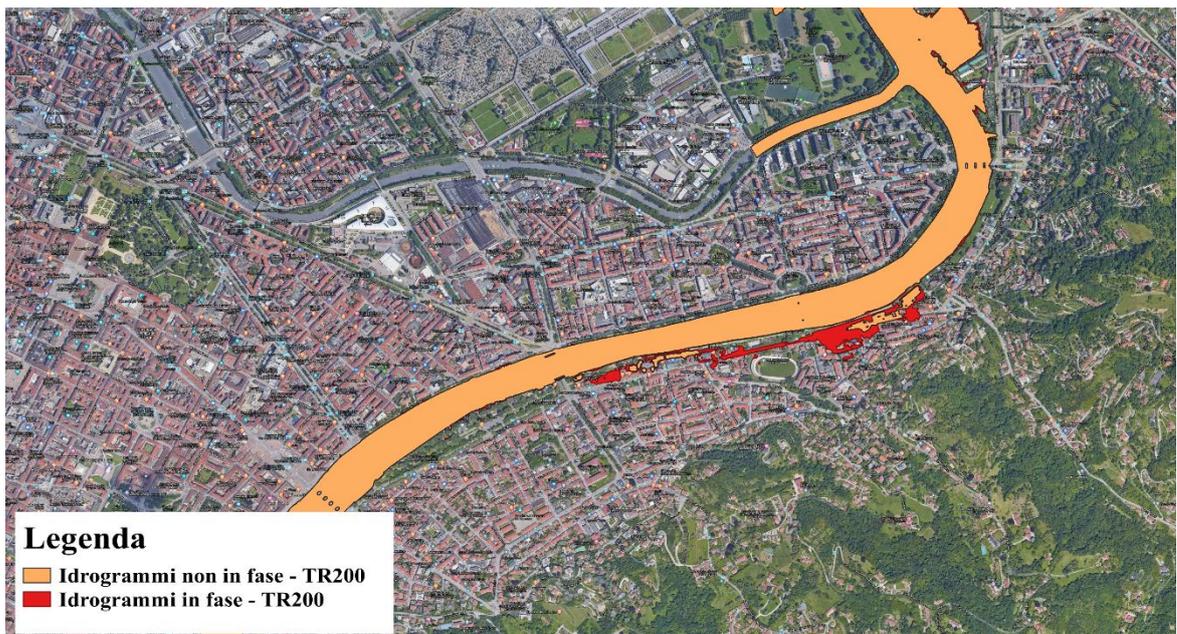


Fig. 71 – Confronto aree allagate zona Vanchiglietta

Anche nella zona del Comune di San Mauro Torinese, come ci si aspettava, si ha un'estensione minore delle aree allagate sia nella parte destra che nella parte sinistra, mentre i tiranti idrici rimangono mediamente gli stessi al caso trattato considerando gli idrogrammi in fase.

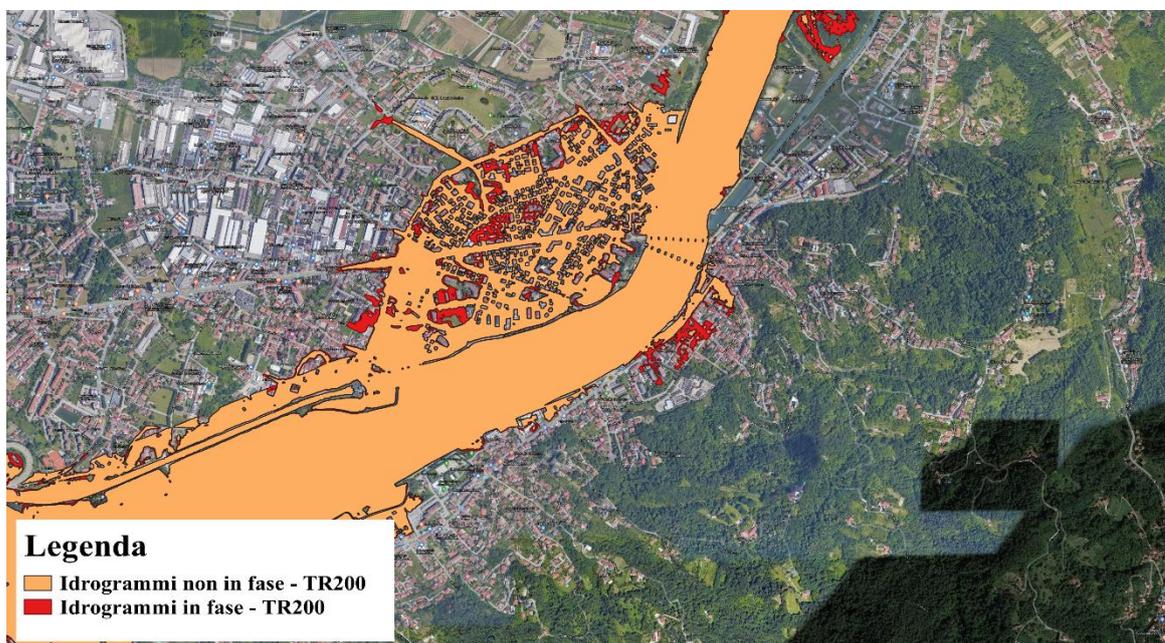


Fig. 72 - Confronto aree allagate Comune di San Mauro Torinese

A valle non si hanno differenze sostanziali perché la portata complessiva in questi tratti è la medesima del caso precedente. Inoltre, questo tratto di fiume risulta avere delle sezioni abbastanza larghe e in grado di contenere dunque grossi quantitativi d'acqua provenienti da monte.

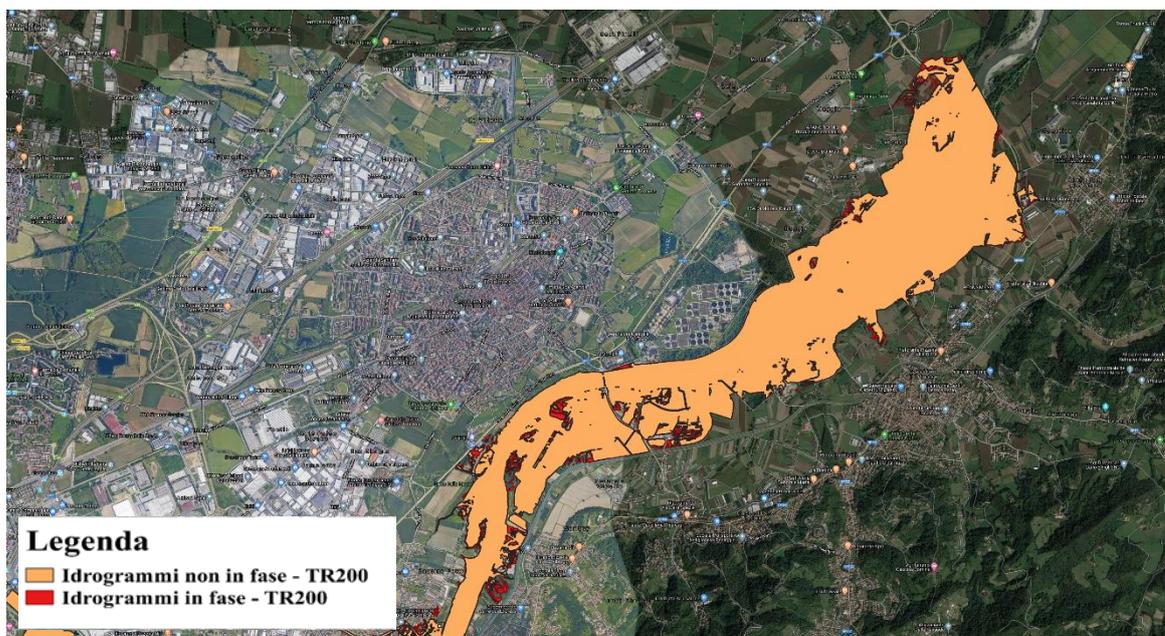


Fig. 73 - Confronto aree allagate a valle del Modello

7.7 Scenario idrogrammi non in fase – TR500

Analogamente al caso degli idrogrammi in fase, si riporta a scopo illustrativo il caso riferito a TR500 considerando gli idrogrammi non in fase per gli stessi motivi già argomentati al paragrafo 7.4.

Gli idrogrammi utilizzati per questo scenario sono i seguenti:

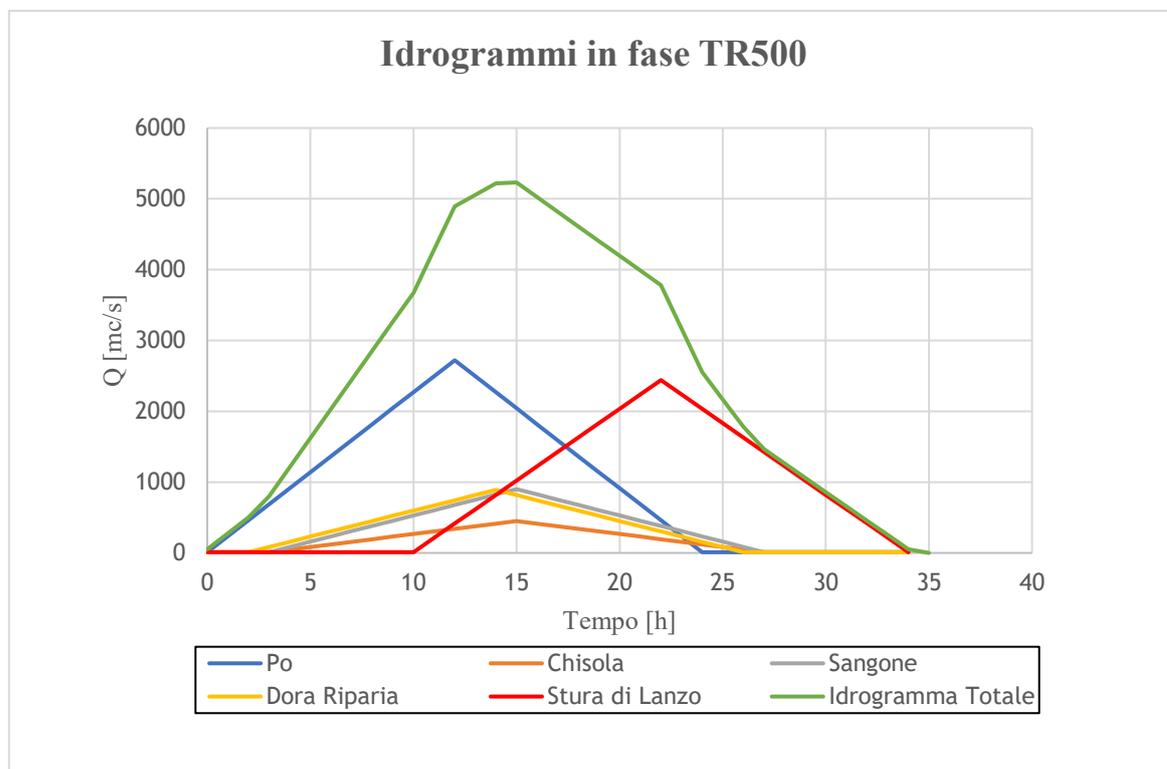


Fig. 74 – idrogrammi non in fase TR500

Nella tabella seguente si riportano le traslazioni in termini di ore e il colmo ottenuto nell'idrogramma risultante:

Tab. 9 - Traslazione idrogrammi e colmo ottenuto TR500

	Po	Chisola	Sangone	Dora Riparia	Stura di Lanzo	Idrogramma Totale
Traslazione [h]	0	3	3	2	10	\
Q_{colmo} [mc/s]	2720	450	900	890	2440	4800

Come è possibile notare si è ottenuta una portata di colmo pari a 4817 mc/s a fronte dei 4800 mc/s forniti.

Con queste traslazioni si ipotizza che il colmo del Chisola arriva quasi in fase con quello del Po, il colmo del Sangone e della Dora Riparia arrivano alla confluenza prima del colmo del Po mentre quello della Stura di Lanzo arriva dopo.

Negli allegati 15,16 e 17 si riporta il confronto delle aree allagate con il caso in cui si sono considerati gli idrogrammi in fase.

Come è possibile constatare, visto che il colmo del Chisola arriva quasi in fase con quello del Po, le aree allagate a monte coincidono. Inoltre, l'estensione delle aree allagate dipende fortemente dal contributo proveniente dal Po per cui si ottengono soluzioni identiche fino alla confluenza con la Stura di Lanzo. Visto che il colmo di quest'ultimo arriva dopo rispetto a quello del corso principale, si genera un'onda di piena allungata con effetto di laminazione del colmo rispetto al caso in cui i due picchi sono in fase, per cui le aree allagate sono molto meno estese soprattutto nella zona del Comune di San Mauro Torinese.

