

Componenti Geologica, Idrogeologica e Sismica

Relazione aree esondabili e della pericolosità Adeguamento del PGT al PGRA utilizzando i risultati della modellistica

Allegato 9

Elaborato modificato a seguito dell'approvazione delle controdeduzioni alle osservazioni, dei pareri degli Enti e dei municipi e dell'accoglimento delle proposte di modifica presentate dal C.C.

Riferimento Codice Delibera di Approvazione PGT

T.2_3430-04-01000



Comune di
Milano

Adozione: Delibera n. 2 Seduta Consiliare del 05.03.2019
Approvazione: Delibera n. 34 Seduta Consiliare del 14.10.2019
Pubblicazione: BURL Serie Avvisi e Concorsi n...

INDICE

1. PREMESSA	1
2. CARATTERISTICHE IDROLOGICHE DI PIENA	1
2.1 Fiume Lambro	1
2.2 Torrente Seveso	3
2.2.1 Riferimenti	3
2.2.2 Caratteristiche sintetiche del bacino idrografico	3
2.2.3 Interventi di laminazione in progetto	6
2.2.4 Portate lungo l'asta per i tempi di ritorno di riferimento (10, 100 e 500 anni), nelle condizioni attuali e negli scenari di progetto	7
2.2.4.1 Piano di gestione del rischio alluvioni (PGRA-2015)	7
2.2.4.2 Variante al PAI del torrente Seveso (2017)	8
2.2.5 Proposta di fasce fluviali nel tratto tombato di Milano	14
2.3 Fiume Olona e torrenti Guisa e Pudiga	15
2.3.1 Geometria del fiume Olona	15
2.3.2 Portate del fiume Olona	18
2.3.3 Geometria del torrente Guisa	18
2.3.4 Portate del torrente Guisa	30
2.3.5 Geometria del torrente Pudiga	31
2.3.6 Portate del torrente Pudiga	34
2.3.7 Portate di piena Olona, Pudiga e Guisa (da Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona)	36
2.4 Torrente Garbogera	39
2.4.1 Portate del torrente Garbogera	39
3. DATI TOPOGRAFICI	40
4. ALLESTIMENTO DELLA MODELLISTICA IDRAULICA	41
4.1 Approccio metodologico	41
4.2 Messa a punto dei modelli del fiume Lambro	41
4.2.1 Messa a punto dei modelli monodimensionali	42
4.2.2 Messa a punto del modello bidimensionale delle aree esterne all'alveo	45
4.2.2.1 Costruzione della griglia di calcolo	46
4.2.2.2 Parametri e condizioni al contorno del modello MIKE Flood	48
4.3 Messa a punto del modello del torrente Seveso	49
4.3.1 Messa a punto del modello monodimensionale dell'alveo inciso	49
4.3.2 Messa a punto del modello monodimensionale del tratto tombato	52
4.3.3 Messa a punto del modello bidimensionale delle aree urbane	53
4.3.3.1 Costruzione della griglia di calcolo	53
4.3.3.2 Parametri e condizioni al contorno del modello MIKE Flood	55
4.4 Messa a punto del modello del fiume Olona e dei torrenti Guisa e Pudiga	55
4.4.1 Messa a punto del modello monodimensionale dell'alveo inciso del Guisa	55
4.4.2 Messa a punto del modello monodimensionale dell'alveo inciso del Pudiga	57
4.4.3 Messa a punto del modello monodimensionale dei tratti tombati di Olona, Guisa e Pudiga	58
4.4.4 Messa a punto del modello bidimensionale del Pudiga	60
4.4.4.1 Costruzione della griglia di calcolo	60
4.4.4.2 Parametri e condizioni al contorno del modello MIKE Flood	61
4.5 Messa a punto del modello del torrente Garbogera	62
4.5.1 Messa a punto del modello monodimensionale dell'alveo inciso	62
4.5.2 Messa a punto del modello monodimensionale del tratto tombato	64

4.5.3	Messa a punto del modello bidimensionale delle aree urbane	66
4.5.3.1	Costruzione della griglia di calcolo	66
4.5.3.2	Parametri e condizioni al contorno del modello MIKE Flood	68
5.	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	68
5.1	Fiume Lambro	68
5.1.1	Tratto a monte dell'attraversamento ferroviario presso viale Lazio	68
5.1.2	Tratto a valle dell'attraversamento ferroviario presso viale Lazio	78
5.2	Torrente Seveso	86
5.3	Torrente Guisa	95
5.4	Torrente Pudiga	98
5.5	Torrente Garbogera	106
5.6	Cartografia di sintesi dei risultati	115

ALLEGATI

ALLEGATO 1 - Descrizione del codice di calcolo MIKE 11 – HD.

ALLEGATO 2 - Descrizione del codice di calcolo MIKE URBAN CS.

ALLEGATO 3 - Descrizione del codice di calcolo MIKE 21 – HD.

1. PREMESSA

Oggetto della presenta relazione è il G_ALL_09 "Relazione aree esondabili e della pericolosità (Adeguamento del PGT al PGRA utilizzando i risultati della modellistica).

Lo studio è stato condotto mediante la messa a punto ed applicazione di modelli numerici di simulazione che combinano dinamicamente l'approccio monodimensionale e quello bidimensionale: il deflusso lungo l'alveo inciso dei corsi d'acqua in esame o nei tratti tominati degli stessi è rappresentato con modelli numerici monodimensionali, mentre l'allagamento delle aree golenali o urbanizzate esterne ad essi è riprodotto con modelli bidimensionali. I modelli monodimensionali sono accoppiati a quelli bidimensionali in continuo lungo le sponde dell'alveo inciso o in corrispondenza dei pozzetti di ispezione dei tratti tominati, dove avvengono gli scambi di portata da un modello all'altro.

Con i modelli sono stati simulati i tratti, ricadenti all'interno del Comune di Milano, del fiume Lambro e dei torrenti Seveso, Garbogera, Pudiga e Guisa, considerando diversi tempi di ritorno (10 anni, 100 o 200 anni e 500 anni) al fine di determinare le mappe di allagamento e la successiva Valutazione della Pericolosità correlata ad una specifica disciplina normativa.

Con i modelli idrodinamici sono stati simulati in moto vario, per i vari tempi di ritorno considerati e per ciascun corso d'acqua in esame, le condizioni relative allo scenario di riferimento ATTUALE senza interventi.

2. CARATTERISTICHE IDROLOGICHE DI PIENA

2.1 Fiume Lambro

Per la definizione dei valori delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno si è fatto riferimento al P.G.R.A. (Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni) dell'Autorità di bacino del fiume Po, che per il Lambro fornisce i valori con TR = 10, 200 e 500 anni, come riportato dall'estratto della tabella 4.7 del P.G.R.A. di seguito allegata.

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km ²	Q10 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s	Idrometro Denominazione
		Progr.(km)	Cod.	Denomin.						
Lambro	Lambro	71.266	LA 78	Milano (Ponte via Feltre)	432	180	315	340	Lambro a Milano - via Feltre	
Lambro	Lambro	80.176	LA 67	Traversa Bolgiano	444	115	210	230		

Tabella 1 – Estratto della tabella 4.7 del P.G.R.A. per il bacino del Lambro.

La delimitazione delle aree caratterizzate da Pericolosità Idraulica ai sensi del P.G.R.A. è riportata nella seguente Figura 1.

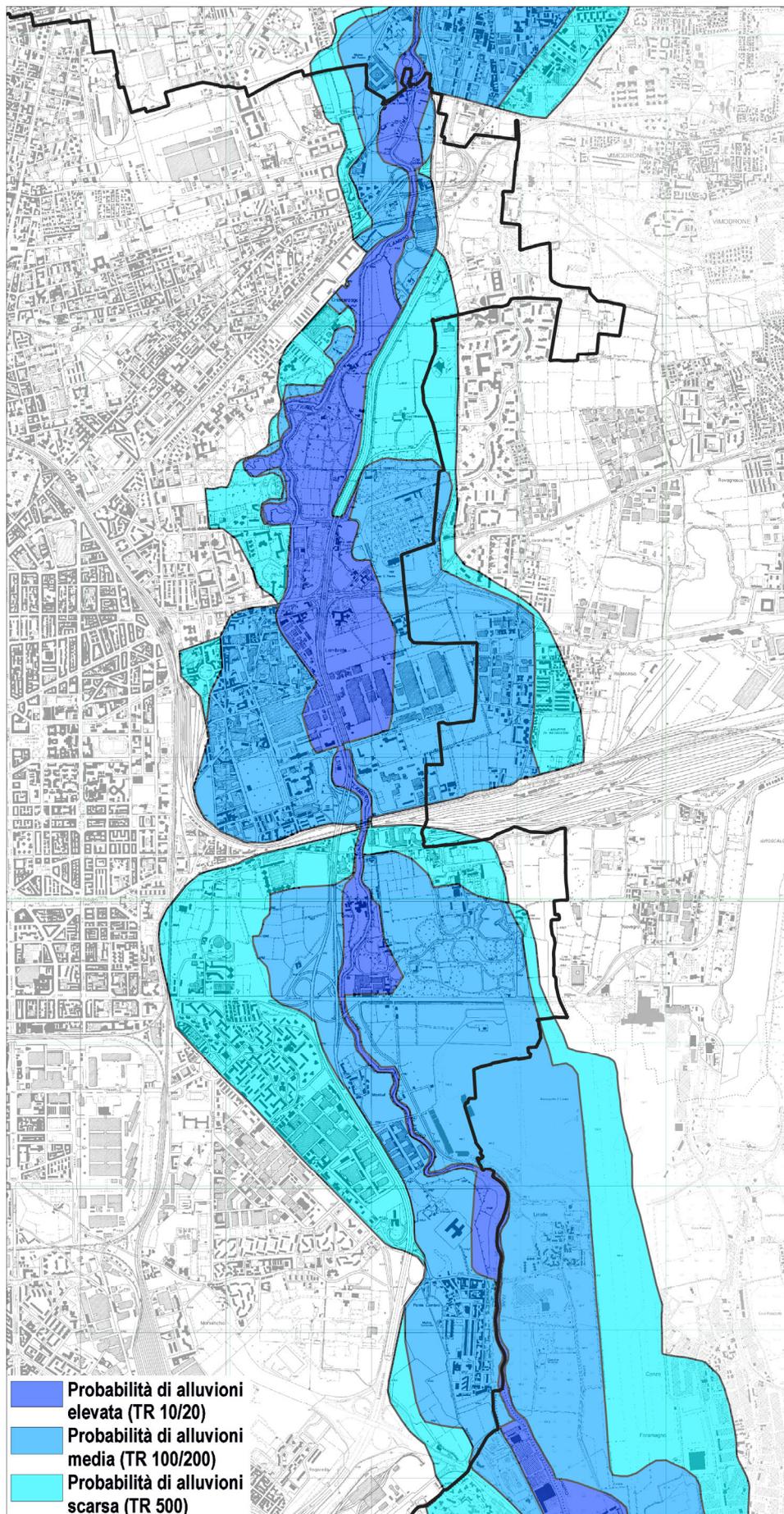


Figura 1 – Cartografia delle aree a Pericolosità idraulica elevata, media e bassa per il Lambro a Milano.

Poiché le verifiche idrodinamiche sono state condotte in moto vario, è stato infine necessario definire gli idrogrammi di piena di riferimento di assegnato tempo di ritorno. Nella Figura 2 sono rappresentati gli idrogrammi di piena adottati, con forma tratta dagli studi pregressi, opportunamente riscaldati tra loro in modo che fossero caratterizzati da una portata al colmo pari a quella definita nella Tabella 1.

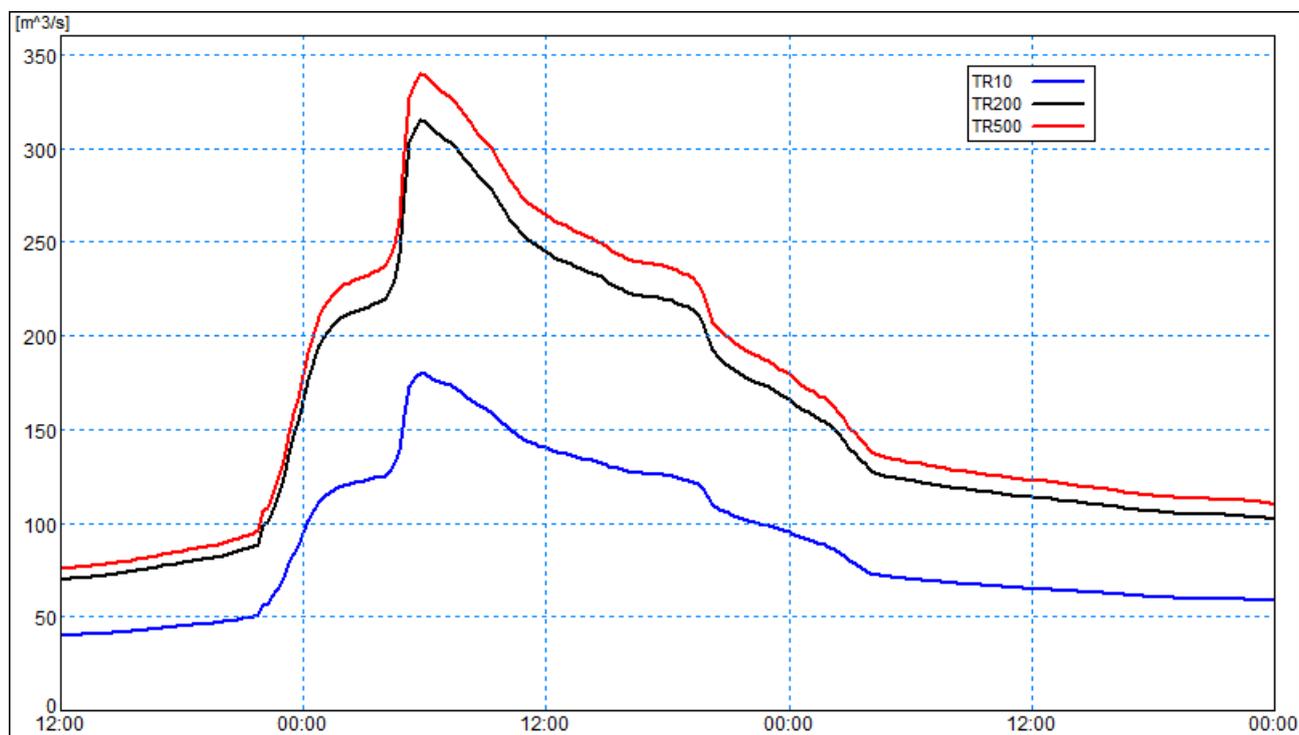


Figura 2 – Idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno del Lambro a Milano via Feltre.