8. INTERVENTI DI PRIMA APPROSSIMAZIONE CONSIDERATA LA CONDIZIONE PIÙ GRAVOSA A TR200

In questa parte di tesi, si vogliono riportare alcuni interventi e accorgimenti in via preliminare basandosi sullo scenario riferito a tempo di ritorno duecento anni e considerando gli idrogrammi in fase (Paragrafo 7.3).

Dalla stazione di Carignano, sezione di monte del modello, fino alla confluenza con il torrente Banna, le aree allagate interessano principalmente campi coltivati e non, che non creerebbero particolari problemi qualora la corrente del Po non trasportasse quantitativi elevati di limo; in tal caso, in fase post-alluvione, si renderebbe necessaria una bonifica dei campi interessati poiché il limo crea problemi sia di fertilità fisica e meccanica, sia di fertilità chimica (Allegato 4).

D'altra parte, però, l'allagamento dei campi a monte porta ad un effetto di laminazione a valle, in quanto queste zone sottraggono dei volumi d'acqua significativi che per diretta conseguenza non si sommano a quelli provenienti dagli affluenti lungo il corso del fiume, attenuando i colmi di piena a valle.

Dalla confluenza con il torrente Banna fino alla confluenza con il torrente Chisola, il Po presenta delle arginature che, in sinistra si estendono fino alla confluenza con il Chisola, mentre in destra si interrompe in corrispondenza di un canale di irrigazione. Questa interruzione consente l'accumulo di volumi d'acqua all'interno del Lago Imperiale e della Cava di Moncalieri, causando anche in questo caso effetti di laminazione a valle e allagamenti che non creano particolari problemi (Allegato 5).

L'argine sinistro contiene le portate dell'evento considerato per quasi tutta la sua lunghezza e solo a valle viene sormontato leggermente; tuttavia, tale fenomeno non crea problemi poiché il canale di derivazione AEM presenta in sponda destra un rialzo che assolve la funzione di secondo argine nel caso in cui i volumi d'acqua, dovuti al sormonto dell'argine, diventassero consistenti.

Una particolare attenzione va posta agli argini del torrente Chisola. Infatti, simulando la sola portata del torrente riferita a tempo di ritorno 200 anni, gli argini non vengono sormontati mentre, quando si simula in concomitanza anche la portata arrivante dal fiume Po, si genera un rigurgito che si propaga man mano verso monte facendo aumentare i tiranti idrici e causando dunque il sormonto degli argini.

In questo caso si potrebbe valutare il rialzo degli argini, soprattutto di quello sinistro, poiché potrebbe dar luogo a degli allagamenti in zone residenziali di Moncalieri; quello destro invece principalmente genera degli allagamenti su campi, costeggiando la frazione Barauda del Comune di Moncalieri.



Fig. 75 - Scenario con Portata nel Chisola riferita a TR200

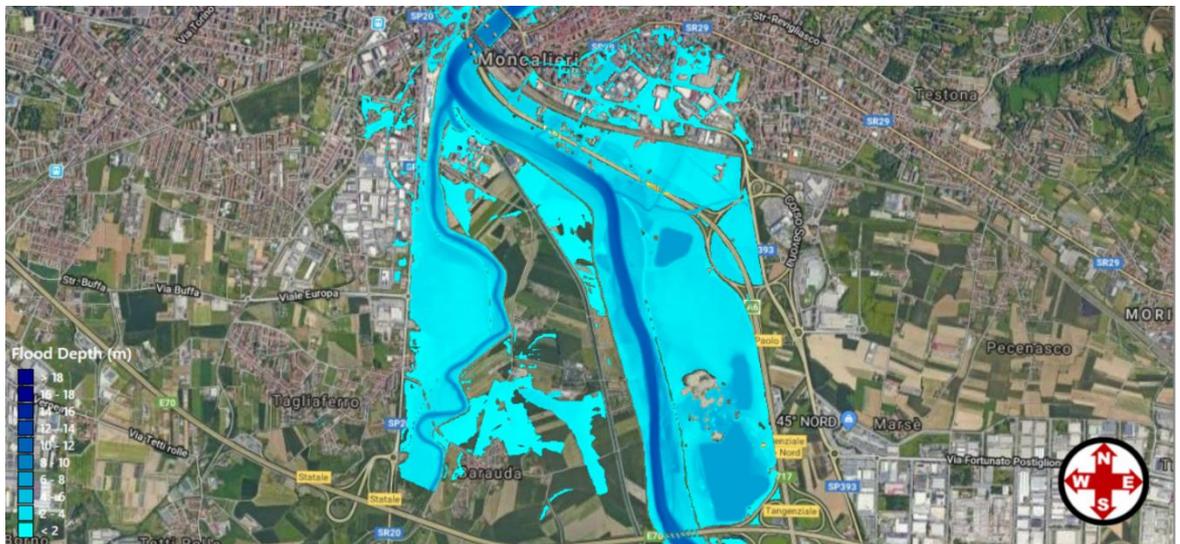


Fig. 76 - Scenario con colmo del Chisola in fase con quello del Po



Fig. 77 – Interventi sul torrente Chisola

Gli allagamenti della parte situata in destra orografica del Comune di Moncalieri sono principalmente dovuti ai sottopassi e canali irrigui che attraversano l’autostrada A6 e ai sottopassi che attraversano il rilevato ferroviario, in particolare il sottopasso della strada Brandina e della strada Tiro a Segno. Si potrebbe valutare la possibilità di ridurre le luci di alcuni sottopassi o la chiusura qualora ci fosse la possibilità di creare nuove infrastrutture viarie per collegare le zone che rimarrebbero isolate da tale modifica.



Fig. 78 - Sottopasso Str.Brandina

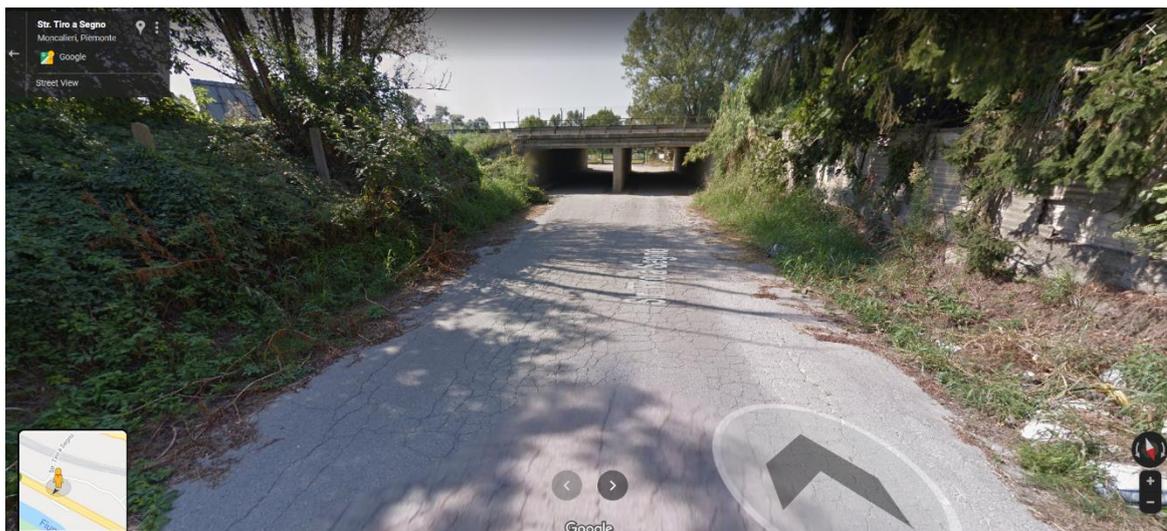


Fig. 79 - Sottopasso Str. Tiro a Segno

Nella zona di studio inerente al torrente Sangone, è possibile innalzare l'argine in sinistra orografica così da evitare gli allagamenti che si estendono dalla Via Giacomo Leopardi alla Via Moncenisio e quelli inerenti alla zona commerciale subito dopo l'attraversamento di Corso Trieste (Allegato 6).

In corrispondenza della confluenza si può pensare ad un rialzo arginale e ad un incremento di altezza dei rilevati di alcune strade sterrate, così da mantenere come zona golenale quella del parco delle Vallere e i campi situati a Sud dello stesso. È bene mantenere tale zona golenale perché genera un effetto di laminazione utile, in quanto l'apporto idrico del Sangone è abbastanza alto.



Fig. 80 - Interventi zona torrente Sangone

Proprio in corrispondenza della confluenza si hanno degli allagamenti soprattutto di impianti sportivi e pochi edifici residenziali e commerciali per i quali bisognerebbe effettuare un'analisi specifica, in quanto la realizzazione di un'arginatura potrebbe comportare allagamenti in zone residenziali a valle. Pertanto, occorre valutare se la situazione più vantaggiosa è quella di accettare gli allagamenti in

queste zone definendole come zone con rischio di esondazione elevato oppure quella di realizzare un'opera arginale (Allegato 6).

Più a valle non si hanno da segnalare particolari zone allagate; l'unico accorgimento per evitare gli allagamenti nella zona di Corso Casale, sarebbe quello di innalzare il rilevato del Viale Suor Giovanna Francesca Michelotti (Allegato 7).



Fig. 81 - Rialzo Viale Suor Giovanna Francesca Michelotti

In corrispondenza della confluenza con la Dora Riparia si hanno degli allagamenti nella zona di Sassi che non creano particolari problemi, poiché l'estensione non raggiunge le aree residenziali, mentre in sinistra orografica gli allagamenti sono dovuti principalmente a canali di irrigazione e canali di scolo che attraversano l'argine; questi ultimi sono stati modellati come Culvert all'interno del modello, ma non si è tenuto conto di eventuali dispositivi di ritenuta che possono essere presenti all'interno delle opere e che possono evitare rigurgiti durante gli eventi di piena. Dai sopralluoghi effettuati non è stato possibile visionare tali opere da monte, spesso perché le aree non risultavano accessibili. Per tal motivo si è deciso di non considerare dei dispositivi di ritenuta, ma qualora questi fossero presenti, le aree allagate in questa zona sarebbero molto minori (Allegato 8).



Fig. 82 - Immagini da sopralluogo zona Parco Colletta - Parco della Confluenza

Per quanto riguarda la zona Bertolla si potrebbe pensare di innalzare una delle sponde del canale di derivazione AEM, così da impedire il passaggio dell'acqua dall'Isolone di Bertolla al centro abitato omonimo (Allegato 8).

Il tratto compreso fra la confluenza della Stura di Lanzo e la traversa Enel del Canale Cimena risulta complesso da modellare. Occorrerebbe uno studio mirato sul nodo "San Mauro Torinese", questo perché il tratto è compreso tra due traverse, quella di monte posta alla confluenza del Po con la Stura, di proprietà A.E.M. e quella di valle di proprietà E.N.E.L. a servizio della centrale di San Raffaele Cimena. Inoltre, il tratto del Po in cui si affacciano entrambi i lati del Comune San Mauro Torinese

è intersecato da 4 grandi infrastrutture, molto ravvicinate fra di loro, che interferiscono con il deflusso delle acque:

- la traversa di derivazione dalla A.E.M. (subito a valle dell'affluenza della Stura);
- il vecchio ponte in muratura (sotto al quale, in questi anni recenti, con la costruzione del tunnel immerso per la circonvallazione della Strada Statale n. 590, è stata ridotta la potenzialità di deflusso);
- il nuovo ponte comunale;
- la traversa di derivazione del canale Cimena-Enel.

Per quanto detto risulta alquanto complicato studiare questo tratto e gli unici accorgimenti di massima che potrebbero effettuarsi, previa valutazione delle conseguenze a monte e a valle, sono quelle di innalzamento arginale della zona lungo Po Venezia in destra e della ciclo strada VENEZIA – VENTO in sinistra.



Fig. 83 – Interventi zona San Mauro Torinese

A valle del Comune San Mauro Torinese non si hanno accorgimenti da segnalare, visto che, nonostante le portate siano molto elevate, le aree allagate interessano parchi, boschi e campi e non creano problemi al depuratore centrale SMAT.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro pone come obiettivo finale quello di ricavare le aree allagate relative al fiume Po nel tratto che va dalla stazione idrometrica “Carignano” fino alla SP500 dopo il comune Settimo Torinese (TO), considerando gli affluenti in sinistra dello stesso, quali: Chisola, Sangone, Dora Riparia e Stura di Lanzo.

Dalle analisi eseguite si è visto come il territorio risulta molto fragile e suscettibile agli eventi alluvionali e dunque presenta delle criticità con conseguenze negative per la salute umana, l’ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche.

Occorre innanzi tutto specificare che gli idrogrammi considerati sono degli idrogrammi ipotizzati e non di calcolo, basati principalmente sui valori di picco forniti; di conseguenza si è calcolato un “range” di aree allagate compreso fra uno scenario limite, ottenuto considerando gli idrogrammi posti in fase e caratterizzati quindi da una bassa probabilità di accadimento, e uno scenario più realistico ottenuto disponendo gli idrogrammi in modo tale da ottenere una portata di picco a valle pari a quella fornita.

Il presente lavoro potrebbe restituire soluzioni più precise migliorando i dati di input a disposizione:

- Modelli digitali del terreno riferiti ad anni recenti;
- Sezioni batimetriche, anch’esse riferite ad anni recenti, in quanto ad ogni evento di piena il fiume muta le sue caratteristiche geometriche in funzione della gravità dell’evento, dunque dal tempo di ritorno associabile alla piena;
- Rilievi dello stato di fatto di arginature e di opere presenti all’interno dell’area oggetto di studio. A tal proposito potrebbero essere effettuati dei rilievi LIDAR tramite droni, ad oggi via di sviluppo, che possono essere un’importante fonte di raccolta dati soprattutto in questi casi e utilizzabili anche in termini di monitoraggio;
- Idrogrammi di calcolo, che attualmente sono ancora in fase di elaborazione e che possono dare una connotazione più precisa del modello poiché, oltre alla durata e alla portata di colmo, la forma dell’idrogramma può influire sull’estensione delle aree allagate.

Nonostante questo, è possibile concludere che in linea generale questo lavoro ci ha consentito di valutare l’influenza degli affluenti e degli idrogrammi degli stessi sulle aree allagate inerenti al Po. Pertanto, potrebbe essere la base per la classificazione e mappatura delle fasce fluviali e del rischio riferiti alle aree inondabili con tempi di ritorno rispettivamente di 20,200 e 500 anni.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- <http://www.arpa.piemonte.it>
- <https://adbpo.gov.it/>
- Banca dati – Piano di Gestione Rischio alluvioni – AdbPo
- https://it.wikipedia.org/wiki/Pagina_principale
- <https://www.sapere.it>
- <http://www.regione.piemonte.it>
- Banca dati idrologica – ARPA Piemonte
- www.dhi-italia.it
- Modelli Numerici per l'idraulica fluviale – DHI TECHNICAL PAPER n°1
- <https://www.civilgeo.com/>
- HEC-RAS 2D Flow Modelling – CivilGeo – 2019
- HEC-RAS River Analysis system – Hydraulic reference manual - Febbraio 2016
- <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>
- Delft3D flexible mesh suite – User Manual – 2020
- Area a rischio significativo di alluvione ARS Distrettuali e Schede monografiche - Città di Torino - Autorità di bacino del fiume Po – Dicembre 2014
- Michele Fornero – Tesi di laurea: Validazione dei risultati di modellistica idraulica mediante geo-restituzione digitale – 2018
- Mauro Colombo – Tesi di laurea: dati satellitari a supporto della modellistica idrologica e idraulica: il caso studio del bacino dello Yangtze – 2016
- <http://www.geoportale.piemonte.it>
- <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- <http://www.sistemapiemonte.it/sicod/>
- ARPA Piemonte - Evento alluvionale regionale del 13 – 16 Ottobre 2000 – Ottobre 2003
- Direzione Regionale Servizi Tecnici di Prevenzione - rapporto sull'evento alluvionale del 13 - 16 Ottobre 2000 - Parte II – Effetti sulle aree antropizzate
- <http://www.provincia.torino.gov.it/emergenza/aeree/indice.html>
- <http://www.cittametropolitana.torino.it/cartoview/>
- Città Metropolitana di Torino - Relazione sintetica sull'evento Alluvionale del 23 - 26 Novembre 2016 – Novembre 2016
- Sonia Catalano – Tesi di Master: Alluvione 2000 - la ricostruzione delle opere pubbliche in Piemonte – Gennaio 2004
- Alessio Domeneghetti – Dottorato di ricerca - modellistica idraulico matematica per la definizione di strategie di mitigazione del rischio alluvionale - 2012

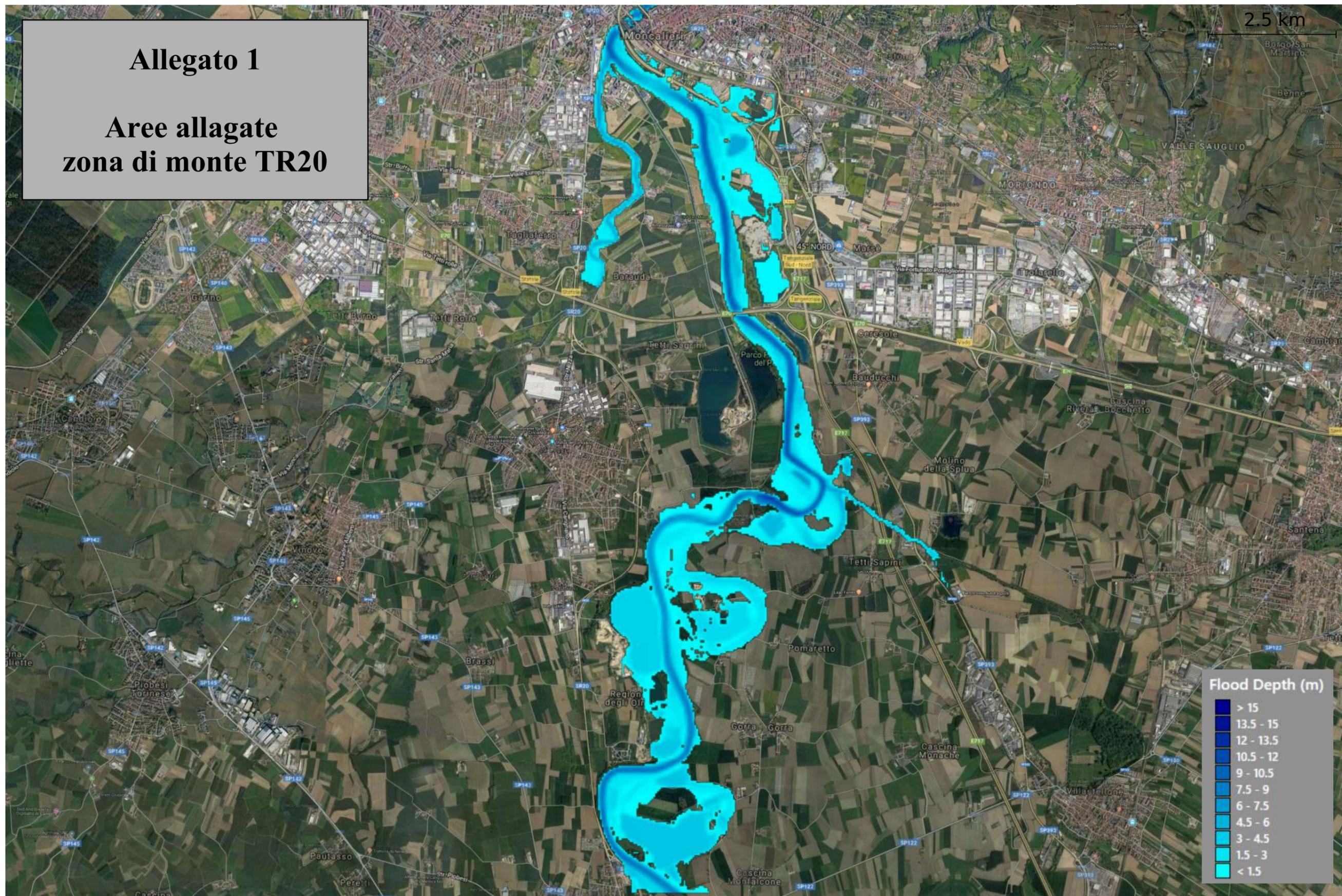
- Luigi Cimorelli – Tesi di dottorato: Modellazione e progettazione ottimizzata delle reti di drenaggio
- Ing. Cinzia Merli - La capacità di laminazione nel bacino del Po – Presentazione del Settembre 2018
- Pietro Prestininzi - La modellazione idraulica: complessità vs robustezza – Presentazione del Giugno 2019
- Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni - Profili di Piena dei corsi d'acqua del reticolo principale - Città di Torino - Autorità di bacino del fiume Po – Marzo 2016
- Dipartimento Geologia e Dissesto - analisi e valutazione degli aspetti morfologici – 2016
- Aggiornamento e revisione delle mappe di pericolosità e del rischio di alluvione redatte ai sensi dell'art. 6 del D.lgs. 49/2010 attuativo della Dir. 2007/60/CE – Il ciclo di gestione – Relazione Metodologica – Distretto del fiume Po – Dicembre 2019