2.2 Torrente Seveso

2.2.1 Riferimenti

La finalità è quella di riportare le caratteristiche idrologiche del torrente Seveso per il tratto di competenza del comune di Milano, che parte a monte dal confine con il comune di Bresso e termina a valle con la confluenza nel Naviglio Martesana, in prossimità di via Melchiorre Gioia.

Rispetto alla lunghezza complessiva del tratto all'interno del territorio comunale, pari a circa 5,7 km, la prima parte è ancora a cielo libero a partire dal confine comunale fino a via Ornato per una lunghezza di circa 1,5 km; la restante parte è interamente tombata fino alla confluenza.

Gli elementi idrologici che sono ripresi nel seguito sono tratti dalla *“Relazione tecnica dello schema di progetto di variante al PAI del torrente Seveso - Aggiornamento delle analisi idrologiche e idrauliche del torrente Seveso a supporto della predisposizione della variante al Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico”* predisposta dall'Autorità di bacino distrettuale del fiume Po.

2.2.2 Caratteristiche sintetiche del bacino idrografico

Il torrente Seveso nasce dal monte Pallanza in comune di San Fermo della Battaglia (CO), in vicinanza del confine svizzero con il Canton Ticino, in provincia di Como, circa a quota 490 m s.m., tocca vari centri abitati della Brianza ed entra in Milano nella periferia settentrionale della città attraverso cui prosegue tombato.

La superficie complessiva del bacino idrografico sotteso è pari a 267 km², alla sezione in cui ha inizio il tratto tombato. La lunghezza complessiva dell'asta è pari a circa 39 km, ad eccezione dell'ultimo tratto tombato dentro Milano.

Le caratteristiche complessive del bacino sono sintetizzabili nei seguenti punti:

- il bacino montano-collinare è di tipo prevalentemente naturale e genera onde di piena con volumi superiori a quelli degli ambiti collinari e urbani degli altri corsi d'acqua limitrofi (Groane, Bozzente e Lura);
- il tratto di pianura, successivo al tratto collinare, da Lentate sul Seveso a Milano per circa 18 km, presenta aree urbanizzate di vaste proporzioni ed inoltre in buona parte di tale tratto (da Lentate a Cusano Milanino) l'alveo è incassato di parecchi metri rispetto al piano campagna;
- lo sviluppo urbanistico dei comuni dell'hinterland a monte ha causato la progressiva impermeabilizzazione di vaste aree con aumento notevole delle portate scaricate dal reticolo fognario, che risulta in grado di saturare la capacità di deflusso dell'alveo per eventi associati a modesto tempo di ritorno, pur in assenza di afflussi da monte;
- il sistema spondale per ampi tratti è costituito dai muri delle case realizzate ai margini dell'alveo, che in alcuni casi ne riducono la capacità di deflusso;
- l'alveo è tombinato per gran parte del percorso nel territorio comunale di Milano, con capacità di deflusso (stimata in 30÷40 m³/s e limitata da vincoli a valle) assai inferiore rispetto all'apporto di monte; tale capacità idraulica è appena sufficiente al deflusso delle acque meteoriche urbane provenienti da monte per eventi che non superino i 2 anni di tempo di ritorno.

Per la Città di Milano, gli eventi alluvionali del Seveso assumono una frequenza media di più volte l'anno; secondo i dati disponibili, a Milano dal 1976 ad oggi si sono verificate 104 esondazioni (in media 2,6 esondazioni all'anno). Negli ultimi anni sono stati particolarmente critici il 2010, durante il quale si sono verificate 8 esondazioni, di cui particolarmente grave quella del 18 settembre, e il 2014, con 8 esondazioni nel periodo 25 giugno ÷ 16 novembre, tra cui quelle dell'8 luglio e del 15 novembre in cui si sono verificate portate al colmo prossime a 100 anni di tempo di ritorno, che hanno causato diverse gravi situazioni di allagamento non solo a Milano – Niguarda, ma anche in altri comuni lungo l'intera asta del Seveso.

In sintesi, il comportamento idrologico in piena del bacino idrografico del Seveso può essere distinto in 4 parti:

- la parte montana, più settentrionale, denominata "Seveso naturale", afferente all'asta dalla sorgente fino al comune di Lentate sul Seveso, presenta versanti acclivi o mediamente acclivi ed è caratterizzata da urbanizzazione ridotta e comunque tale da non produrre modifiche rilevanti rispetto al processo di piena naturale;
- la seconda parte, denominata "Certesa naturale", ad est della precedente e afferente al torrente Certesa (o Roggia Vecchia), principale affluente del Seveso, si estende dalle sorgenti fino alla confluenza con il torrente Terrò ed è caratterizzata da versanti acclivi e da scarsa urbanizzazione, in modo analogo al Seveso naturale;
- la terza parte, denominata "Certesa urbano", anch'essa afferente al Certesa, dalla confluenza con il Terrò fino alla confluenza nel Seveso, presenta versanti poco acclivi e vaste aree urbanizzate (Mariano Comense, Cabiato e Meda);
- la quarta parte, denominata "Seveso urbano", afferente direttamente al Seveso, da Lentate all'ingresso nel tratto tombato nel comune di Milano, presenta versanti pressoché pianeggianti e un'elevata urbanizzazione (Barlassina, Seveso, Cesano Maderno, Bovisio Masciago, Varedo, Paderno Dugnano, Cusano Milanino, Cormano, Bresso e Cinisello Balsamo).

Alle quattro parti in cui è stato suddiviso il bacino idrografico del Seveso possono essere assegnati funzionamenti idrologici di formazione delle piene diversi: nel Seveso naturale e nel Certesa naturale dipendono esclusivamente dalle caratteristiche geomorfologiche mentre nel Seveso urbano e nel Certesa urbano, eccetto gli apporti di alcuni piccoli affluenti (es. Comasinella), risultano influenzati principalmente dalla capacità di smaltimento delle reti di drenaggio urbano.

La superficie complessiva del bacino del Seveso, chiuso all'ingresso nel tratto tombinato di Milano in via Ornato è pari a circa 267 km², 106 dei quali di aree urbane (47%). Il sottobacino idrografico del torrente Certesa, affluente principale del Seveso, è pari a circa 72 km².

Se si considera poi come sezione di riferimento la presa del CSNO, ubicata a Palazzolo (Comune di Paderno Dugnano), ove vengono scolmate una parte delle portate di piena del Seveso, il bacino idrografico ha un'estensione di circa 190 km², 82 dei quali di aree urbane (43%). **Come differenza si ha che il bacino idrografico del Seveso compreso tra la presa del CSNO e Milano è pari a 36 km², di cui 24 di aree urbanizzate (67%).**

La lunghezza dell'asta del torrente Seveso fino a Milano (dall'ospedale S. Anna di Como) è pari a circa 39 km, 32 dei quali fino alla presa del CSNO in località Palazzolo e i restanti 7 km dalla presa fino all'ingresso nel tratto tombinato in Milano.

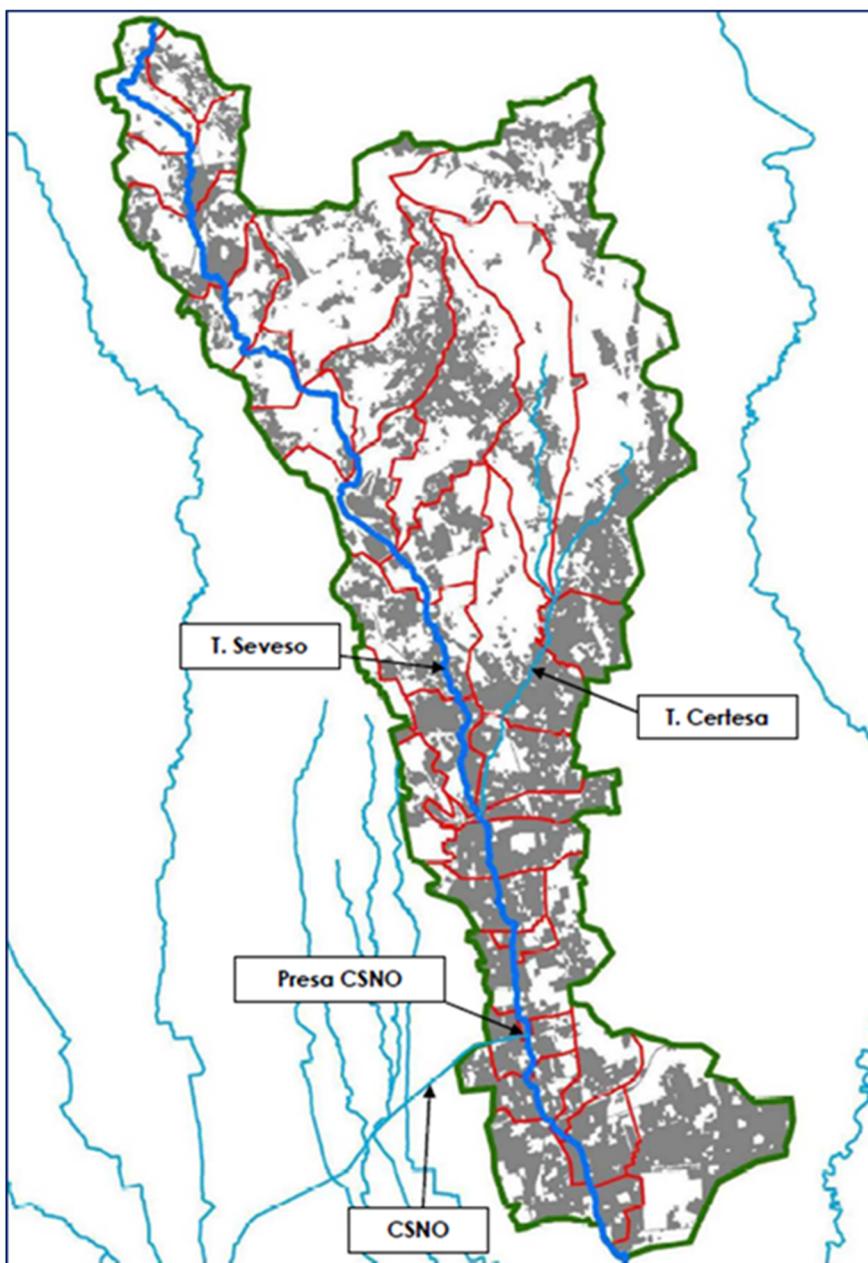


Figura 3 – Bacino idrografico del torrente Seveso.

2.2.3 Interventi di laminazione in progetto

L'ultimo aggiornamento degli interventi di laminazione in progetto previsti lungo l'asta del torrente Seveso è costituito dalle seguenti opere:

- progetto di realizzazione di **3 aree di laminazione golenale** per un **volume complessivo di circa 150'000 m³** nel tratto interessato dai **comuni di Cavallasca, Grandate, Luisago, Montano Lucino, S. Fermo della Battaglia e Villa Guardia**;
- progetto preliminare di **adeguamento delle aree golenali nei comuni di Vertemate con Minoprio, Carimate e Cantù**, redatto da AIPO (2015), costituito dalle seguenti opere di laminazione:
 - Comune di Vertemate con Minoprio:
 - area di laminazione 1: volume pari a 66'500 m³;
 - Area di laminazione 2: volume pari a 71'500 m³;
 - Area di laminazione 3: volume pari a 71'800 m³;
 - Comune di Cantù:
 - Area di laminazione 4: volume pari a 52'500 m³;
 - Comune di Carimate:
 - Area di laminazione 5: volume pari a 57'500 m³;
 - Area di laminazione 6: volume pari a 202'300 m³.

Il **volume di invaso complessivo** delle sei aree golenali è pari a circa **522'100 m³**. Tale risultato è stato conseguito attraverso l'abbassamento del piano campagna, mediante interventi di scavo e rimodellamento;

- progetto definitivo dell'**area di laminazione in Comune di Lentate**, redatto da AIPO (2016), costituito dalle seguenti opere di laminazione:
 - area di laminazione golenale: volume pari a 20'000 m³;
 - area di laminazione in scavo: volume pari a 808'000 m³.

Il **volume di invaso previsto complessivamente** in Comune di Lentate è pari a circa **828'000 m³**;

- progetto preliminare dell'**area di laminazione in Comune di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate**, redatto da AIPO (2015), caratterizzata da un **volume pari a circa 2'200'000 m³**;
- **vasca di laminazione in Comune di Senago (MI)** in fase di realizzazione sulla base del progetto AIPO. Posta lungo il CSNO, ha un **volume pari a 810'000 m³**;
- **progetto definitivo di una vasca di laminazione nel Parco Nord**, nel tratto del Seveso a valle della presa del CSNO nei pressi del cimitero di Brusuglio, redatto dal Comune di Milano (2015) con un volume di invaso pari a 250'000 m³.

In sintesi, **le previsioni di interventi di laminazione sul Seveso sono costituite dalle seguenti opere, che nel complesso invasano un volume di 4'760'000 m³**:

- aree di laminazione nella porzione più settentrionale del bacino: 150'000 m³;
- aree di laminazione nei comuni di Vertemate con Minoprio, Carimate e Cantù: 522'000 m³;
- aree di laminazione in comune di Lentate: 828'000 m³;
- area di laminazione nei comuni di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate: 2'200'000 m³;
- area di laminazione in comune di Senago: 810'000 m³;
- area di laminazione in comune di Milano: 250'000 m³.

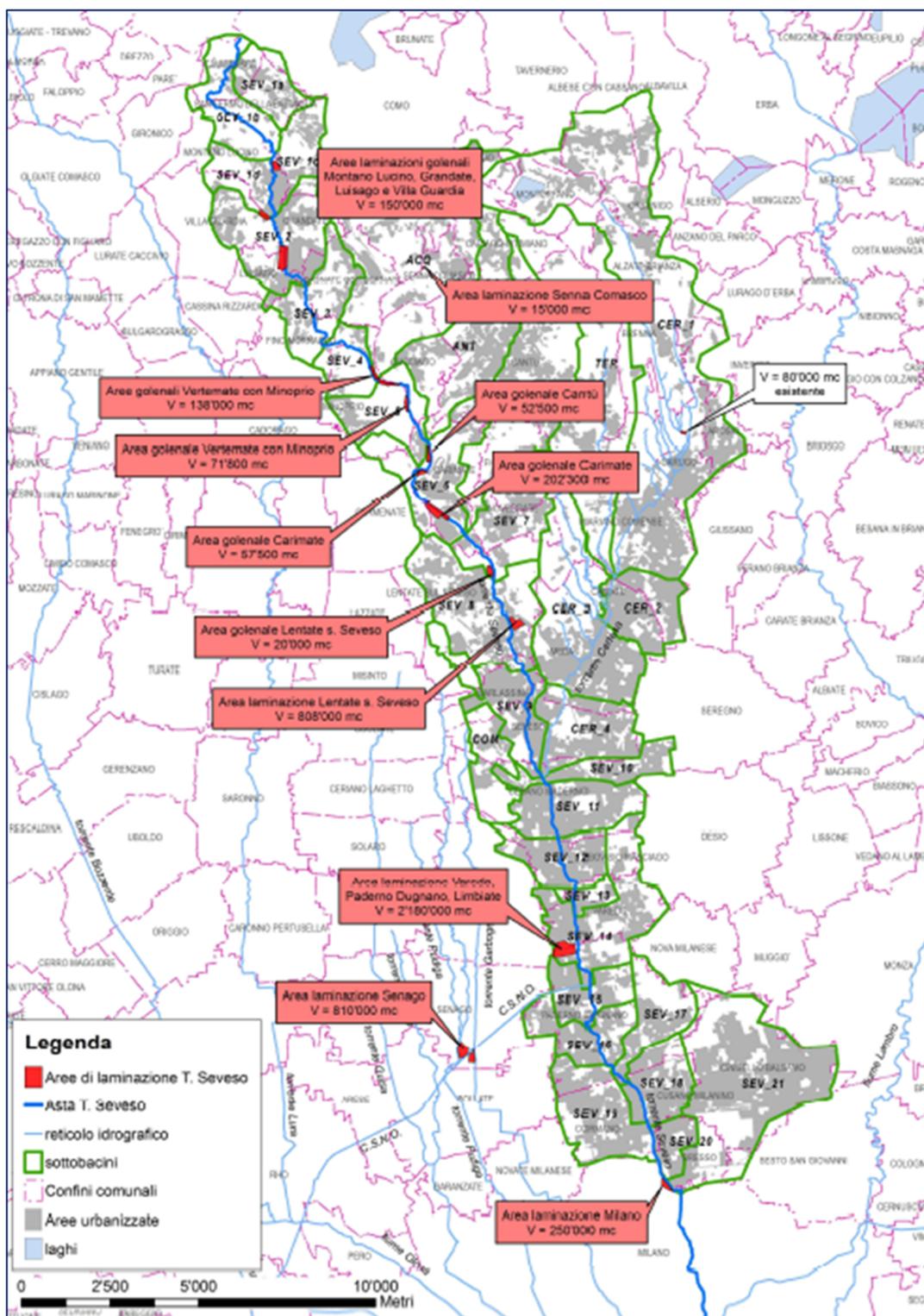


Figura 4 – Opere di laminazione in progetto e in corso di realizzazione lungo l'asta del torrente Seveso.

2.2.4 Portate lungo l'asta per i tempi di ritorno di riferimento (10, 100 e 500 anni), nelle condizioni attuali e negli scenari di progetto

2.2.4.1 Piano di gestione del rischio alluvioni (PGRA-2015)

Il Piano di gestione del rischio alluvione (PGRA) dell'Autorità di bacino del fiume Po definisce nell'Allegato "Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale" (2016) le portate di piena per i tempi di ritorno di riferimento per il torrente Seveso.

Bacino	Corso d'acqua	Sezione		Superficie km ²	Q10 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s	Idrometro Denominazione
		Progr.(km)	Cod.						
Lambro	Seveso	1.861	SV 99	Grandate	13	10	30	50	
Lambro	Seveso	11.660	SV 77	Cantù	48	35	60	75	Seveso a Cantù - Asnago
Lambro	Seveso	24.230	SV 40	Cesano Mademo	169	80	160	210	
Lambro	Seveso	30.231	SV 25	Palazzolo (monte presa CSNO)	191	90	165	210	Seveso a Palazzolo
Lambro	Seveso	31.092	SV 23	Palazzolo (valle presa CSNO)	191	60	135	180	
Lambro	Seveso	38.041	SV 2	Milano (ingr. Tombinatura)	267	70	140	260	Seveso a Niguarda

Figura 5 – Estratto dalla tabella 4.7, portate di piena per i corsi d'acqua principali del bacino del Lambro, dell'Allegato al PGRA relativo al torrente Seveso.

Le sezioni di interesse per il tratto di corso d'acqua in studio sono rispettivamente la SV 23, a Palazzolo (valle presa del CSNO) e quella in corrispondenza dell'inizio del tratto tombinato.

2.2.4.2 Variante al PAI del torrente Seveso (2017)

Sulla base delle analisi idrologiche e idrauliche la Variante definisce i nuovi valori per le portate di riferimento sia per la situazione attuale sia (con riferimento al tempo di ritorno di 100 anni) per la situazione di progetto.

Sezione	Q10 (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)	Q500 (m ³ /s)	Q100 - progetto (m ³ /s)
SV23	113,3	132,9	163,9	40,3
SV2	92,5	112,3	145,5	17,9

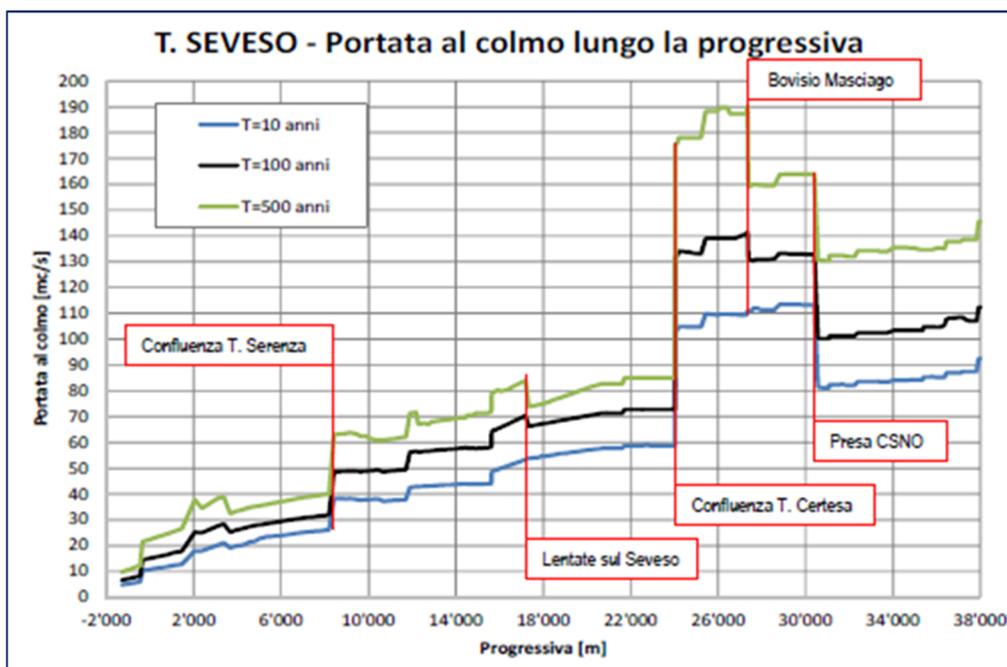


Figura 6 – Portata di piena al colmo del torrente Seveso – assetto attuale (da Variante al PAI del torrente Seveso, 2017).

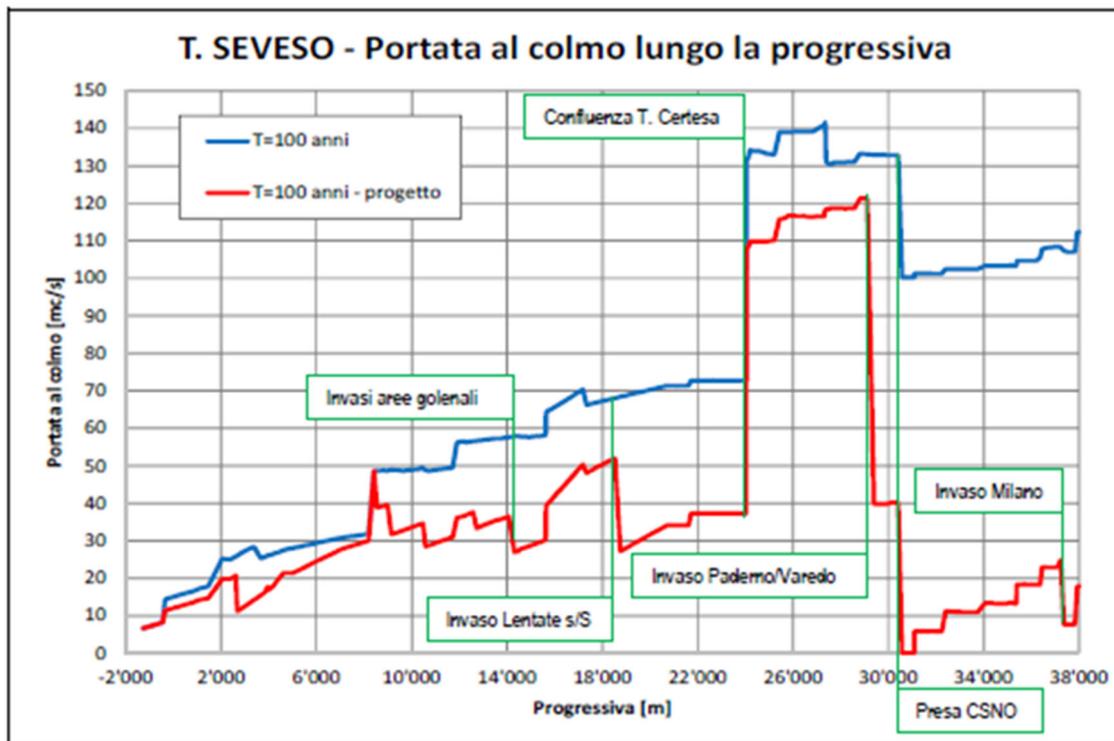


Figura 7 – Portata di piena al colmo del torrente Seveso – confronto stato attuale e di progetto per TR=100 anni (da Variante al PAI del torrente Seveso, 2017).

Per le portate di riferimento sono forniti i seguenti **idrogrammi di piena**.

Per le condizioni di **assetto attuale**, con TR=100 anni, in corrispondenza dell'opera di presa del CSNO si ha un colmo di 133 m³/s e il volume dell'onda di piena è pari a 6,7 Mm³ (con riferimento a 36 ore); a monte dell'ingresso del tratto tominato in Milano la portata al colmo è pari a circa 112 m³/s e il volume dell'onda di piena è pari a 4,5 Mm³.

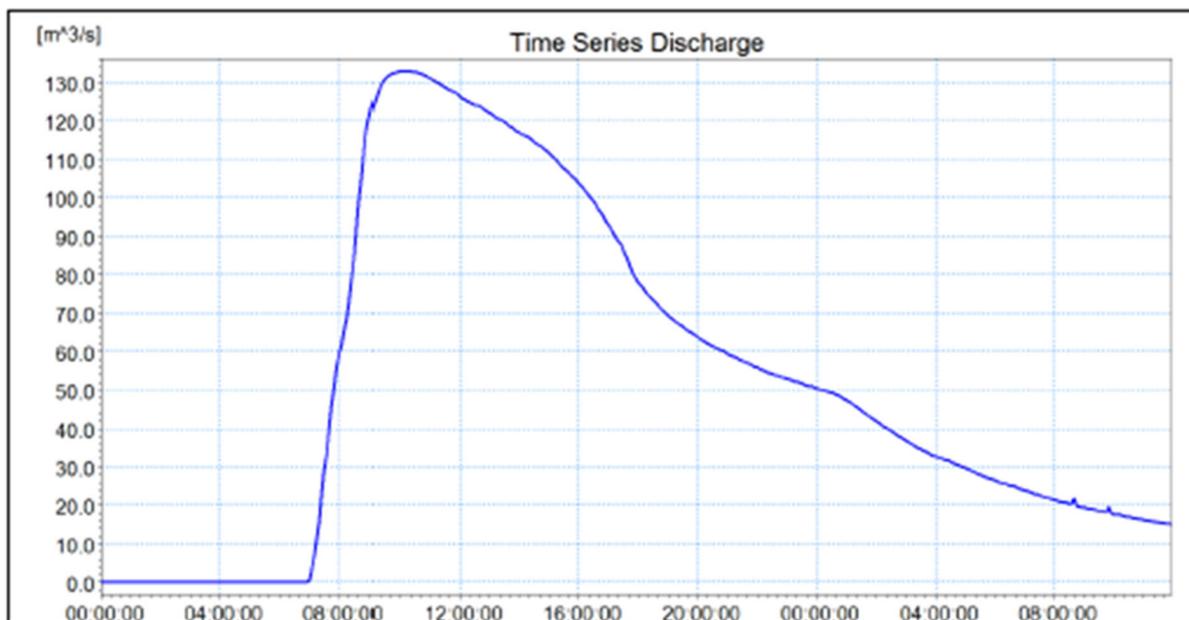


Figura 8 – Idrogramma di piena del Seveso a monte della presa del CSNO per TR=100 anni nelle condizioni di assetto attuale.

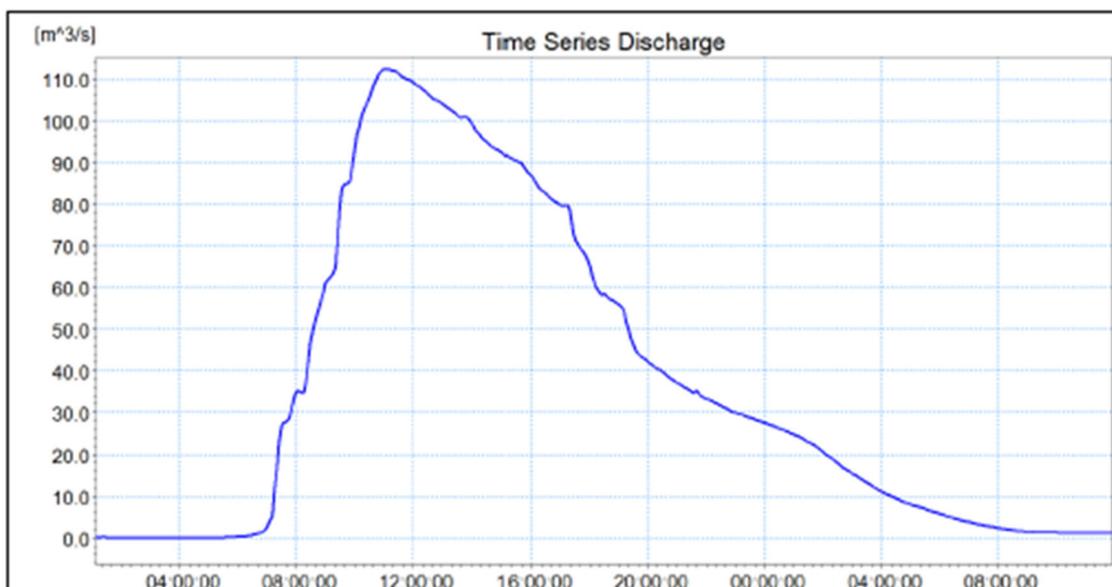


Figura 9 – Idrogramma di piena del Seveso a monte della tombinatura di Milano per TR=100 anni nelle condizioni di assetto attuale.