ALLEGATI

ALLEGATI RIFERITI A TR20

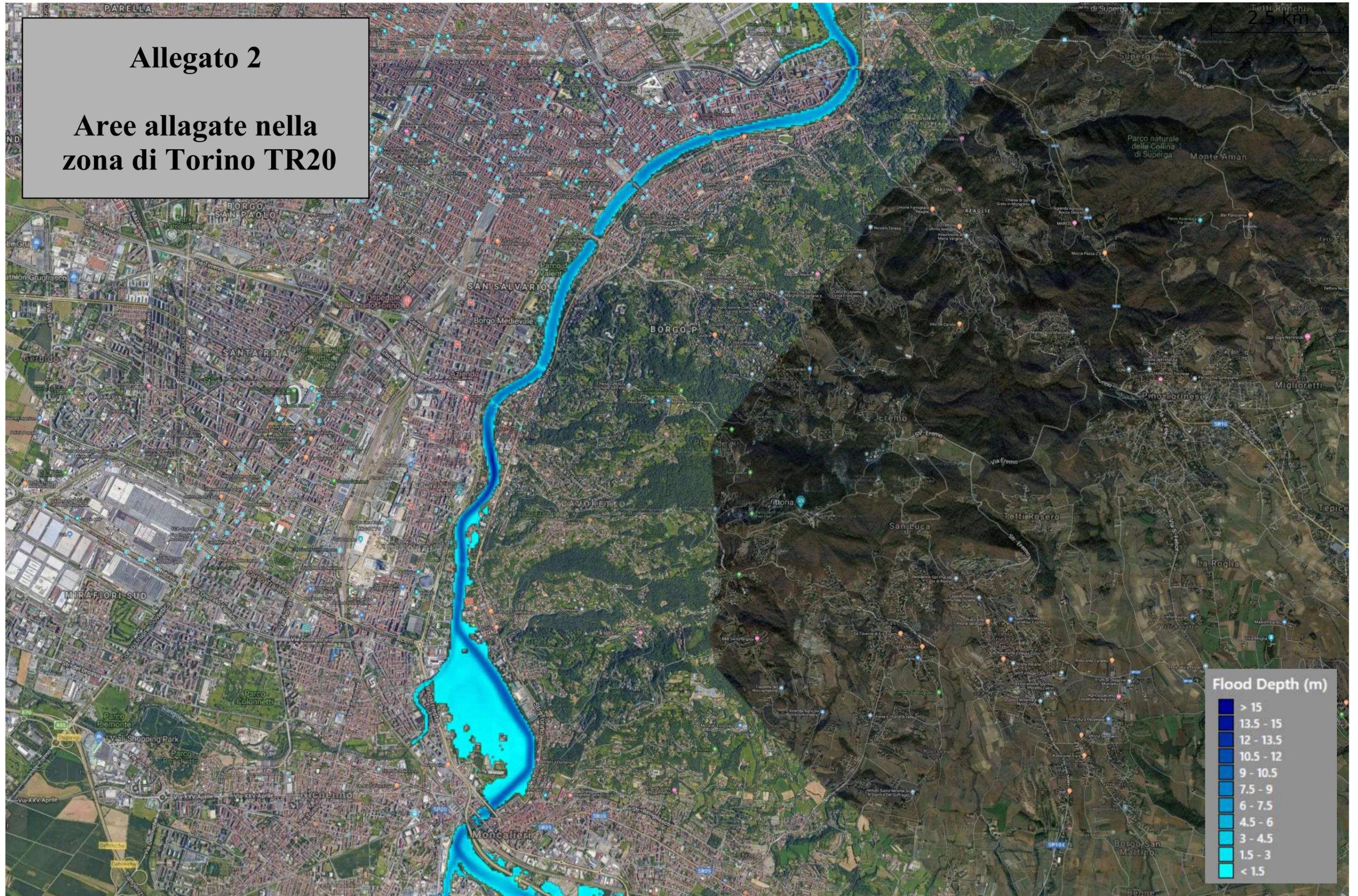
Allegato 1

Aree allagate zona di monte TR20



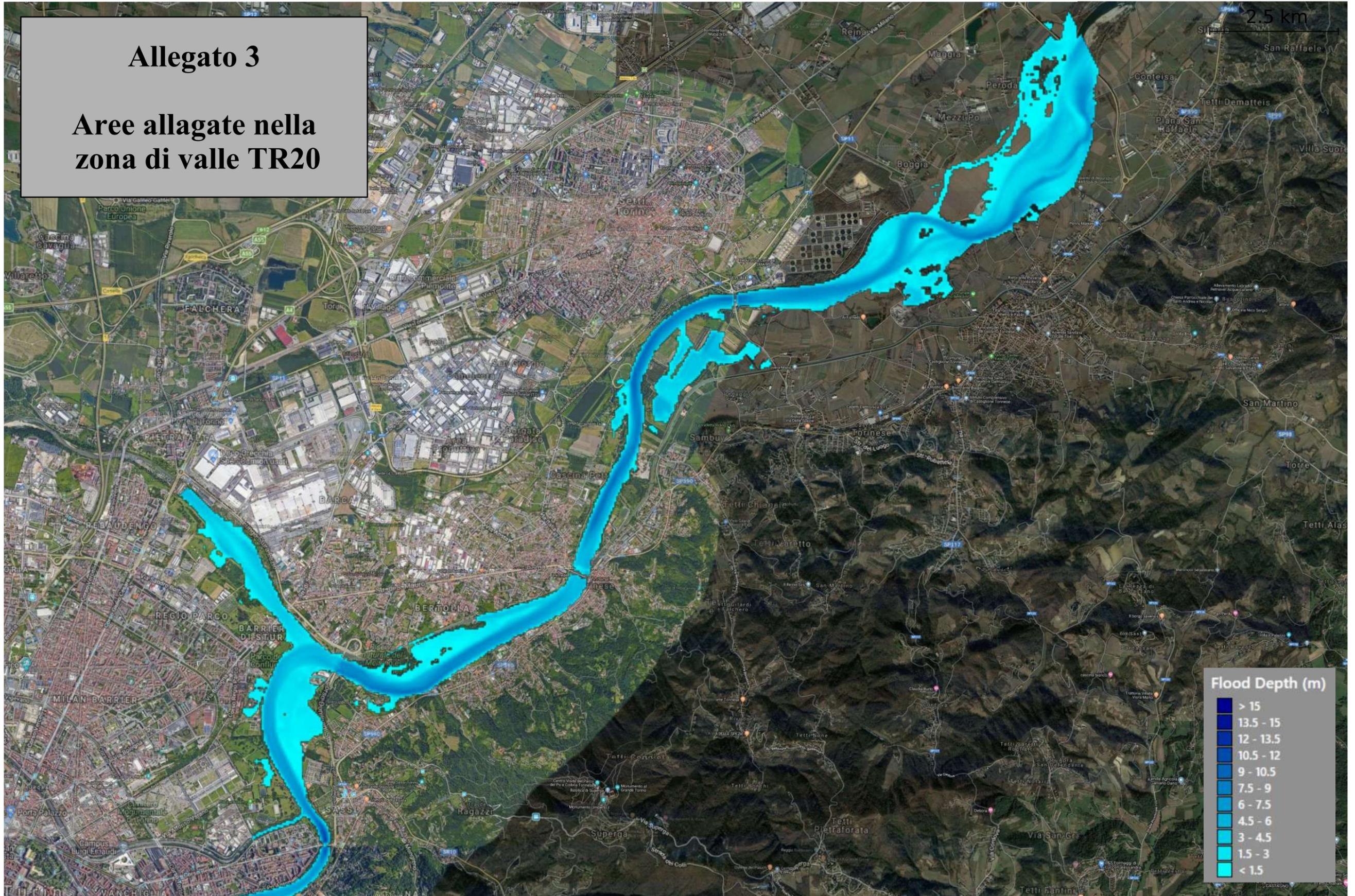
Allegato 2

Aree allagate nella zona di Torino TR20



Allegato 3

Aree allagate nella zona di valle TR20

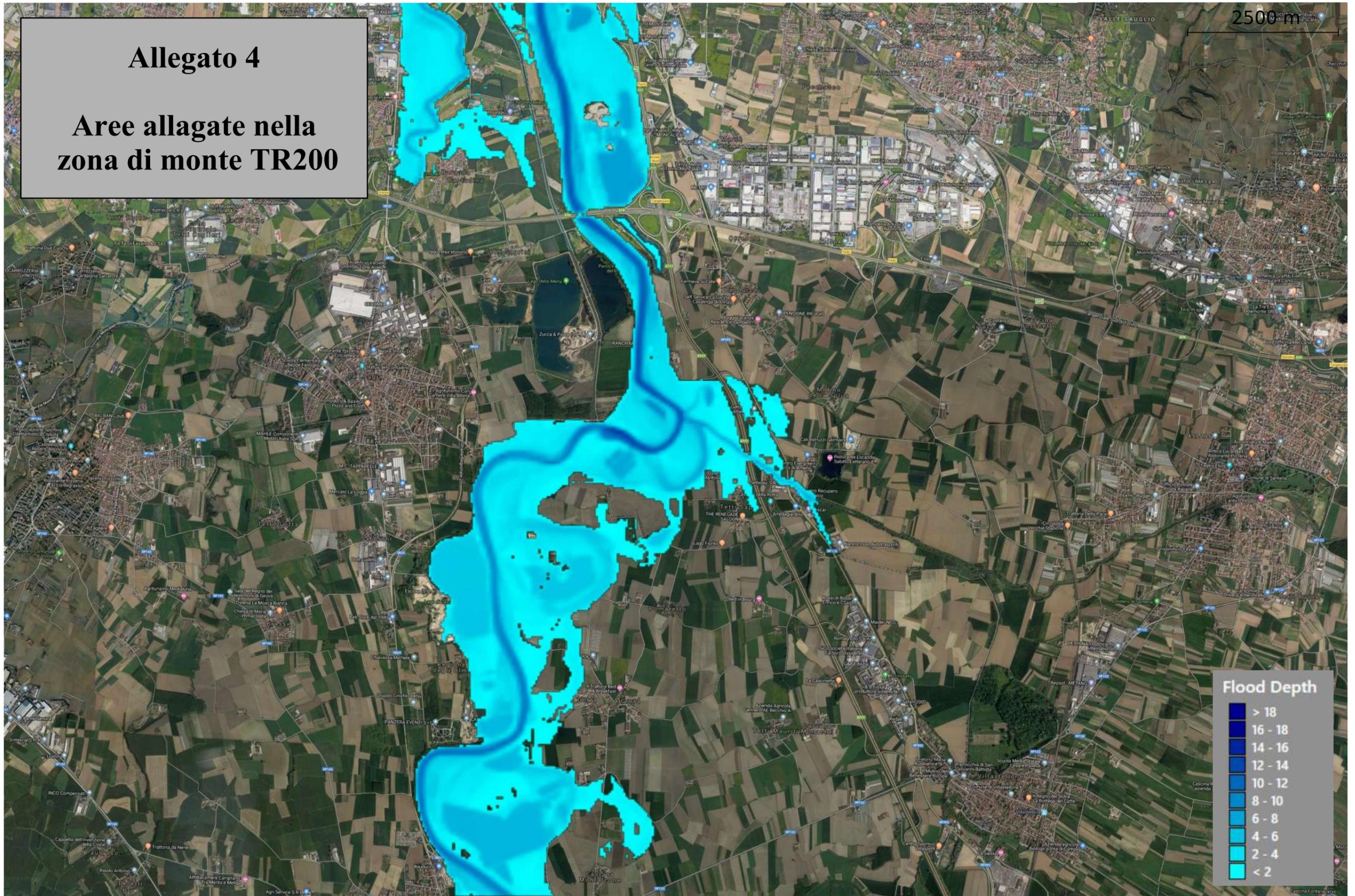


ALLEGATI RIFERITI A TR200

Allegato 4

Aree allagate nella zona di monte TR200

2500

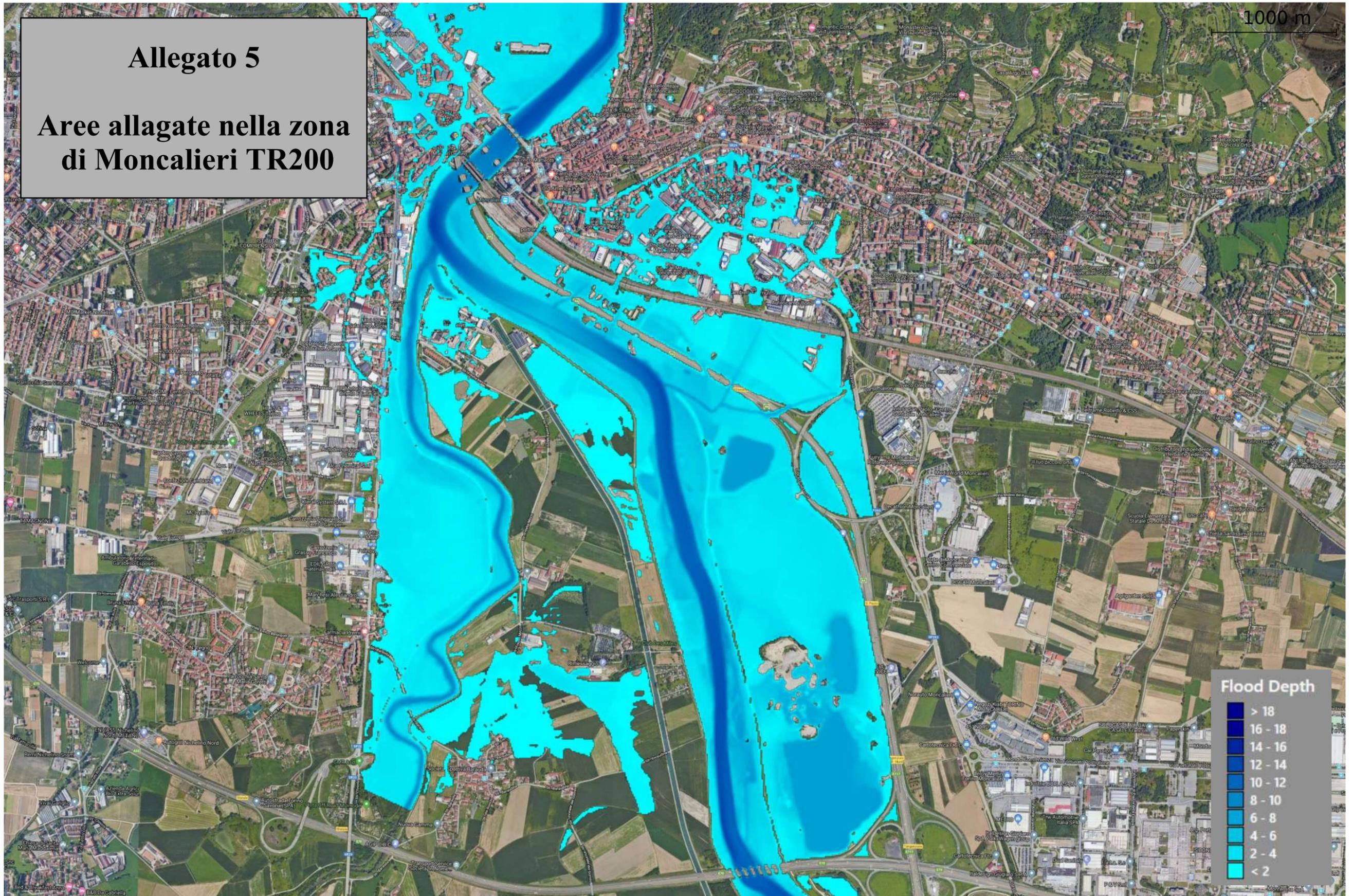


Flood Depth	
> 18	(Darkest Blue)
16 - 18	(Dark Blue)
14 - 16	(Medium-Dark Blue)
12 - 14	(Medium Blue)
10 - 12	(Light-Medium Blue)
8 - 10	(Light Blue)
6 - 8	(Lighter Blue)
4 - 6	(Very Light Blue)
2 - 4	(Lightest Cyan)
< 2	(Darkest Cyan)