Per stimare il livello di confidenza dei valori determinati è utile il confronto tra l'idrogramma di piena a monte del CSNO e l'analogo ottenuto con il modello dello studio AIPo-2011. La differenza che si ha tra i risultati dei due modelli in corrispondenza nel picco deriva soprattutto dalla diversa schematizzazione del comportamento di due aree di esondazione, una a Lentate sul Seveso e l'altra a Bovisio Masciago. Nel modello del 2011 è stato utilizzato uno schema di calcolo monodimensionale senza riduzione di portata conseguente all'esondazione; nel modello 2016, in corrispondenza delle esondazioni che si verificano nei comuni di Lentate, nei pressi di via Tintoretto, e di Bovisio Masciago, dove i volumi d'acqua che esondano sono rilevanti e non rientrano più direttamente nel corso d'acqua durante l'evento di piena a causa della conformazione del territorio interessato, sono state ora inserite nello schema di calcolo dell'alveo inciso delle soglie di sfioro lungo la sponda che simulano la fuoriuscita dell'acqua dall'alveo e quindi la conseguente riduzione dell'onda di piena che prosegue verso valle.

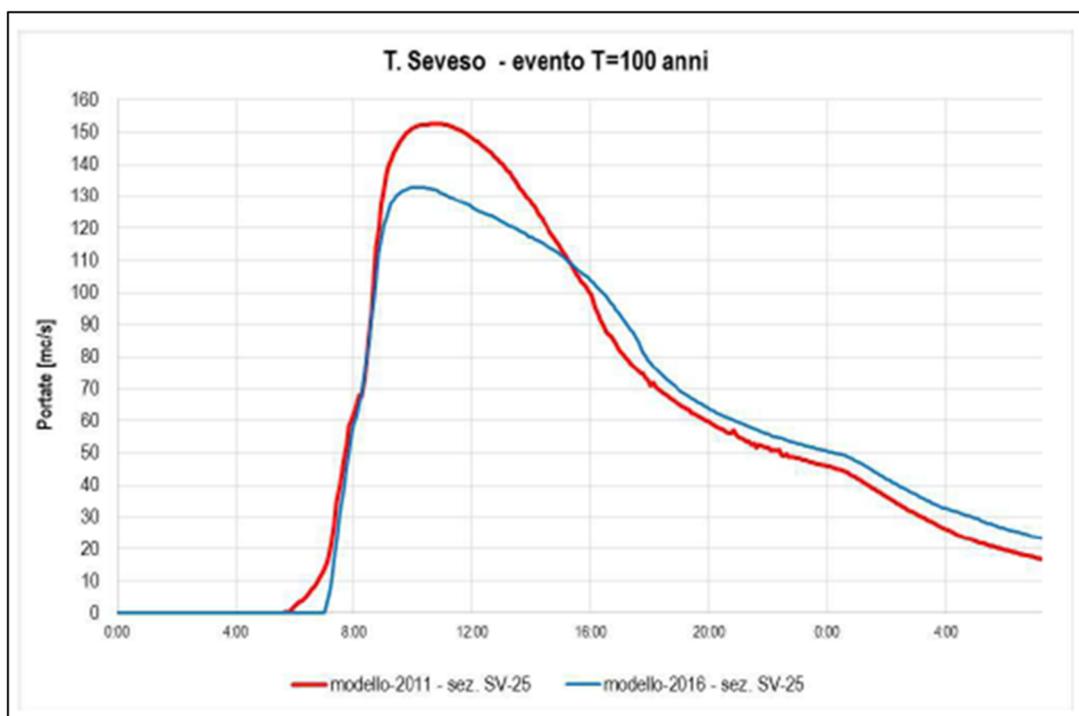


Figura 10 – Confronto tra l'idrogramma di piena del Seveso a monte della presa del CSNO (TR=100 anni) ottenuto con il modello del 2011 e con il modello 2016 nelle condizioni di assetto attuale.

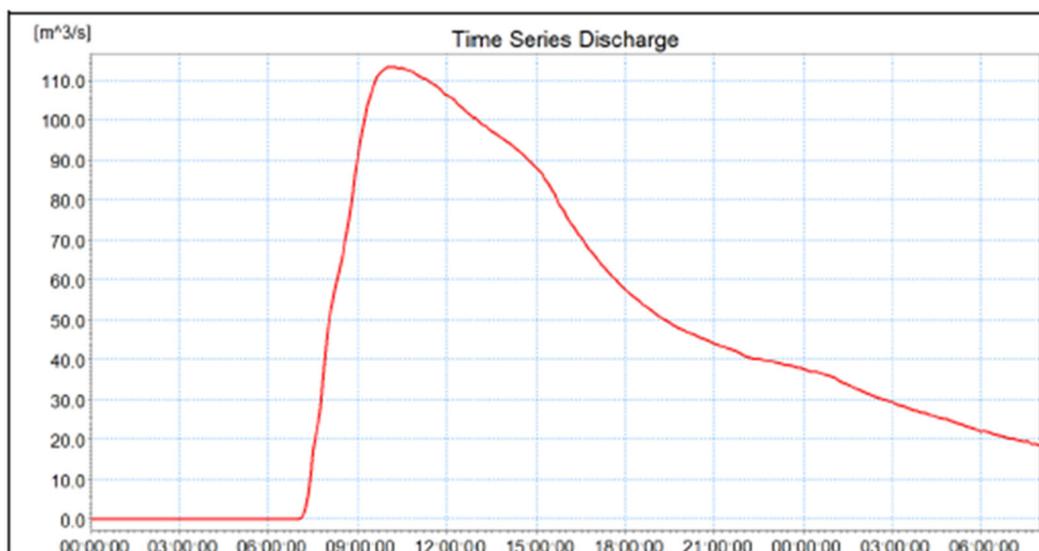


Figura 11 – Idrogramma di piena del Seveso a monte della presa del CSNO per TR=10 anni nelle condizioni di assetto attuale.

La simulazione per TR=10 anni è stata condotta considerando come valore all'istante iniziale del grado di umidità del suolo: 0,5 per i bacini naturali e 0,0 per i bacini urbani, mentre per la simulazione con TR=500 anni sono stati utilizzati gli stessi parametri della simulazione con TR=100 anni. Il fatto di aver considerato per TR=10 anni un maggior grado di umidità del suolo, deriva dalla considerazione che è più probabile che un evento meno raro possa essere preceduto da altri eventi meteorici in grado di portare il terreno a maggiori condizioni di umidità.

L'evento con TR=10 anni è caratterizzato, nella sezione a monte del CSNO, da una portata al colmo pari a circa 113 m³/s e da un volume della piena pari a 5,3 Mm³ (riferito a 36 ore di simulazione); a monte della tombinatura di Milano, invece, la portata al colmo è pari a 92 m³/s e il volume è pari a 3,3 Mm³.

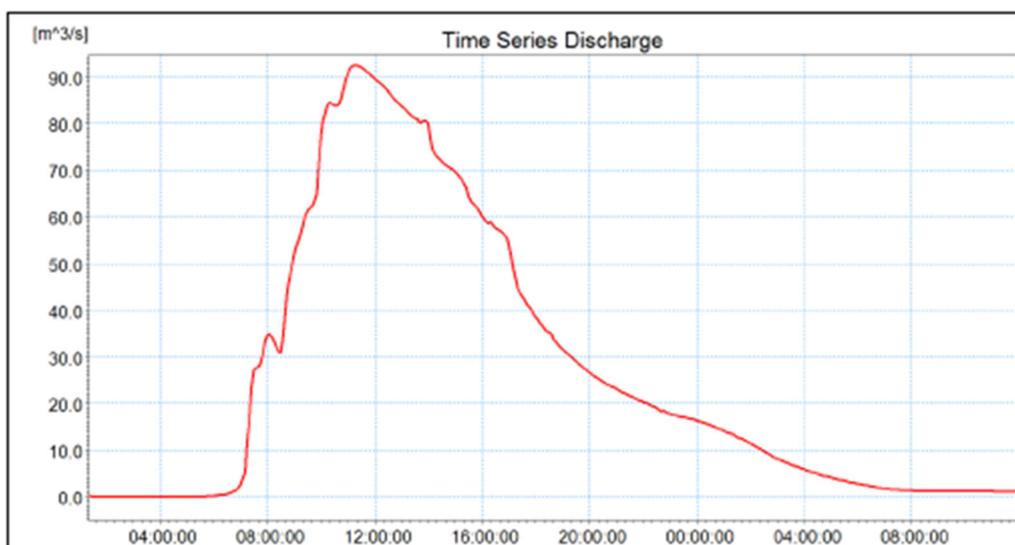


Figura 12 – Idrogramma di piena del Seveso a monte della tombinatura di Milano per TR=10 anni nelle condizioni di assetto attuale.

L'evento con TR=500 anni è caratterizzato, nella sezione a monte del CSNO, da una portata al colmo pari a circa 164 m³/s e da un volume della piena pari a 8,4 Mm³ (riferito a 36 ore di simulazione e senza considerare il volume esondato a Lentate sul Seveso e a Bovisio Masciago); a monte della tombinatura di Milano, invece, la portata al colmo è pari a 145 m³/s e il volume è pari a 6,4 Mm³.

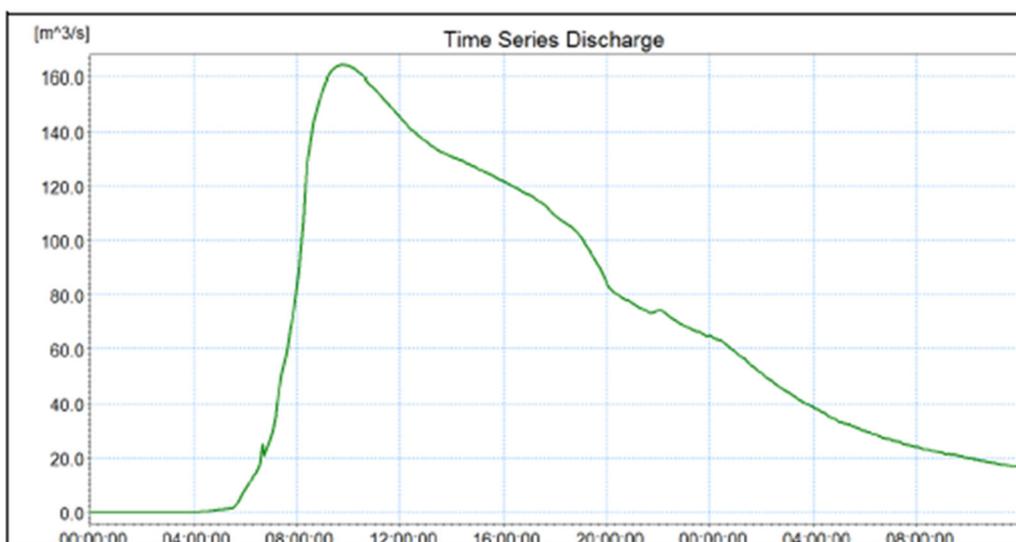


Figura 13 – Idrogramma di piena del Seveso a monte della presa del CSNO per TR=500 anni nelle condizioni di assetto attuale.

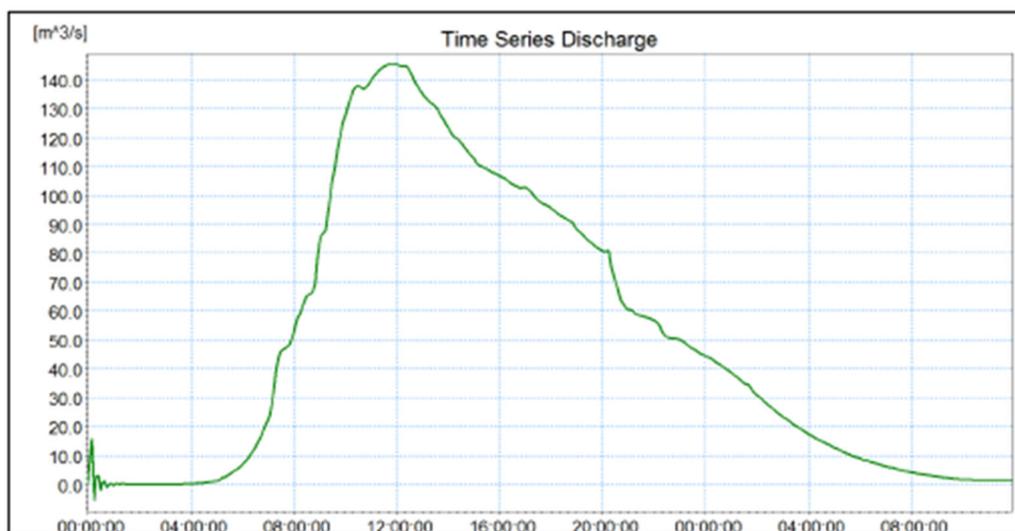


Figura 14 – Idrogramma di piena del Seveso a monte della tombinatura di Milano per TR=500 anni nelle condizioni di assetto attuale.

Per le condizioni di **assetto di progetto**, sono state inserite nel modello idrologico-idraulico del Seveso le opere previste nello studio AIPo-2011 e successivamente aggiornate ed integrate attraverso ulteriori fasi di studio e soprattutto attraverso i progetti fino ad ora elaborati (vedi p.to 2.2.3).

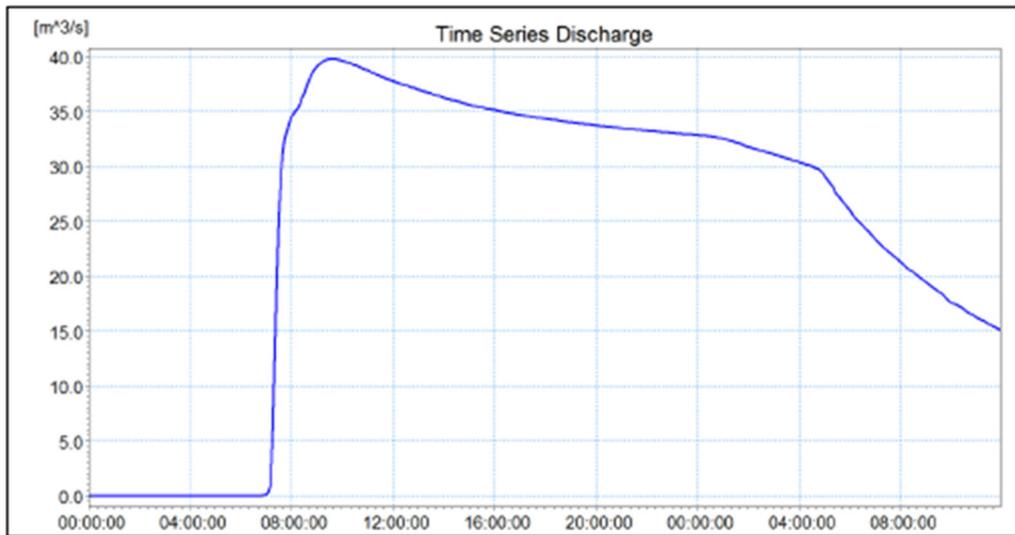


Figura 15 – Idrogramma di piena del Seveso a monte della presa del CSNO per TR=100 anni nelle condizioni di assetto di progetto.