Allegato 5

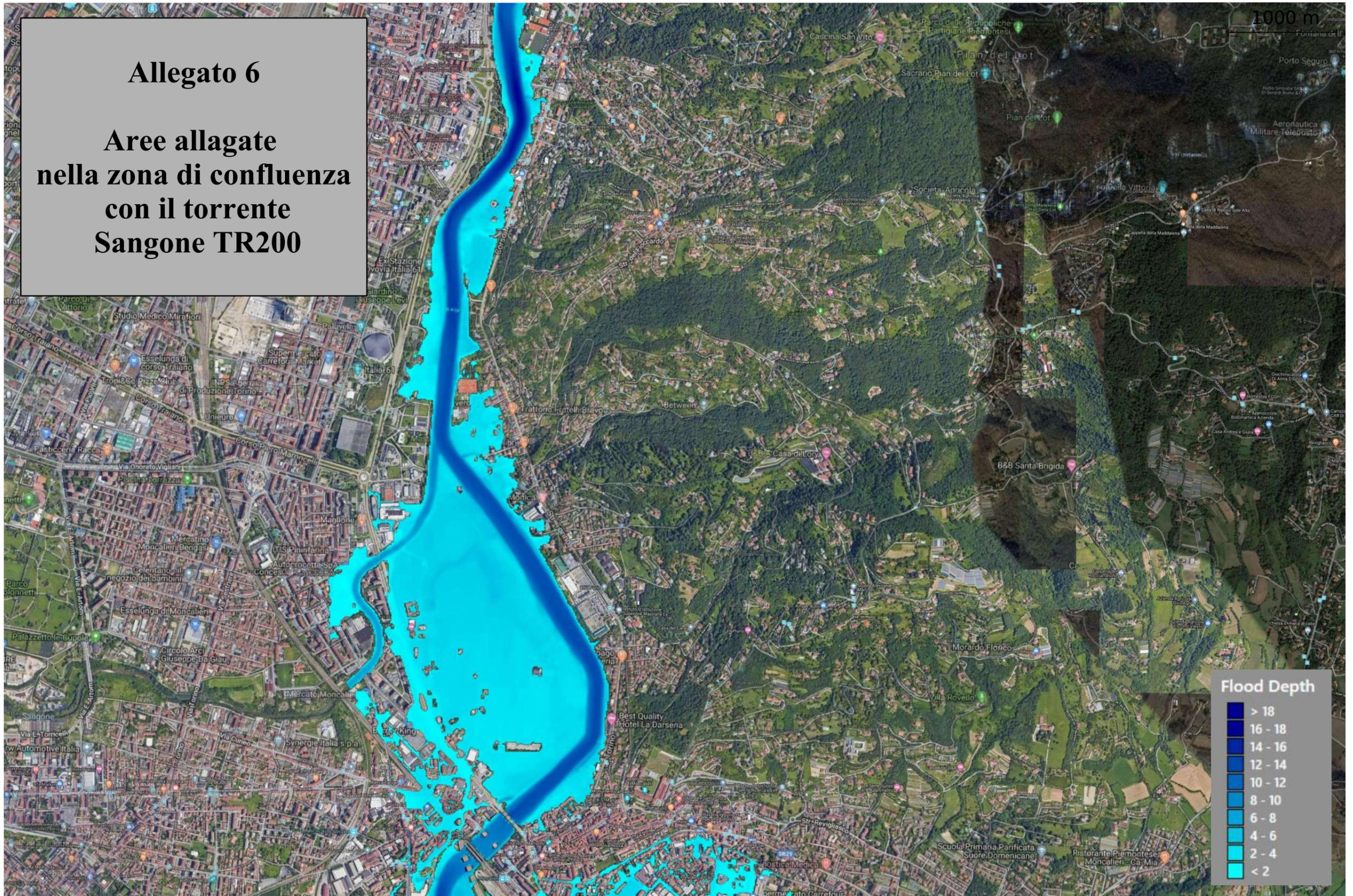
Aree allagate nella zona di Moncalieri TR200

1000 m



Allegato 6

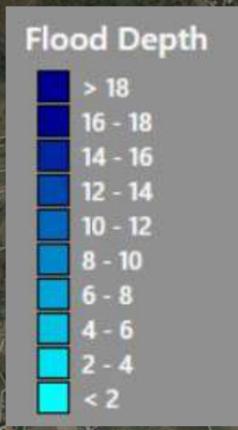
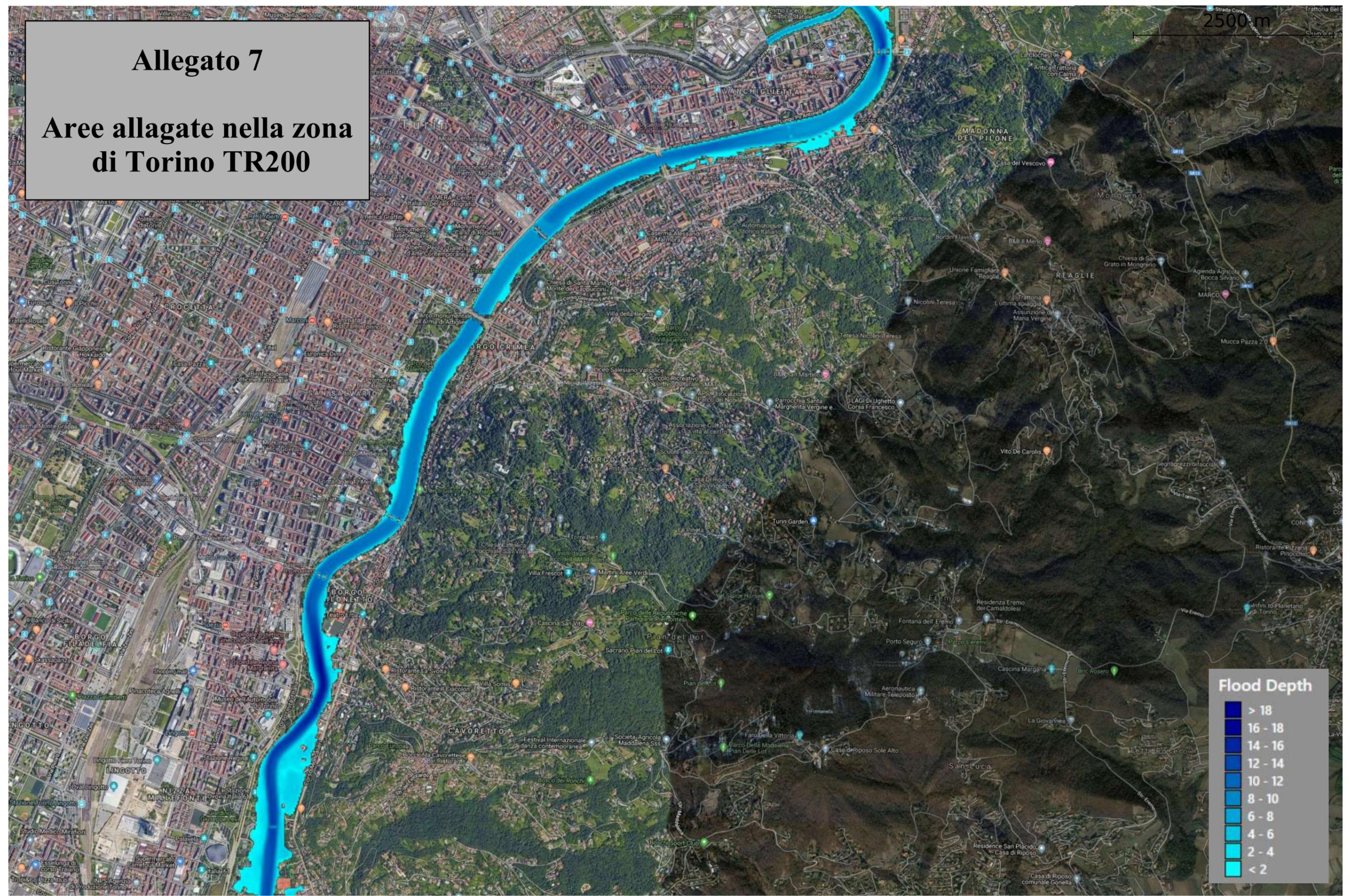
Aree allagate nella zona di confluenza con il torrente Sangone TR200



Allegato 7

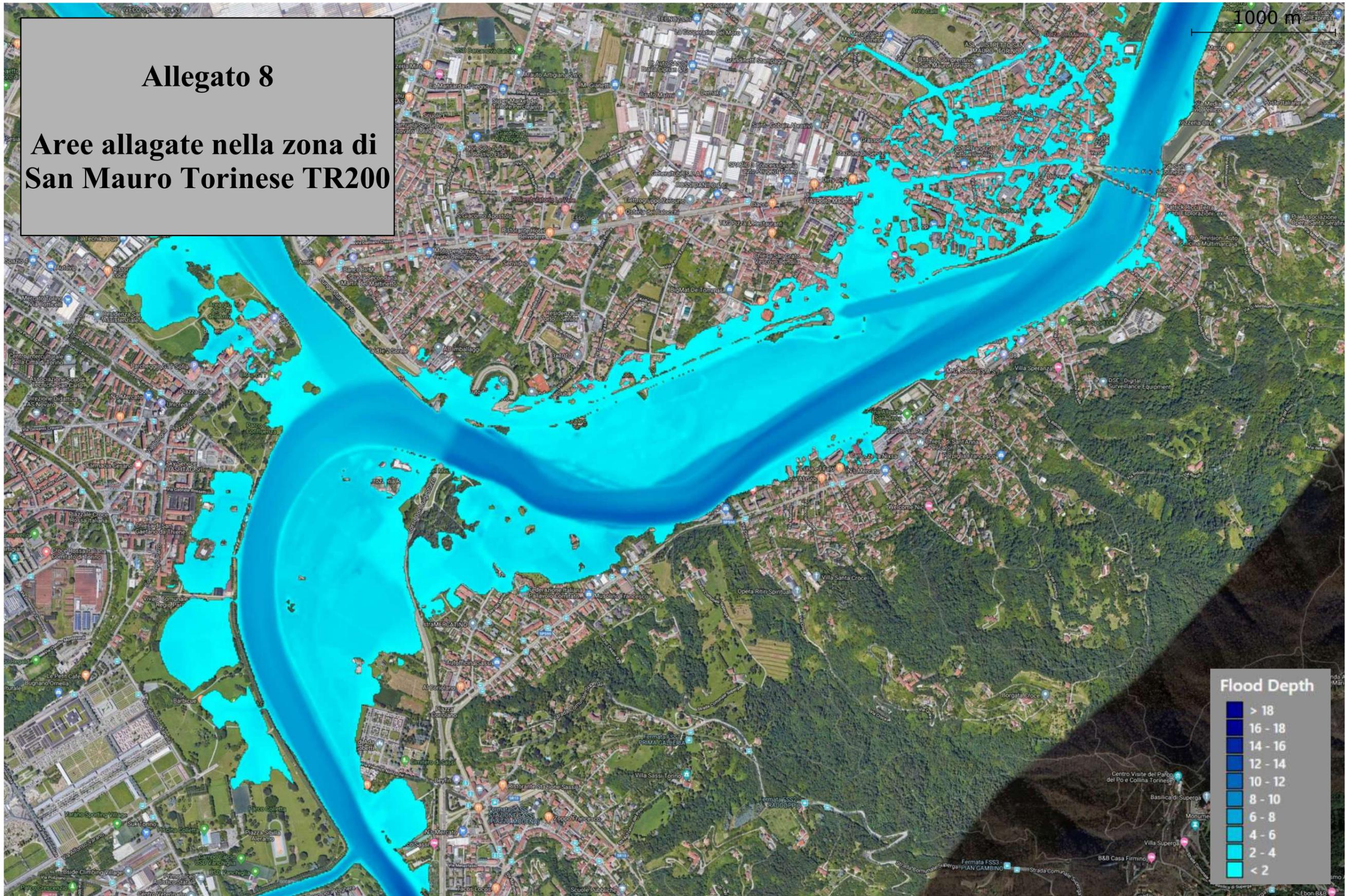
Aree allagate nella zona di Torino TR200