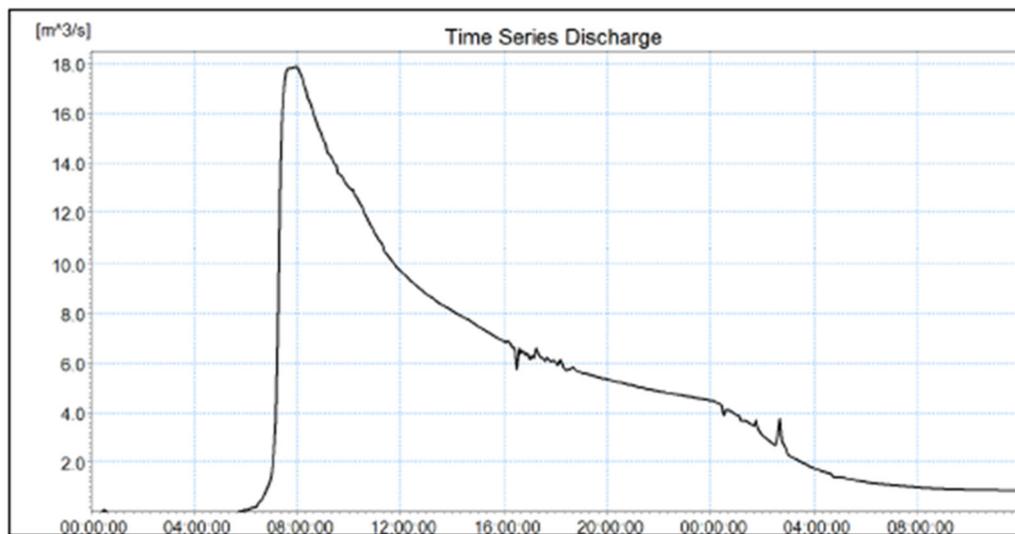
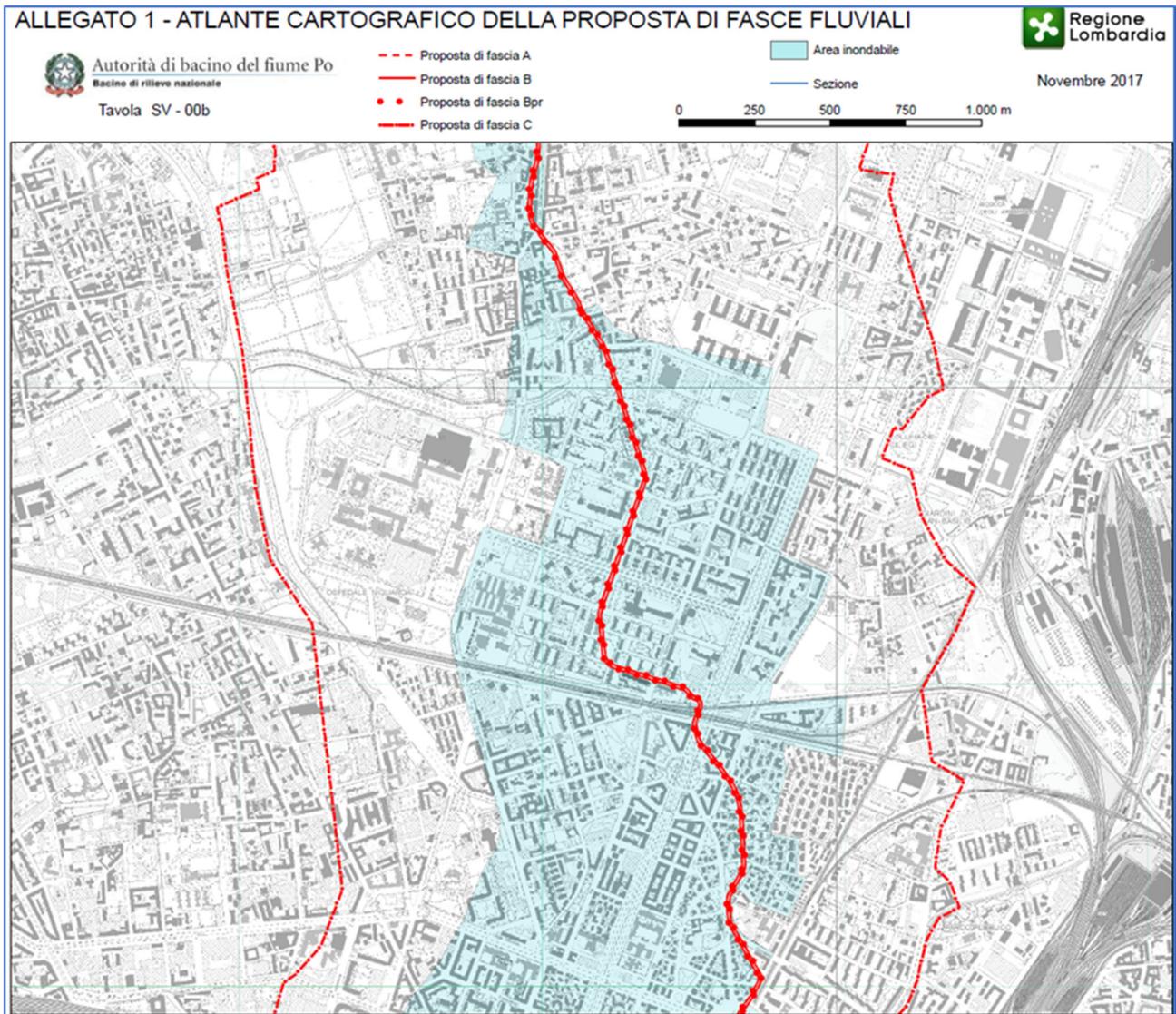


Figura 16 – Idrogramma di piena del Seveso a monte della tombinatura di Milano per TR=100 anni nelle condizioni di assetto di progetto.

2.2.5 Proposta di fasce fluviali nel tratto tombato di Milano



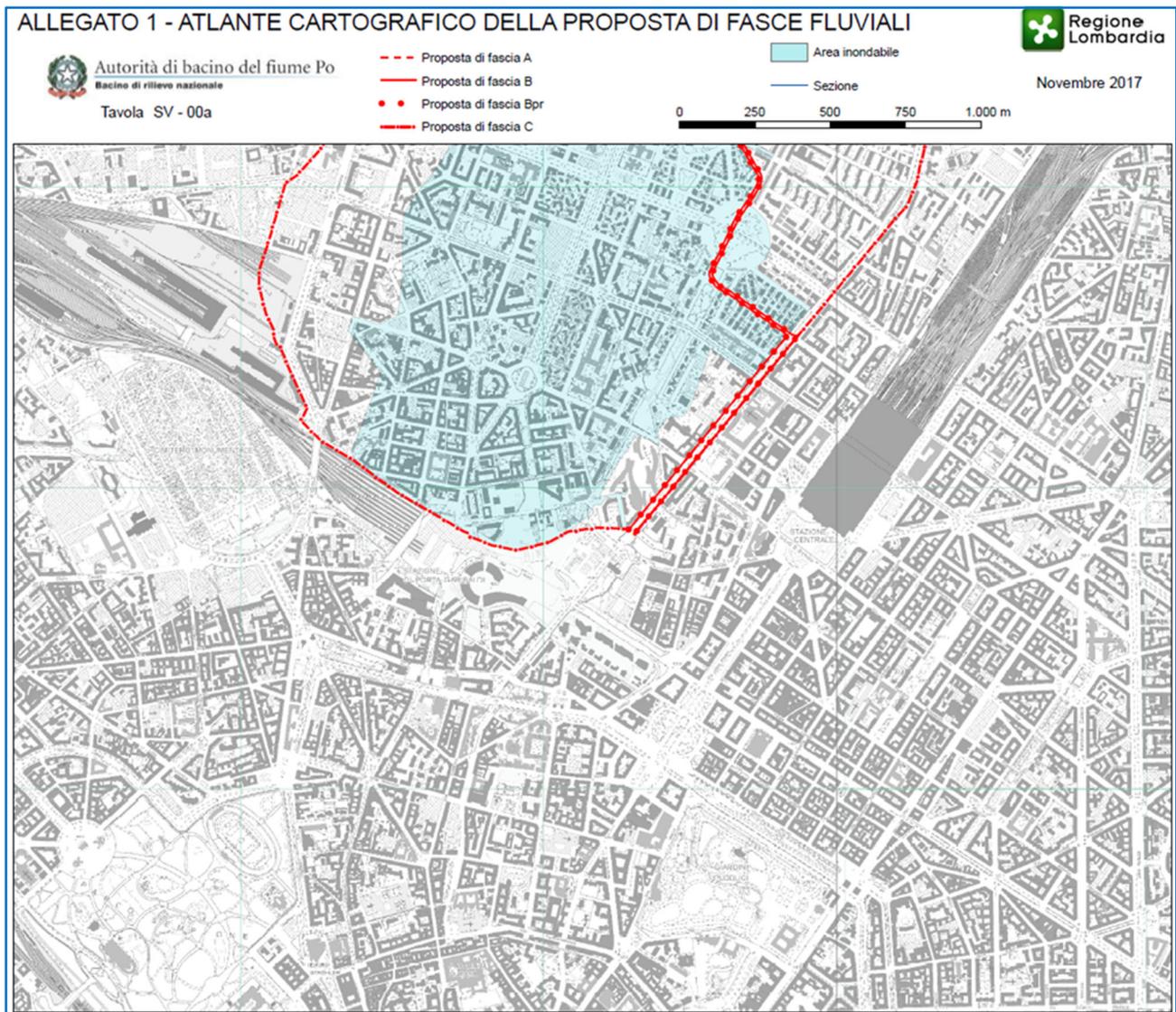


Figura 17 – Delimitazione delle fasce del PAI per il tratto di Seveso nell’area urbana di Milano.

2.3 Fiume Olona e torrenti Guisa e Pudiga

2.3.1 Geometria del fiume Olona

La sezione idraulica del fiume Olona ha una larghezza pari a 7,2 m e un’altezza massima pari a 3,3 m per tutta la tratta dall’ingresso nella tombinatura fino all’attraversamento del Naviglio Grande, a valle del quale la sezione si allarga a 10,0 m con un’altezza di 2,3 m. La pendenza media longitudinale dell’alveo tombinato è dello 0,15%, con la presenza di salti di fondo di altezza variabile compresa tra 0,10 e 0,70 m, che consentono di adattare la pendenza dell’alveo con l’andamento naturale del terreno.

È presente un significativo salto di fondo in corrispondenza dell’attraversamento del Naviglio Grande, nei pressi di Piazzale delle Milizie, che costituisce di fatto una disconnessione idraulica tra il funzionamento della tombinatura a monte e a valle di tale manufatto.

La portata massima compatibile con tale tombinatura è pari a 50-55 m³/s.

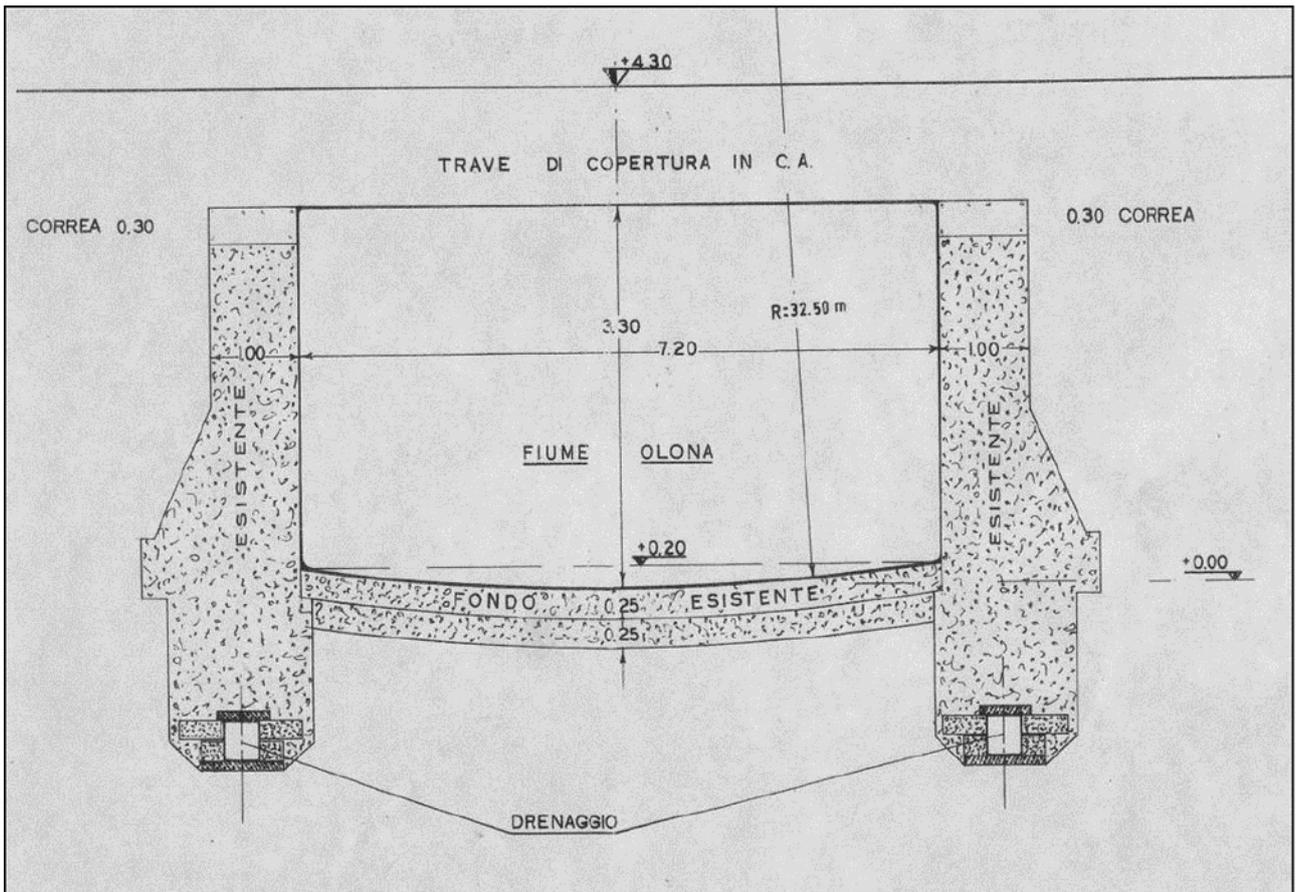


Figura 18 – Geometria del fiume Olona nel tratto tombato.