2500 m



Allegato 8

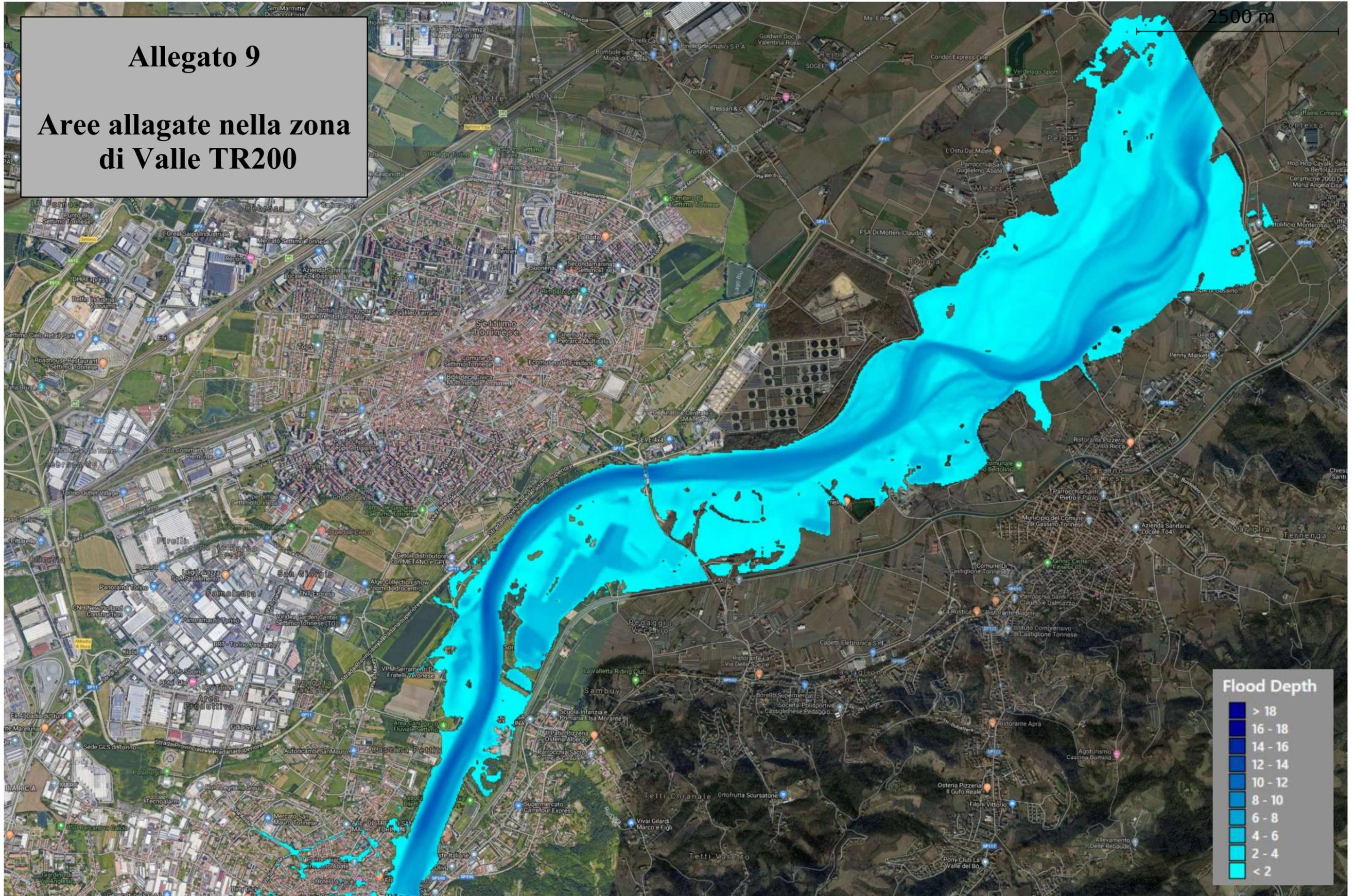
Aree allagate nella zona di San Mauro Torinese TR200



Allegato 9

Aree allagate nella zona di Valle TR200

2500 m

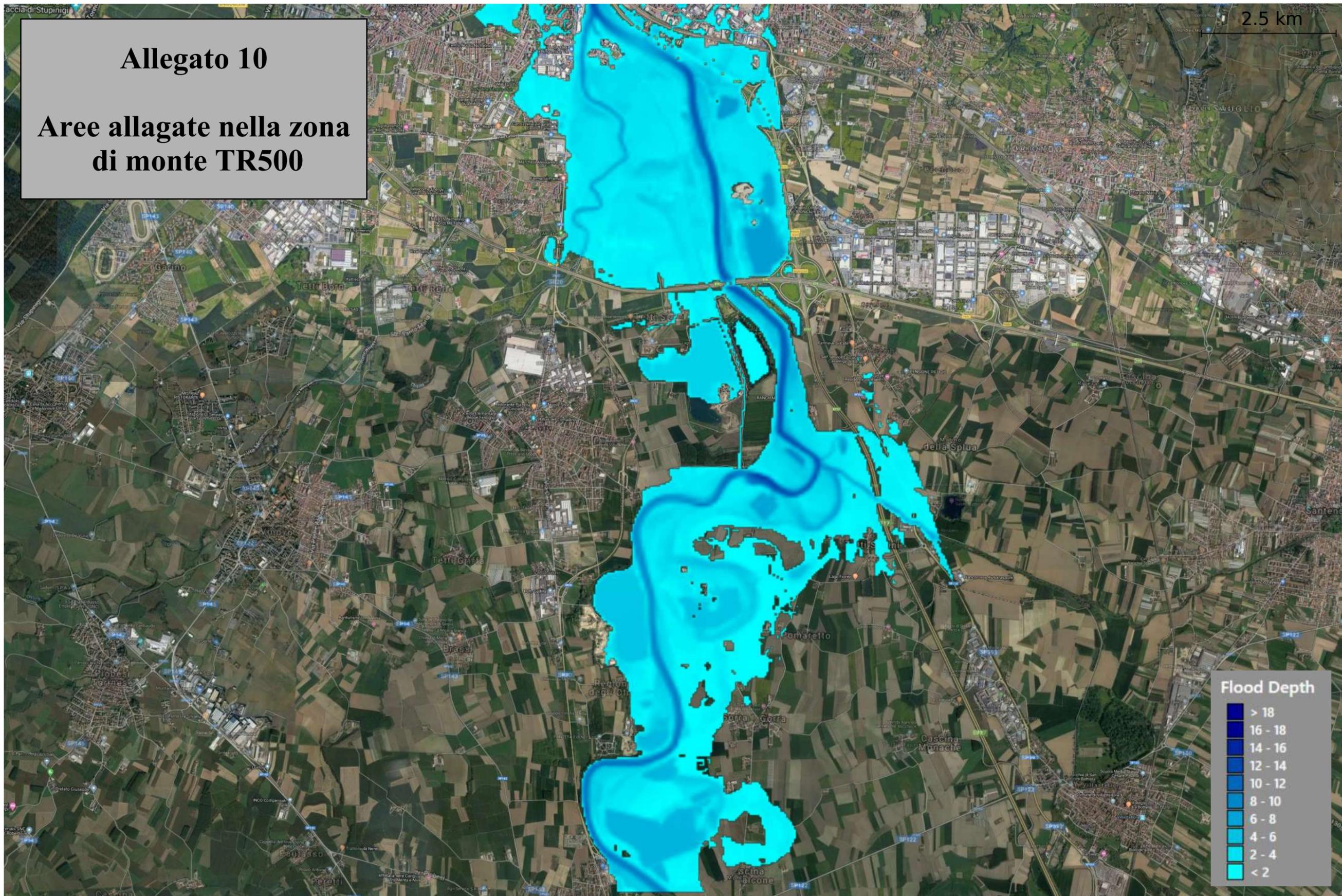


Flood Depth	
Dark Blue	> 18
Blue	16 - 18
Light Blue	14 - 16
Medium Blue	12 - 14
Lighter Blue	10 - 12
Very Light Blue	8 - 10
Light Cyan	6 - 8
Lightest Cyan	4 - 6
Very Lightest Cyan	2 - 4
White	< 2

ALLEGATI RIFERITI A TR500

Allegato 10

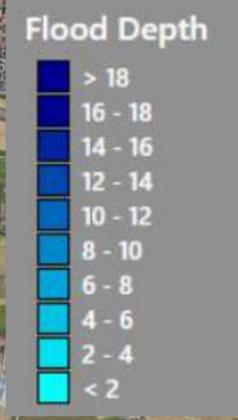
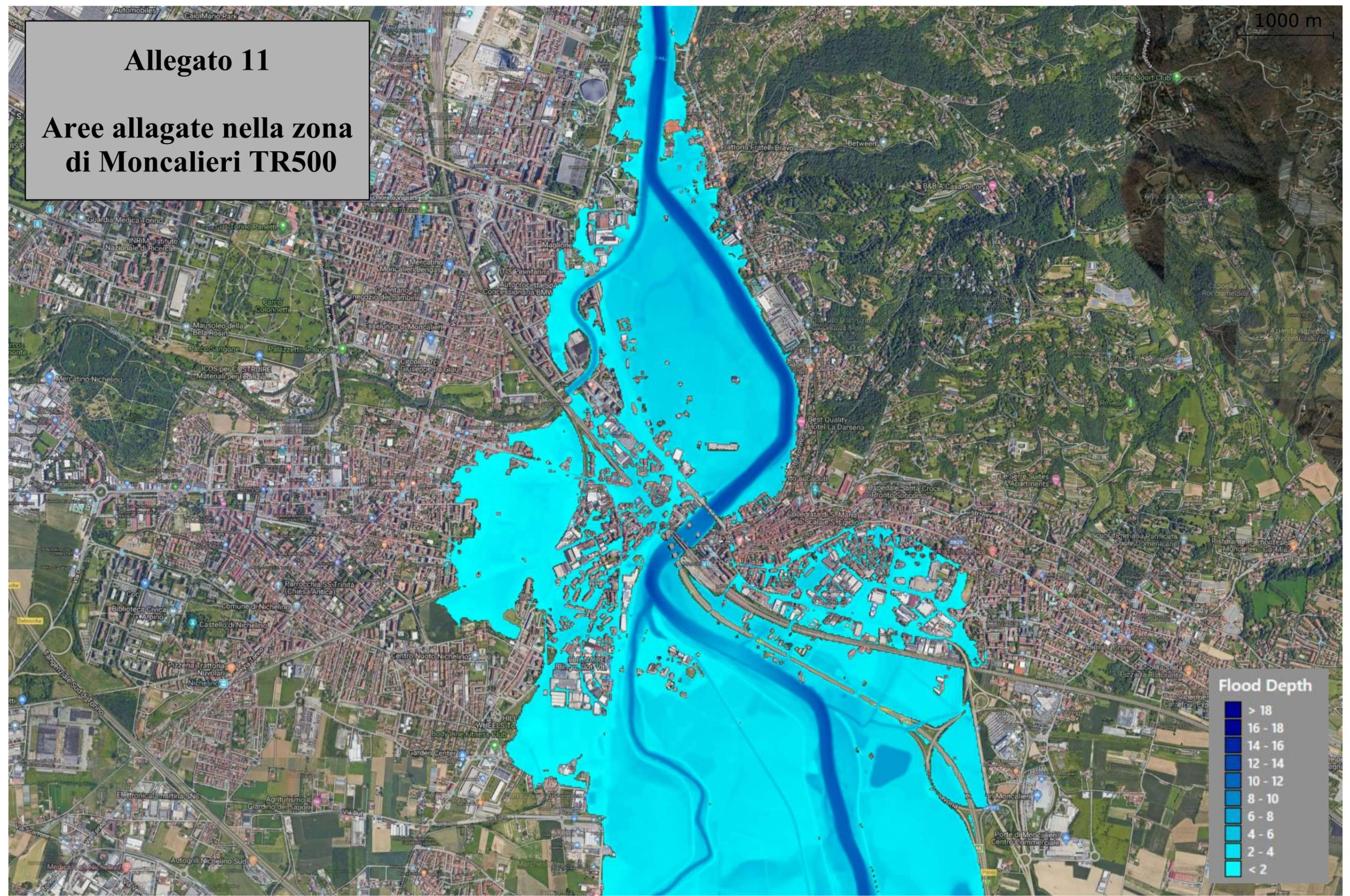
Aree allagate nella zona di monte TR500



Allegato 11

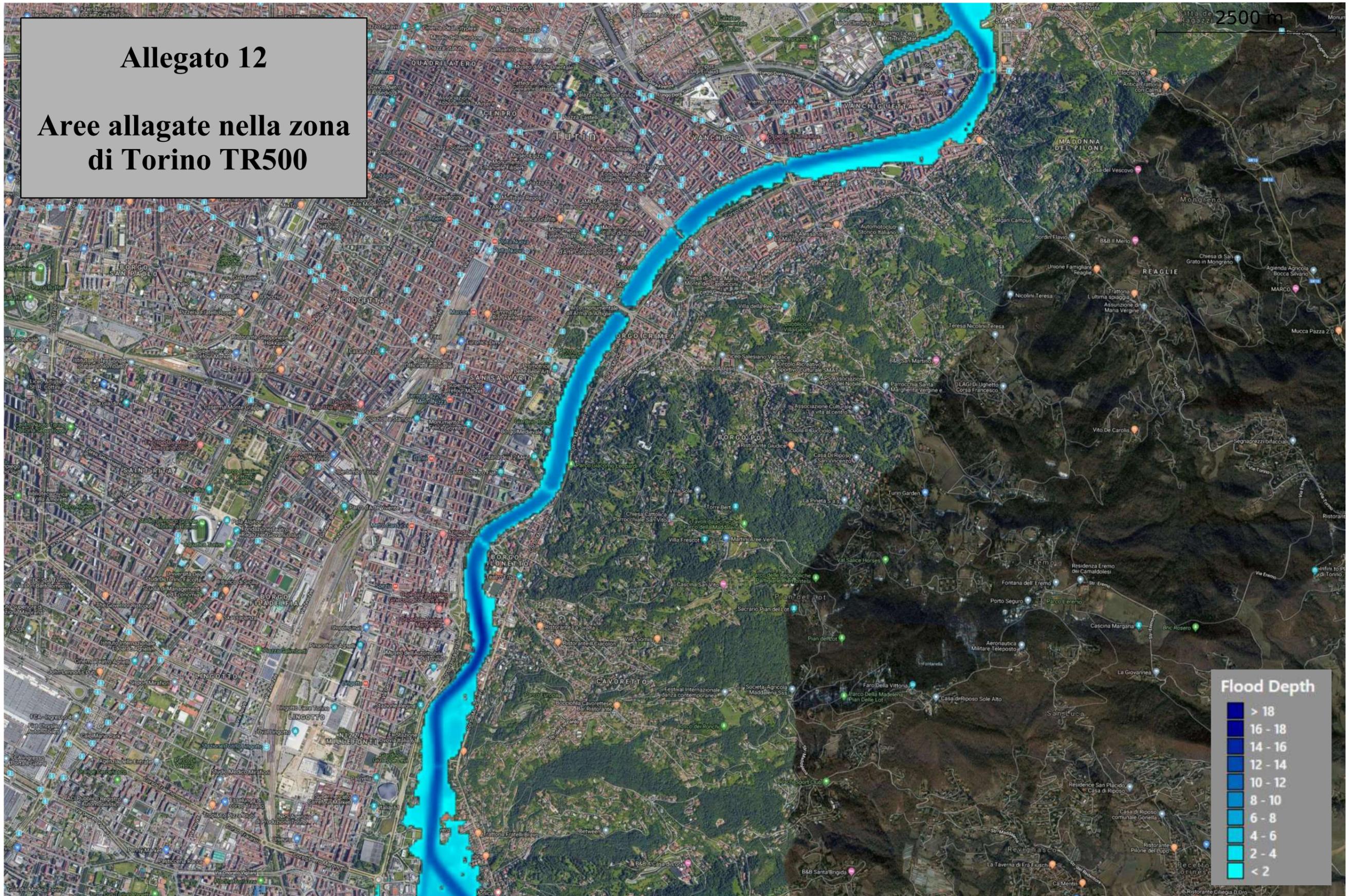
Aree allagate nella zona di Moncalieri TR500

1000 m



Allegato 12

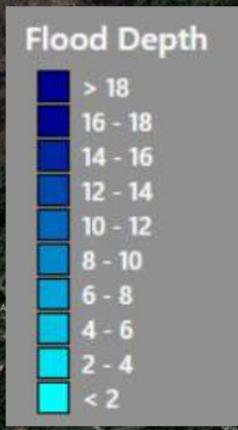
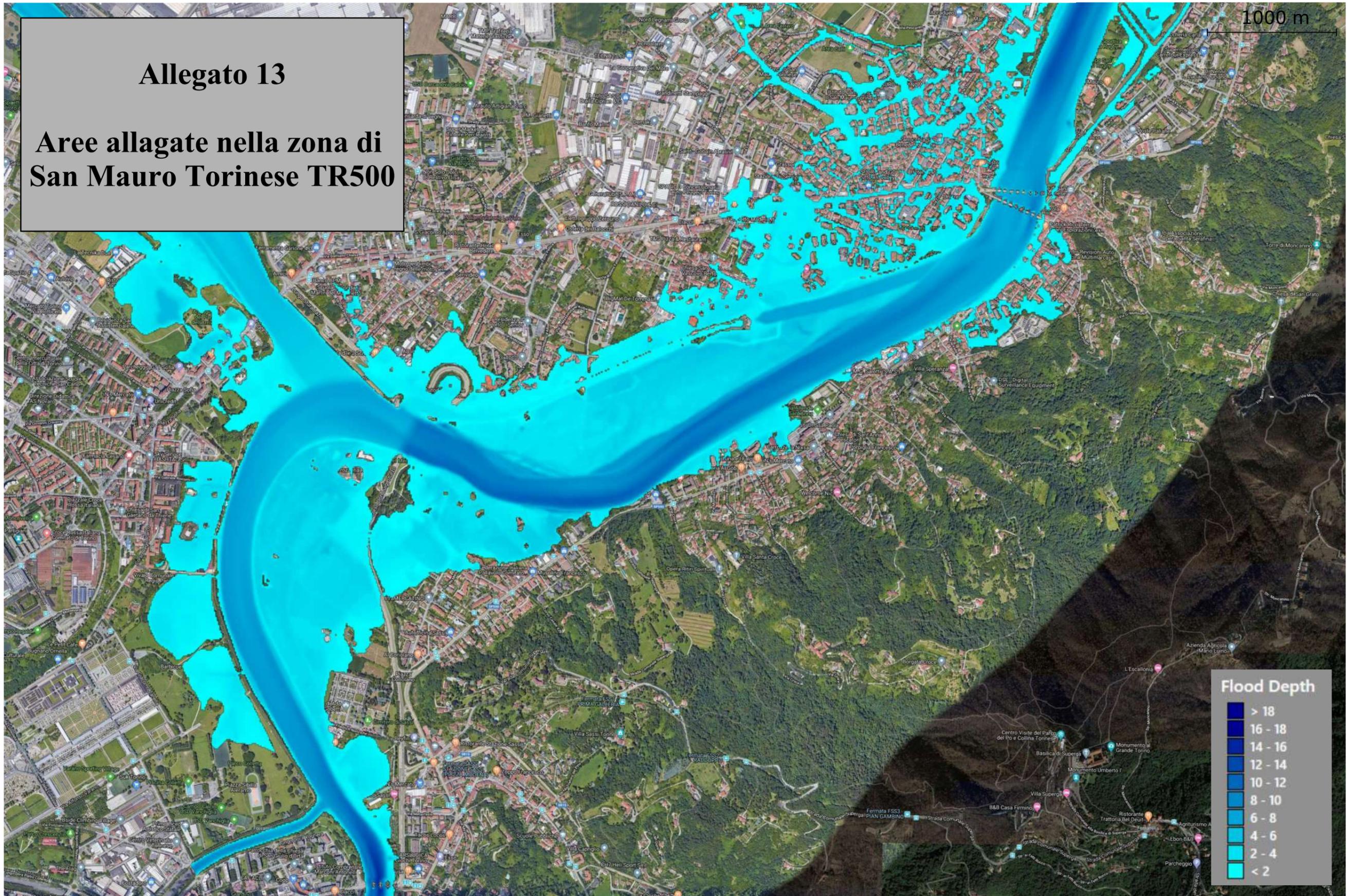
Aree allagate nella zona di Torino TR500



Allegato 13

Aree allagate nella zona di San Mauro Torinese TR500

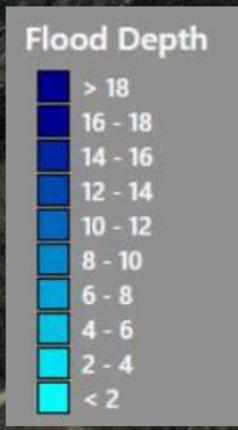
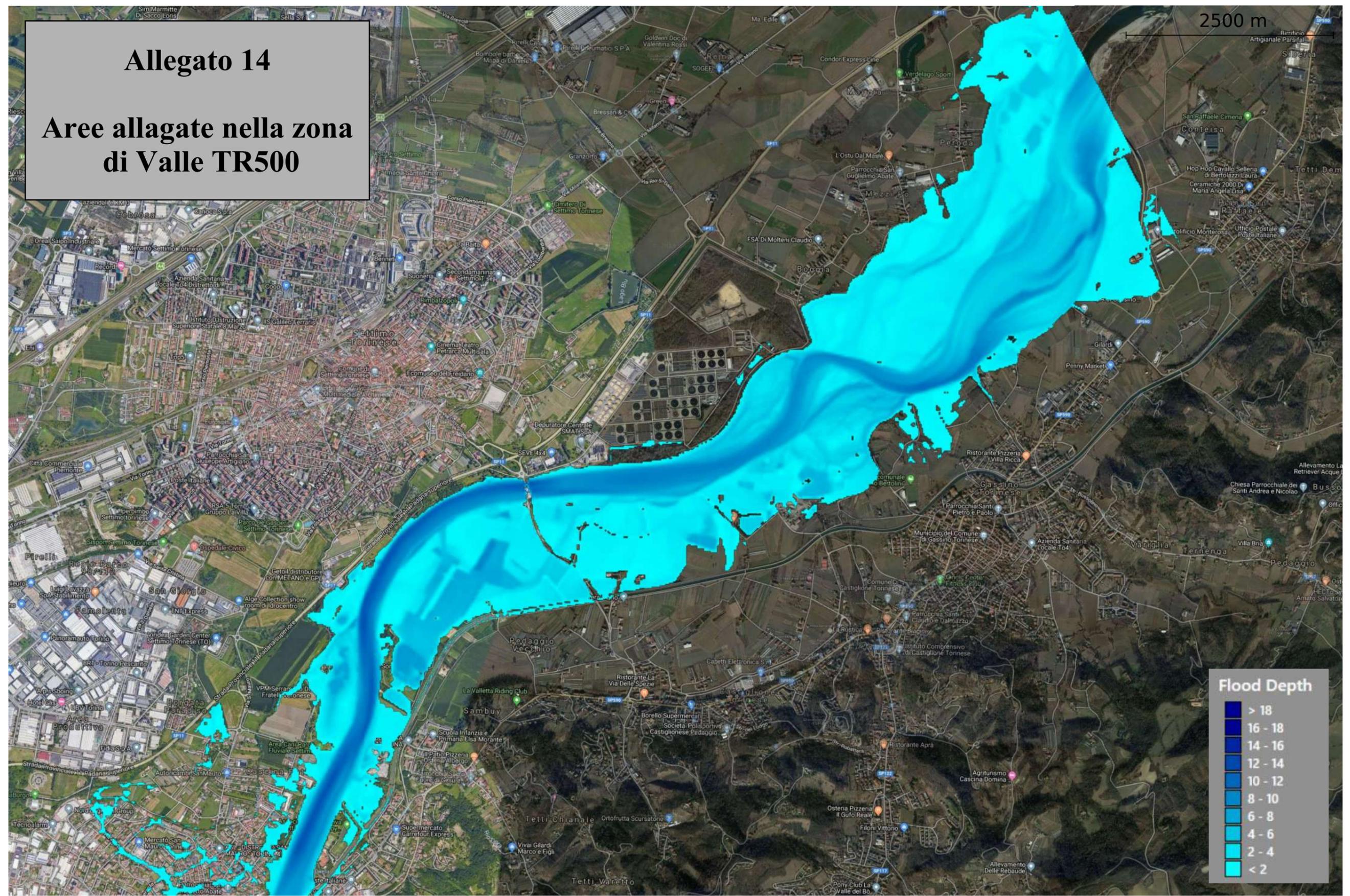
1000 m