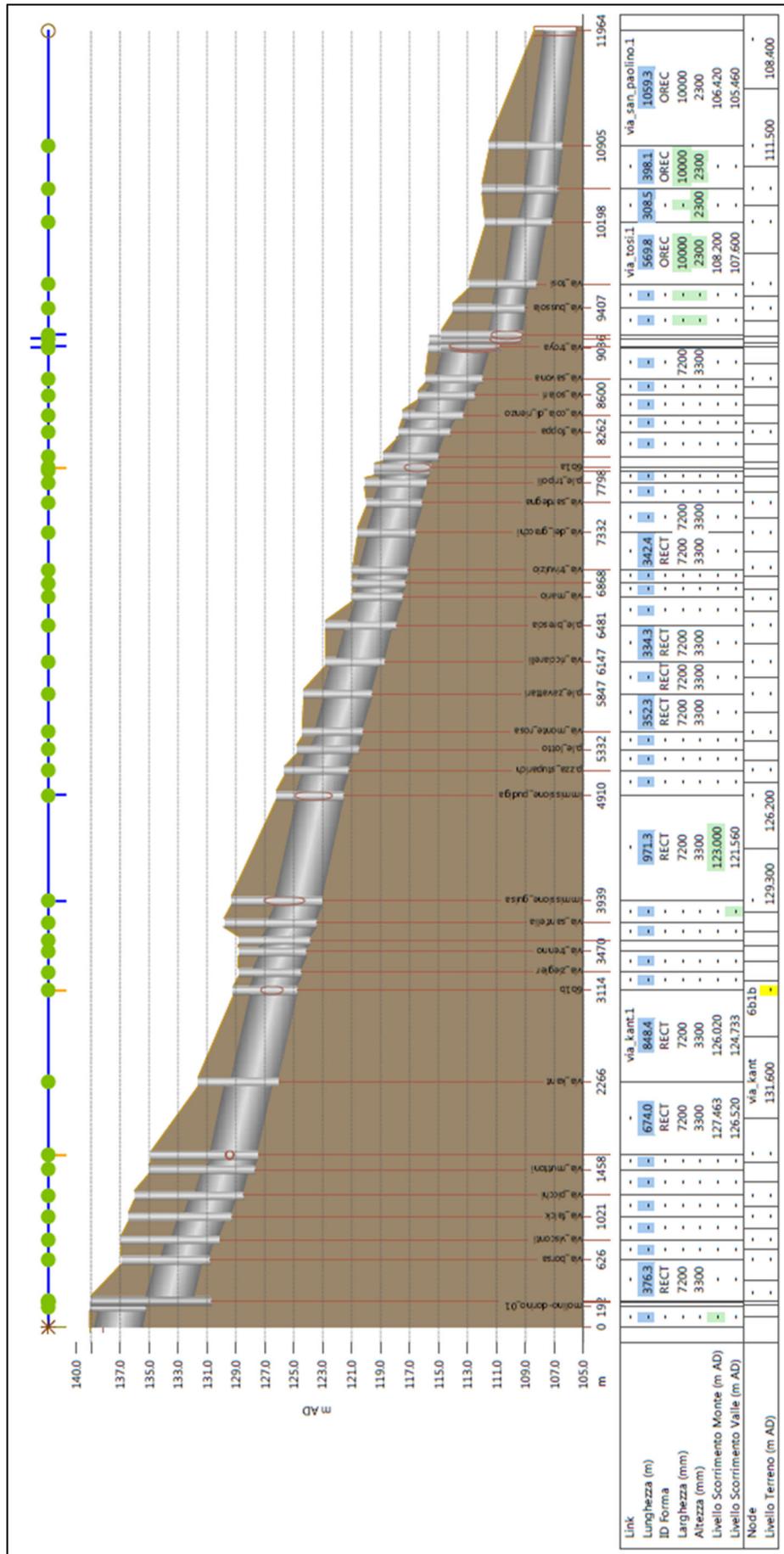


Figura 19 – Profilo longitudinale della tombinatura del fiume Olona.

2.3.2 Portate del fiume Olona

Per il fiume Olona si è fatto riferimento alle portate di piena di assegnato tempo di ritorno definite nell'ambito del Piano di gestione del rischio alluvione (PGRA) dell'Autorità di bacino del fiume Po - Allegato "Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale" (2016), del quale si è riportato un estratto nella Figura 20.

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km ²	Q10 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s	Idrometro Denominazione
		Progr.(km)	Cod.	Denomin.						
Olona 2										
Lambro	Olona	57.637	OL 0.12 bis	Rho - valle presa Olona 2	439	40	50		55	
Lambro	Olona	49.112	OL 0.1	Pero (ingr. Tombinatura)	446	40	50		55	
Lambro	Lambro Merid	3.085	LM 171	Milano (Conca Fallata)	535	100	135		135	

Figura 20 – Estratto dalla tabella 4.7, portate di piena per i corsi d'acqua principali del bacino del Lambro, dell'Allegato al PGRA relativo al fiume Olona.

2.3.3 Geometria del torrente Guisa

La sezione idraulica del torrente Guisa è caratterizzata da un alveo di magra di larghezza pari a 2,8 m ed altezza pari a 0,8 m e dalla soprastante zona di deflusso in condizioni di piena di forma semicircolare (larghezza massima pari a 3,6 m ed altezza pari 2,0 m). L'altezza massima complessiva della sezione idraulica è quindi pari a 2,8 m. L'alveo di magra è rivestito con mattoncini in gres fino ad un'altezza di circa 0,65 m rispetto alla quota di fondo alveo minima. La pendenza media longitudinale dell'alveo tombinato è dello 0,2%, con la presenza di salti di fondo di altezza variabile compresa tra 0,20 e 0,40 m, che consentono di adattare la pendenza dell'alveo con l'andamento naturale del terreno. Il torrente Guisa confluisce nella tombinatura del fiume Olona in via Terzaghi.

La portata massima compatibile con tale tombinatura è pari a 9-11 m³/s.

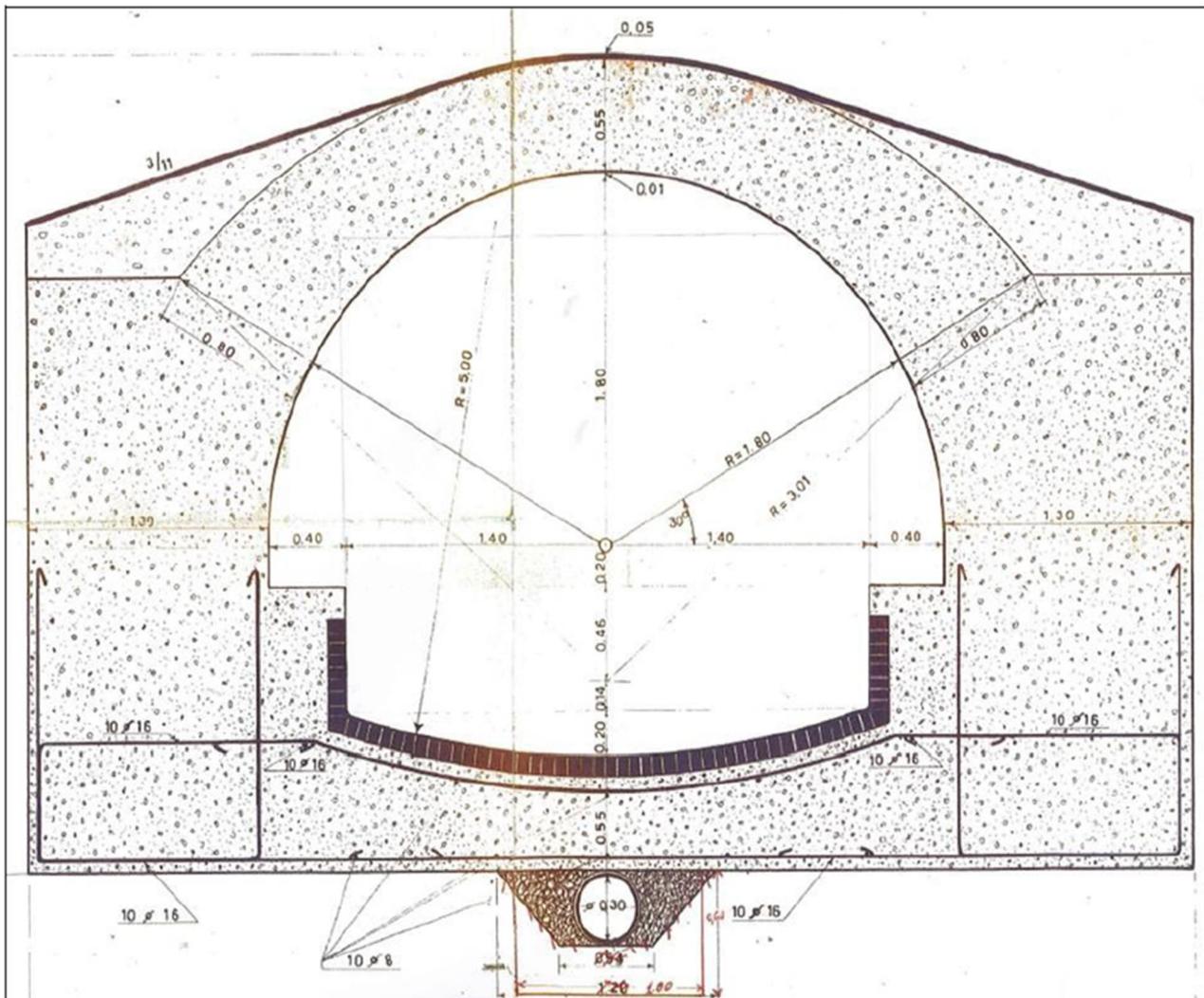


Figura 21 – Sezione della tombinatura del torrente Guisa.

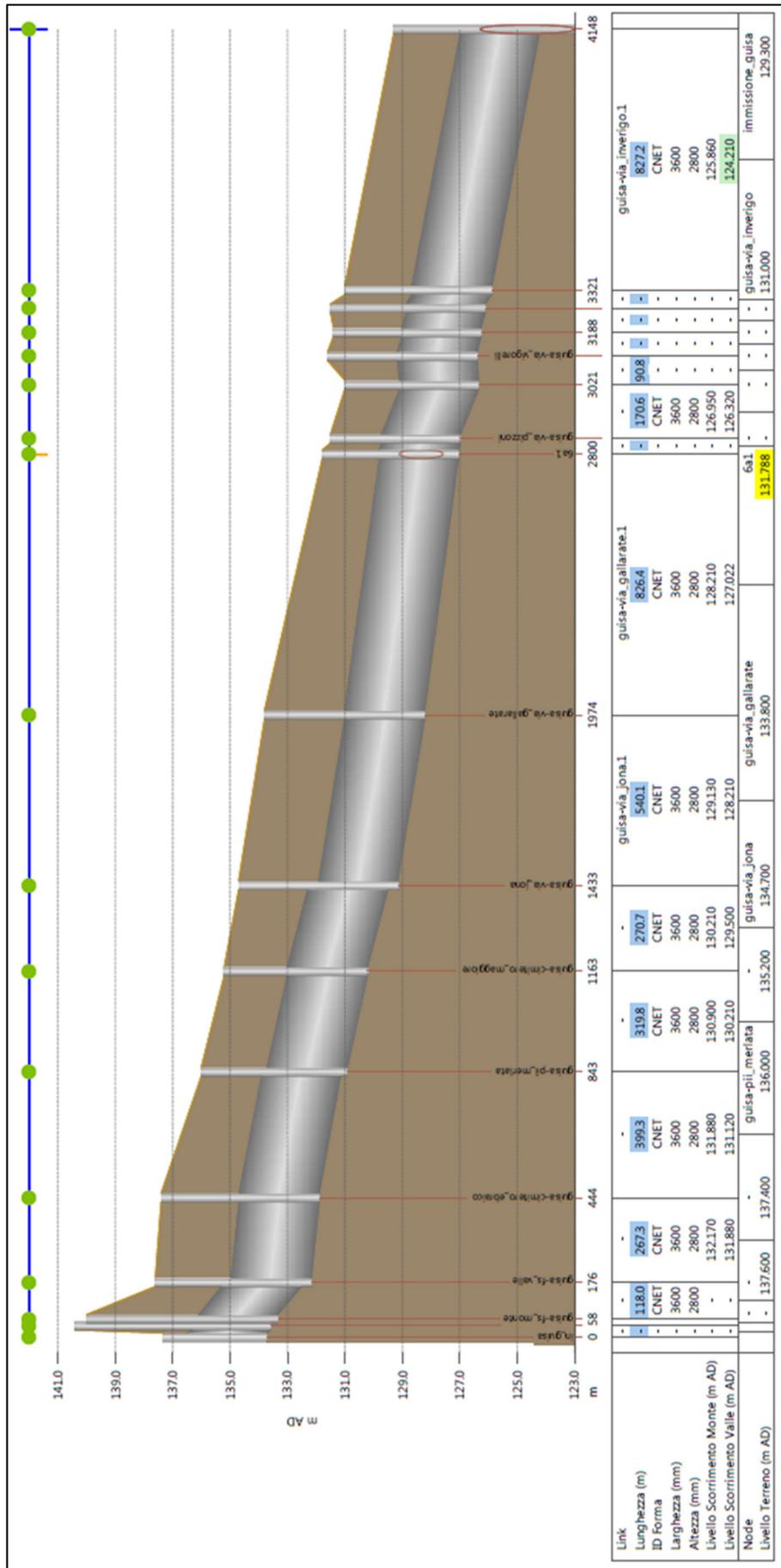


Figura 22 – Profilo longitudinale della tominatura del torrente Guaisa.

2.3.4 Portate del torrente Guisa

Nella

Figura 23 sono indicati i valori delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno definite nell'ambito del Piano di gestione del rischio alluvione (PGRA) dell'Autorità di bacino del fiume Po.

Bacino	Corso d'acqua	Sezione		Superficie km ²	Q10 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s	Idrometro
		Progr. (km)	Cod.						Denomin.
Lambro	Guisa	14.223	GU 22	40	19	25		25	CSNO valle presa CSNO
Lambro	Guisa	18.346	GU 1	44	15	24		27	Milano (ingr. Tombinatura)

Figura 23 – Estratto dalla tabella 4.7, portate di piena per i corsi d'acqua principali del bacino del Lambro, dell'Allegato al PGRA relativo al torrente Guisa.