Allegato 14

Aree allagate nella zona di Valle TR500

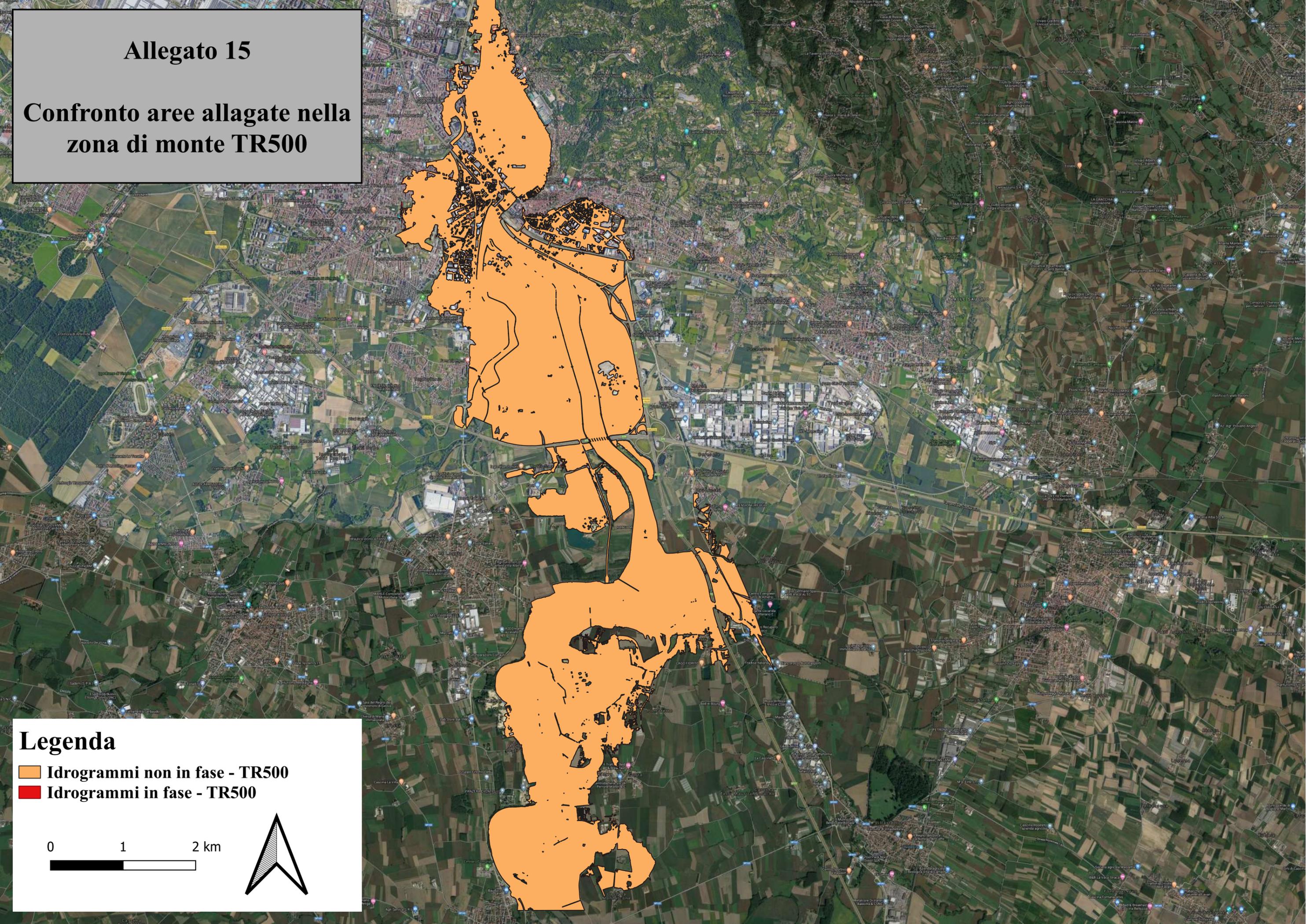
2500 m



ALLEGATI CONFRONTO TR500

Allegato 15

Confronto aree allagate nella zona di monte TR500



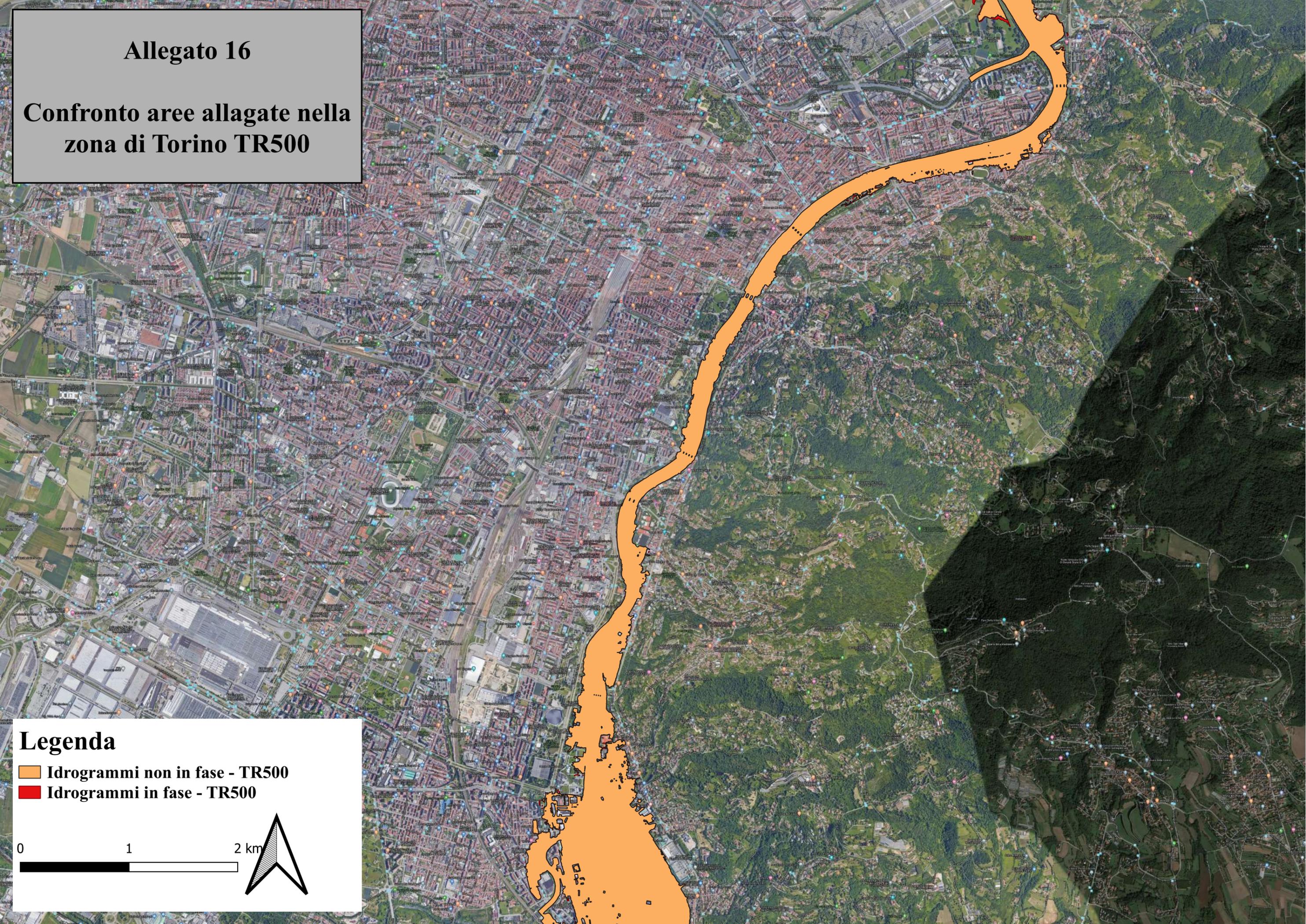
Legenda

-  Idrogrammi non in fase - TR500
-  Idrogrammi in fase - TR500



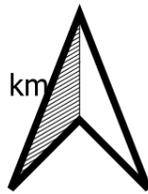
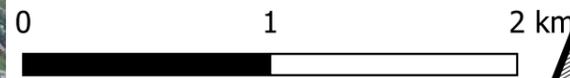
Allegato 16

Confronto aree allagate nella zona di Torino TR500



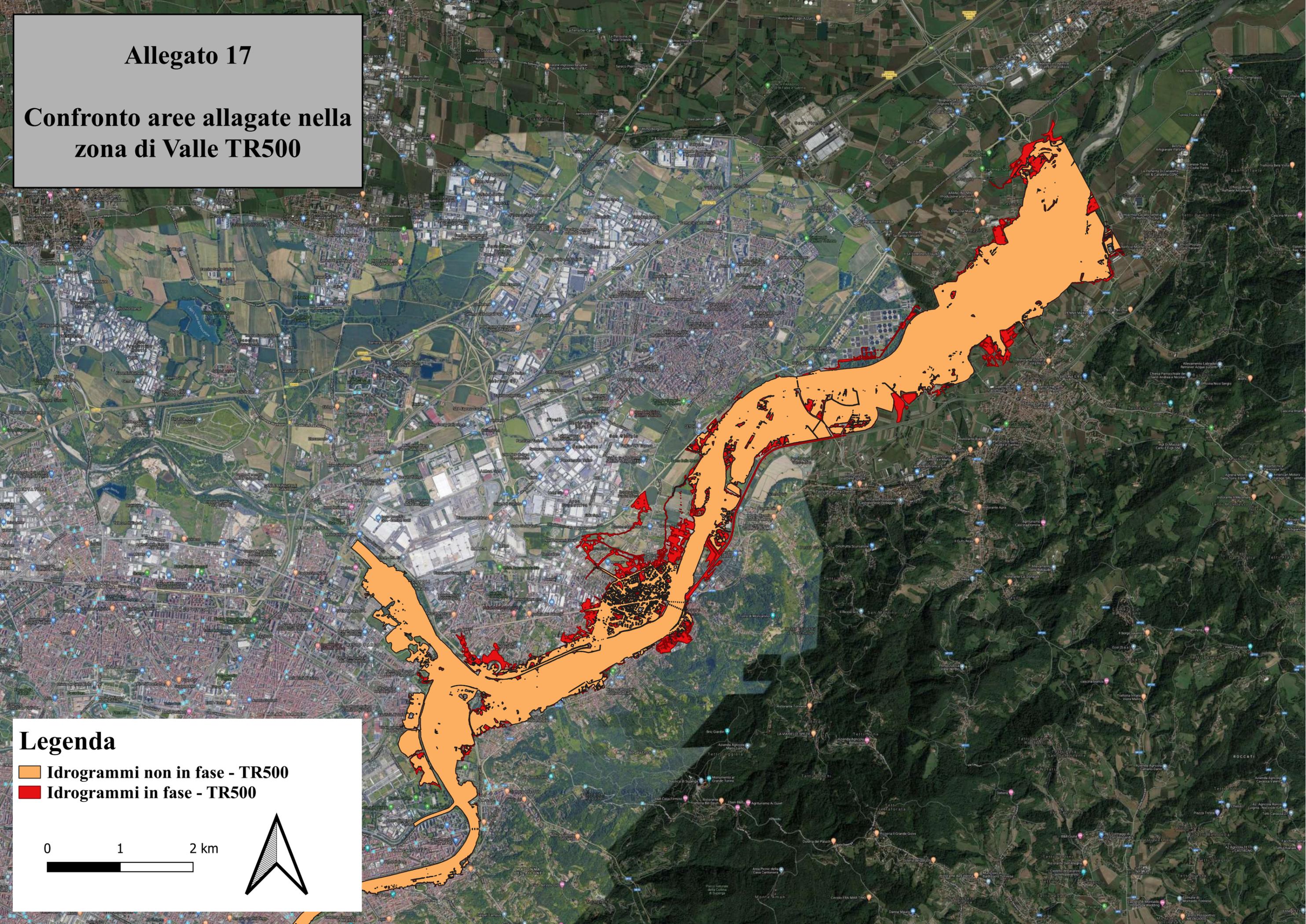
Legenda

-  Idrogrammi non in fase - TR500
-  Idrogrammi in fase - TR500



Allegato 17

Confronto aree allagate nella zona di Valle TR500

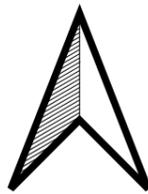


Legenda

 Idrogrammi non in fase - TR500

 Idrogrammi in fase - TR500

0 1 2 km



RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare tutte le persone che mi hanno supportato moralmente e fisicamente, in questi due anni nella bellissima città di Torino.

I professori che hanno contribuito alla mia crescita umana ed accademica nonché professionale, voglio ringraziarli per gli insegnamenti e la passione e dedizione che mettono nel fare il loro lavoro.

I colleghi che, in un modo o nell'altro, hanno condiviso con me questi anni di gioie e sacrifici.

I miei colleghi - Amici, che sono stati la mia seconda famiglia a Torino, grazie perché con voi mi sono sempre sentito a casa ed è anche grazie a voi che sono riuscito a raggiungere questo obiettivo, avete reso tutto più semplice e bello. Senza di voi non sarebbe stato lo stesso.

La città, che mi ha colpito fin da subito, è stato un colpo di fulmine, ti ringrazio per tutte le gioie e dolori, traguardi ma anche sacrifici, hai contribuito alla formazione professionale e umana di me, spero ci rinvcontreremo.

I miei più preziosi ringraziamenti vanno alla mia famiglia, i miei genitori che mi hanno sempre sostenuto nei momenti difficili, ma volevo ringraziare in modo particolare mia nonna e mia zia che hanno contribuito più di tutti al raggiungimento di questo traguardo.

Per ultimi, ma non per importanza, volevo ringraziare i miei amici più cari, perché nonostante la distanza mi hanno sempre mostrato il loro calore, il loro affetto e il loro supporto, mi hanno sempre spronato e incoraggiato soprattutto nei momenti più difficili. Grazie perché senza di voi non ce l'avrei mai fatta.