Nel 2017 è stato fatto un aggiornamento delle analisi idrologiche ("Servizio di aggiornamento analisi idrologico-idrauliche del T. Guisa" - Etatec – AREXPO) finalizzato a definire le attuali condizioni idrauliche del torrente Guisa, con particolare riferimento all'area del Sito di Expo Milano 2015.

In corrispondenza dell'area citata la mappa di pericolosità del Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) è stata modificata con decreto n. 261 del 26 settembre 2019 del Segretario generale dell'Autorità di bacino distrettuale del Fiume Po (Figura 24).

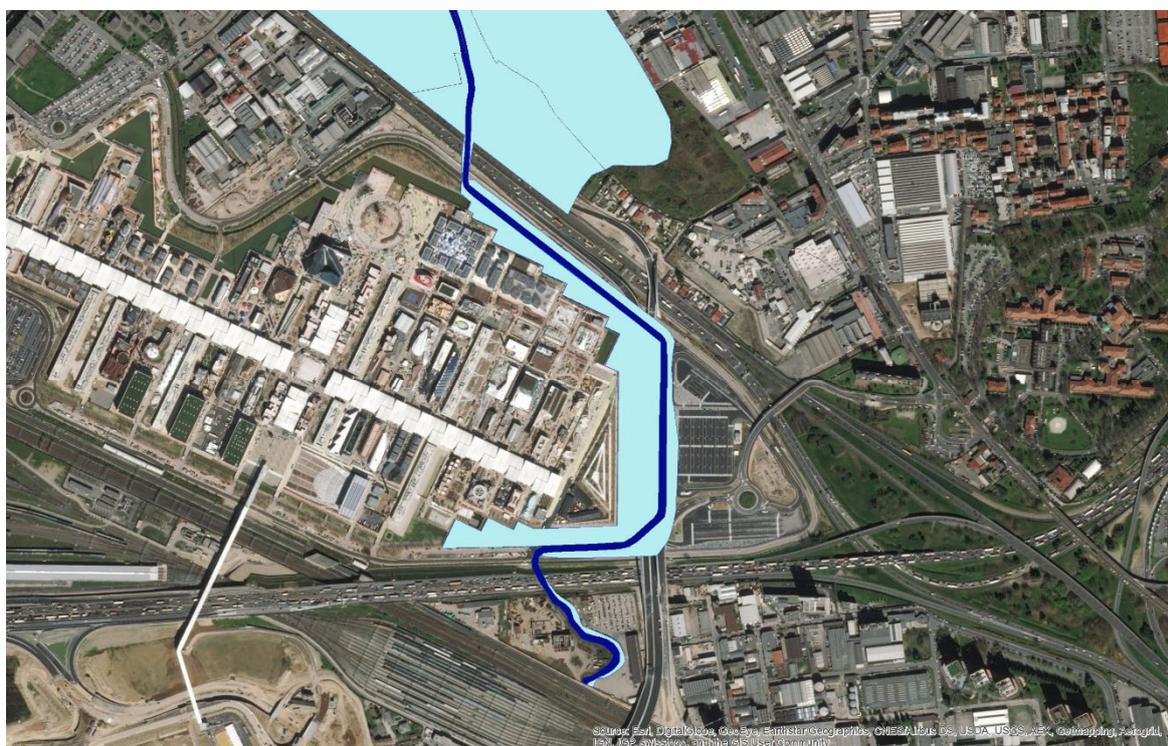


Figura 24 – Aree di pericolosità del PGRA nella zona del sito EXPO a seguito modifica di cui al decreto n. 261 del 26 settembre 2019 del Segretario generale dell'Autorità di bacino distrettuale del Fiume Po. Le aree azzurre sono interessate da esondazioni rare (TR=500 anni).

La modifica è conseguente all'aggiornamento delle modellazioni idrauliche svolte all'esito del completamento di 4 delle 5 aree di laminazione previste per il contenimento dei fenomeni alluvionali e alla verifica della loro efficacia.

Le aree di laminazione realizzate sono le seguenti: Ceriano Laghetto, Cesate, Garbagnate, EXPO.

I risultati dell'applicazione di un modello idrologico e idraulico lungo l'asta hanno portato alla revisione delle portate di riferimento rispetto al PGRA che sono indicate nel prospetto seguente.

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km ²	Q10 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q500 m ³ /s
		Progr.(km)	Cod.	Denomin.				
Lambro	Guisa	2.88	GU 73	Cogliate	15	8	10	14
Lambro	Guisa	5.042	GU 65	Solaro	21	8	10	13
Lambro	Guisa	7.576	GU 55	Cesate	26	9	11	15
Lambro	Guisa	10.784	GU 38	ponte canale Villoresi	35	11	14	16
Lambro	Guisa	13.787	GU 24	monte presa CSNO	40	9	11	14
Lambro	Guisa	14.223	GU 22	valle presa CSNO	40	3	3	3
Lambro	Guisa	18.346	GU 1	Milano (ingr. Tombinatura)	44	8	9	11

Geometria del torrente Pudiga

Il corso d'acqua entra nel territorio comunale di Milano a nord in corrispondenza del confine con Novate Milanese, all'altezza di v. Beltrami, e prosegue per un primo tratto a cielo libero per circa 600 m fino a monte dell'autostrada A4 dove inizia il tratto tombinato. Il tratto a cielo libero è descritto da sezioni topografiche che restituiscono una dimensione media dell'alveo inciso di larghezza in sommità pari a 7,5 m e altezza di sponda di 2,50 m.

La sezione trasversale nel tratto tombinato è caratterizzata da un'altezza massima complessiva pari a 2,6 m ed una larghezza pari a 3,1 m. La pendenza media longitudinale dell'alveo tombinato è dello 0,25%, con la presenza di un unico salto di fondo di altezza pari a 1,00 m. Il torrente Pudiga confluisce nella tombinatura del fiume Olona in viale Serra, nei pressi di piazza Stuparich.

La portata massima compatibile con tale tombinatura è pari a 11-13 m³/s.

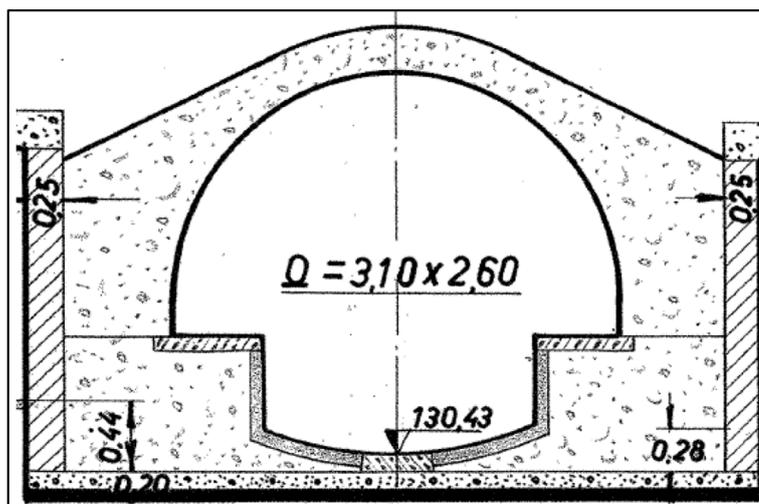


Figura 25 – Sezione della tombinatura del torrente Pudiga.

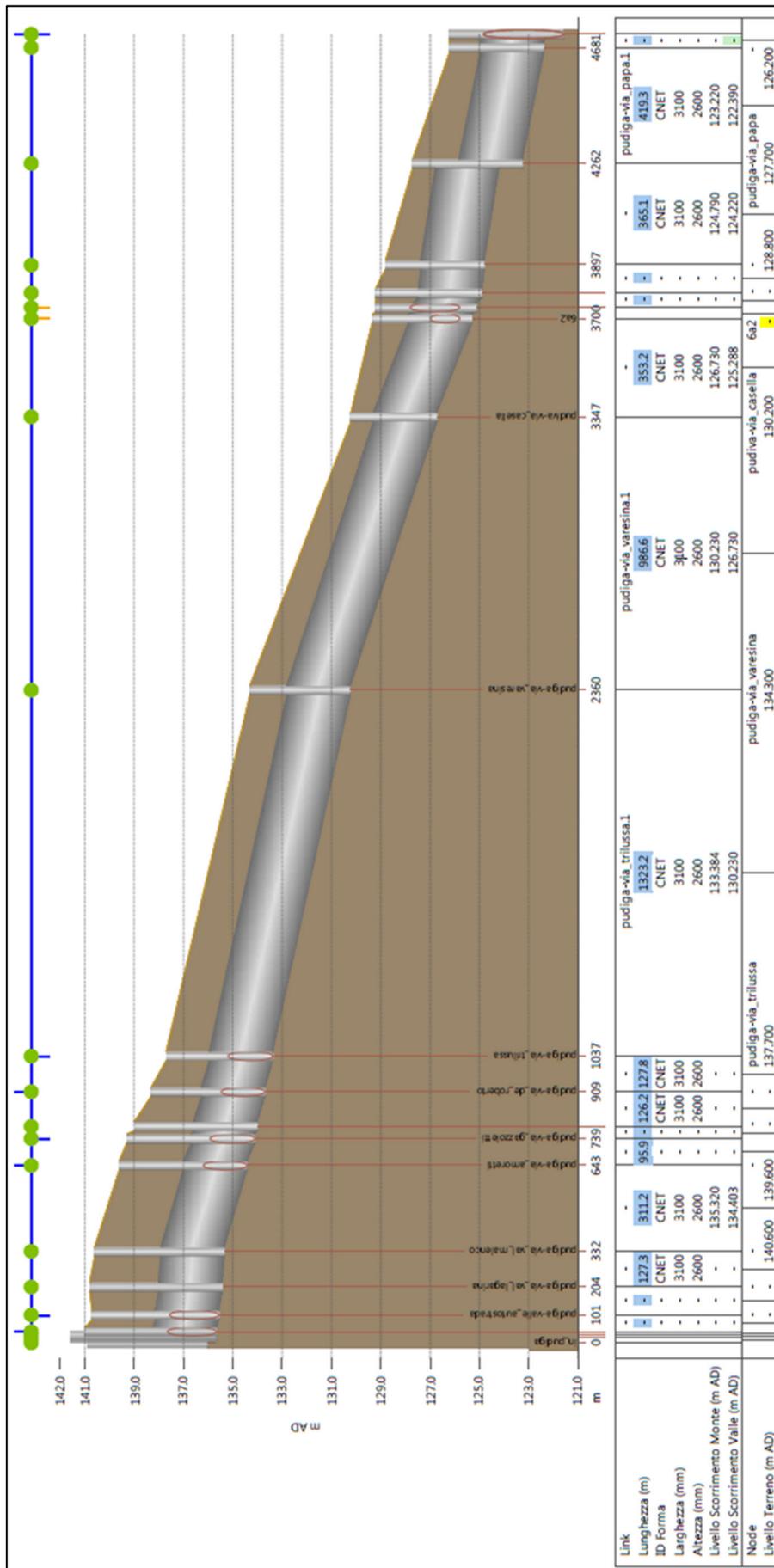


Figura 26 – Profilo longitudinale della tombinatura del torrente Pudiga.

2.3.5 Portate del torrente Pudiga

Nella Figura 27 sono indicati i valori delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno definite nell'ambito del Piano di gestione del rischio alluvione (PGRA) dell'Autorità di bacino del fiume Po.

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km ²	Q10 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s	Idrometro Denominazione
		Progr. (km)	Cod.	Denomin.						
Lambro	Pudiga	12.350	PU 25	monte presa CSNO	19	31	40		46	
Lambro	Pudiga	12.941	PU 23.1	valle presa CSNO	19	18	25		29	
Lambro	Pudiga	12.941	PU 14	Bollate	19	18	25		29	
Lambro	Pudiga	18.441	PU 1	Milano (ingr. Tombinatura)	27	34	43		50	

Figura 27 – Portate di riferimento per il torrente Pudiga definite nel PGRA 2015 in corrispondenza del CSNO e dell'ingresso nel tratto tombinato.

Le valutazioni contenute nel progetto AIPO della vasca di laminazione di Senago riportano la seguente situazione.

Il torrente Pudiga nasce a ovest di Barlassina, con il nome di Lombra, e successivamente, alla confluenza con il suo affluente di destra Cislara, prende il nome di Pudiga. Attraversa i comuni di Cesate, Garbagnate Milanese, Senago, Bollate e Novate. È anche conosciuto come torrente Fugone, o Mussa. Il bacino idrografico totale ha un'estensione di circa 27 km², di cui 15 km² in territori urbanizzati (55%).

A parte alcune situazioni critiche puntuali, l'alveo risulta sostanzialmente in grado di contenere portate anche con tempo di ritorno elevato nel tratto di monte; significative carenze della capacità di deflusso si rilevano nel tratto tombinato in Milano e, a monte, in quello di attraversamento del comune di Bollate – anch'esso tombinato. Significativa in proposito la piena del novembre 2014 che ha causato estesi allagamenti nel comune di Bollate per le esondazioni del corso d'acqua nel tratto urbano.

Il tratto tombinato del Comune di Bollate risulta fortemente sottodimensionato, infatti il funzionamento idraulico avviene in pressione creando ampi allagamenti al suo imbocco. I manufatti a valle dell'abitato di Bollate, protetti dai sopraddetti allagamenti di monte, risultano avere tutti franco insufficiente ma non creano problemi di allagamenti.

In corrispondenza dell'attraversamento del CSNO e poco più a valle, dell'attraversamento della linea ferroviaria Milano-Saronno, si creano allagamenti sia in sinistra che in destra idrografica. Il tombino risulta funzionare in pressione anche per tempi di ritorno non particolarmente elevati.

Numerosi scaricatori di piena urbani che si immettono nel torrente a valle dello scolmatore nel CSNO (a titolo di esempio si evidenzia come gli scaricatori di piena del comune di Bollate immettano una portata pari rispettivamente a 7,0 e 11,9 m³/s e che il solo scarico di Novate Milanese raggiunga i 20 m³/s). A tale situazione di deve la crescita significativa delle portate di riferimento.

Per tale motivo, lo "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona", dell'Autorità di bacino del fiume Po (2004), per il torrente Pudiga ha determinato che la portata al colmo a monte del CSNO fosse pari a 38,5 m³/s; la parte che viene scolmata nel CSNO è pari a 13,3 m³/s, mentre quella che prosegue verso valle è pari a 25,2 m³/s. Infine, la portata in ingresso al tratto tombinato in Milano è pari a 43 m³/s.

Il medesimo studio AdBPo-2004 ha determinato l'assetto di progetto del Pudiga prevedendo i seguenti interventi:

- vasca di laminazione in sponda sinistra, in Comune di Senago, per un volume di circa 100'000 m³, al fine di contenere il colmo della piena a monte dello scolmatore nel CSNO. Tale opera di laminazione consente di ridurre la portata da 41 m³/s a 23 m³/s;
- vasca di laminazione in sponda destra, in territorio comunale di Bollate, per un volume di 100'000 m³, che consente di ridurre la portata da 23 m³/s a 14 m³/s.

In relazione a quanto sopra, si è ritenuto di utilizzare la **vasca di laminazione prevista per il Seveso anche per laminare le piene del Pudiga**, prevedendo un'opera di sfioro in grado di convogliare nel I settore, per l'evento centennale (caratterizzato da una portata al colmo pari a circa 41 m³/s), una portata pari a 18 m³/s, per un volume pari a circa 100'000 m³ (pari al 12% dell'intero volume d'invaso disponibile nell'area di laminazione di Senago).

Considerando un evento di piena caratterizzato da 10 anni di tempo di ritorno (portata al colmo dell'onda a monte del CSNO pari a circa 30 m³/s), la portata al colmo sfiorata verso l'invaso di Senago si riduce a circa 11 m³/s. Per quanto riguarda, invece, l'evento di piena caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 500 anni, in cui la portata al colmo dell'onda a monte del CSNO è pari a circa 44 m³/s, la portata al colmo sfiorata verso l'invaso di Senago risulta essere pari a circa 20 m³/s.

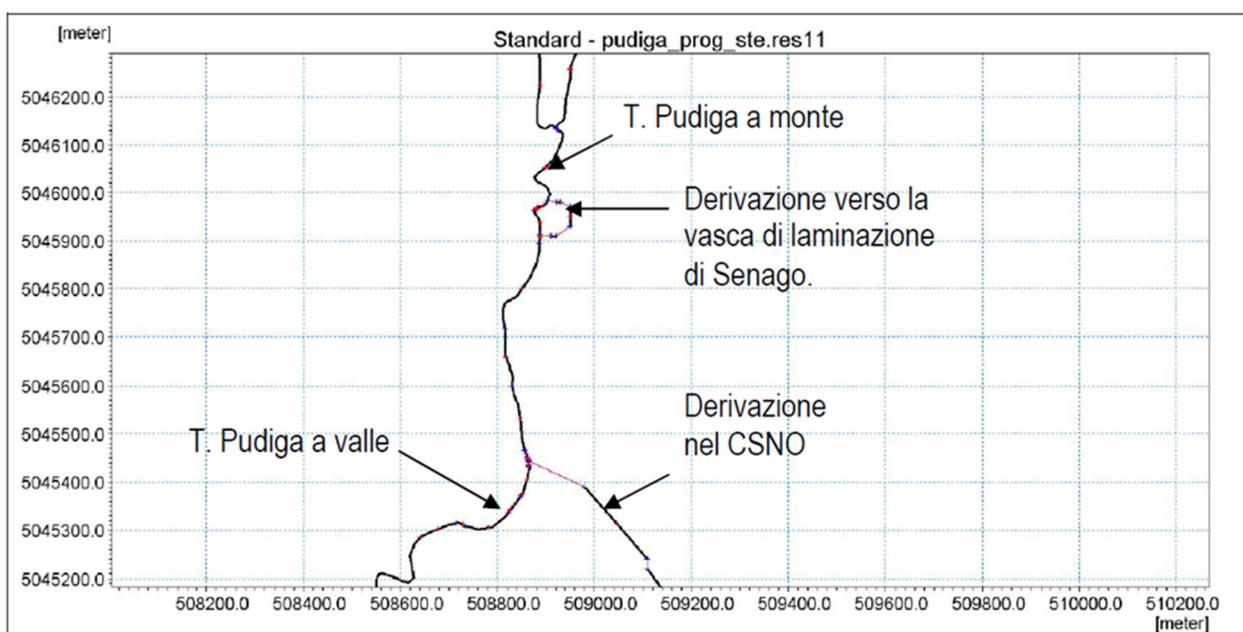


Figura 28 – Schema di funzionamento idraulico del torrente Pudiga.

Nella Tabella 2 sono, in conclusione, riportate le portate di piena di riferimento del torrente Pudiga nell'assetto attuale e in quello di progetto.

Tempo di ritorno	Imbocco tombinatura di MI (stato attuale) (m ³ /s)	Sfioro in vasca di Senago (m ³ /s)	Portata di progetto residua imbocco tombinatura MI (m ³ /s)
10	34	11	23
100	43	18	25
500	50	20	30

Tabella 2 – Portate al colmo di assegnato tempo di ritorno del torrente Pudiga nell'assetto attuale e di progetto.

2.3.6 Portate di piena Olona, Pudiga e Guisa (da Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona)

Il progetto fa riferimento iniziale alle portate definite nello “Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona”, per tempi di ritorno di 10 e 100 anni, nelle sezioni terminali corrispondenti all'ingresso delle rispettive tombinature in Milano.

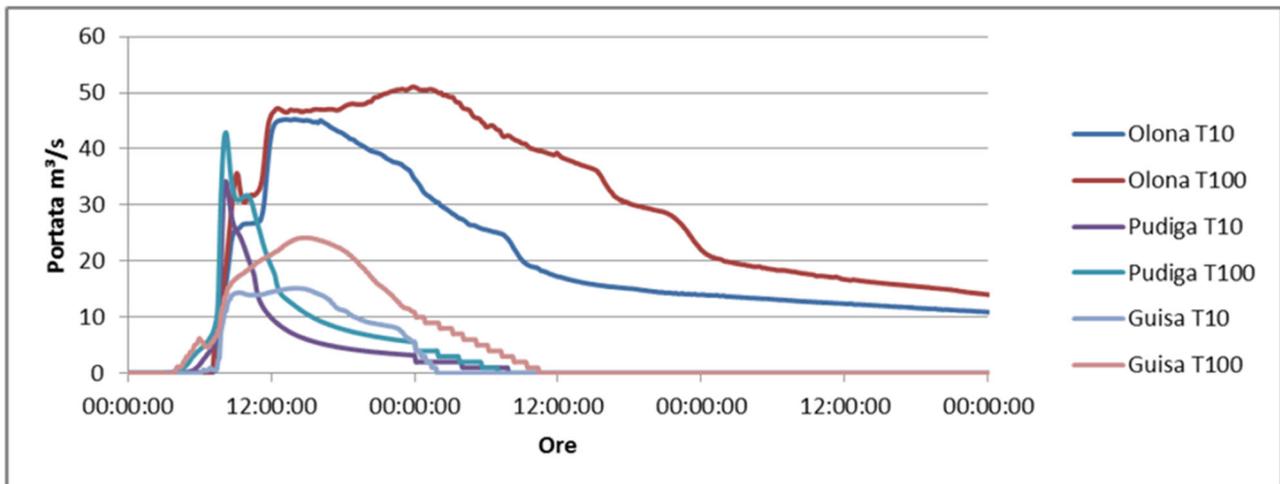


Figura 29 – Idrogrammi di piena definite nelle sezioni di inizio tombinatura dallo studio citato.

Le prime simulazioni condotte hanno mostrato come sia la piena centennale che quella decennale non sono contenute all'interno della tombinatura, provocando esondazioni, come mostrato nei seguenti profili di piena del fiume Olona.

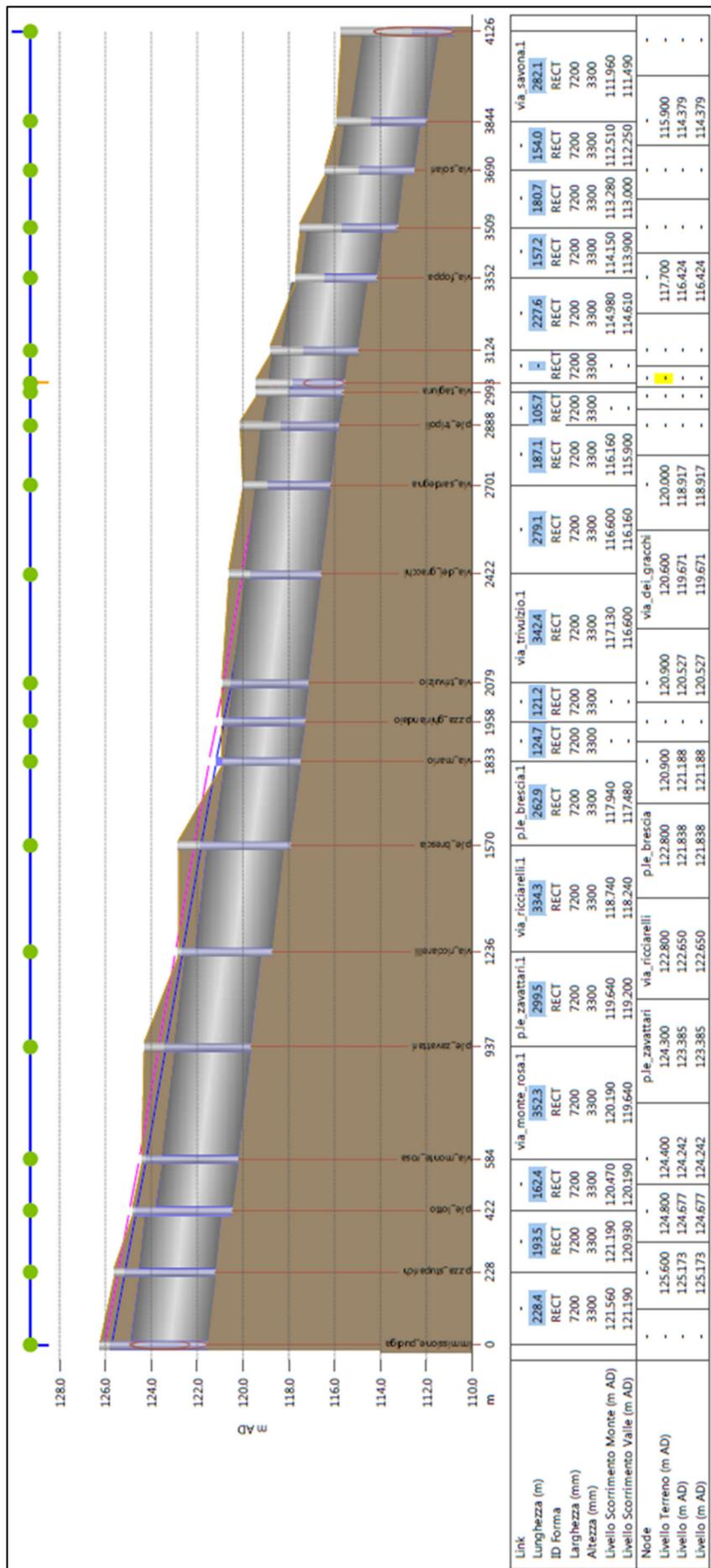


Figura 31 – Profilo di piena dell'Olona da piazza Stuparich a piazza Tripoli.

2.4 Torrente Garbogera

Il torrente Garbogera nasce a Birago nei pressi di via Gerbino, per poi attraversare Barlassina, Cesano Maderno, Limbiate, Senago, Bollate e Novate Milanese. Entrato a Milano percorre tombinato via Bovisasca per poi deviare verso est e seguire i viali della circonvallazione esterna. Sottopassa poi il Naviglio della Martesana nei pressi della confluenza del Seveso. Prosegue piegando verso sud e percorrendo tombinato viale Molise e viale Puglie per poi confluire nel Cavo Redefossi lungo corso Lodi.

Il corso storico continuava da via Bovisasca sottopassando lo Scalo Farini, circonvallando il cimitero monumentale e percorrendo le vie Como, Mercato, Broletto, Cordusio, Torino, Corso di Porta Ticinese, Parco delle Basiliche, per poi confluire nella Vettabbia. In epoca medioevale venne limitato al Pontaccio ed immesso nel Grande Seveso. In seguito, fu deciso di deviarlo verso il Cavo Redefossi all'altezza di via Giuseppe Avezzana.

2.4.1 Portate del torrente Garbogera

Nella Figura 32 sono indicati i valori delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno definite nell'ambito del Piano di gestione del rischio alluvione (PGRA) dell'Autorità di bacino del fiume Po.

Tab. 4.7: portate di piena per i corsi d'acqua principali del bacino del Lambro

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km ²	Q10 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s	Idrometro
		Progr. (km)	Cod.	Denomin.						Denominazione
Lambro	Garbogera	10.141	GA 24	monte presa CSNO	9	8	13		17	
Lambro	Garbogera	10.330	GA 22	valle presa CSNO	9	5	7		8	
Lambro	Garbogera	16.797	GA 1	Milano (ingr. Tombinatura)	18	6	7		8	

Figura 32 – Portate di riferimento del PGRA per il torrente Garbogera.

Le valutazioni fatte nel progetto AIPO relative alla vasca di laminazione di Senago (CSNO) riportano la seguente situazione.

Il torrente Garbogera nasce dalle colature del Comune di Lentate sul Seveso e dopo circa 23 km si immette nel tratto tombato di Milano in corrispondenza della Via Bovisasca. Il bacino idrografico, a forma stretta e allungata, ha un'estensione di circa 18 km², di cui 11 km² in territori urbanizzati (61%).

Il torrente svolge sostanzialmente la funzione di collettore di acque meteoriche urbane, in quanto la maggior parte del territorio attraversato è urbanizzato e provvisto di sistemi di drenaggio: l'alveo è spesso contenuto tra muri arginali e lunghi tratti canalizzati, a volte tombinato, come in Comune di Bollate, dove esiste un lungo tratto in sotterraneo. Un altro tratto consistente tombato è in Comune di Novate. A Senago interseca il CSNO nel quale sfiora una parte della portata di piena.

Per conseguire il richiesto grado di sicurezza delle aree abitate, ed oggi soggette a frequenti allagamenti a causa del torrente Garbogera, è stata individuata la necessità di attuare soluzioni volte a ridurre la portata idrologica entro i valori compatibili con i manufatti e l'edificazione presenti. Nelle condizioni attuali per l'evento di piena di riferimento (TR=100 anni) lo "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona", dell'Autorità di bacino del fiume Po (2004), per il torrente Garbogera ha determinato che la portata al colmo a monte del CSNO è pari a 11,8 m³/s, e la parte che viene scolmata nel CSNO è pari a 5,6 m³/s, mentre quella che prosegue verso valle è pari a 6,2 m³/s. Infine, la portata in ingresso al tratto tombinato in Milano è pari a 6,8 m³/s, a fronte di una capacità massima di 3,3 m³/s (collettore circolare con diametro di 2,0 m).

Il medesimo studio pertanto aveva definito l'assetto di progetto del torrente Garbogera, prevedendo, tra gli altri interventi, la realizzazione di una vasca di laminazione in sponda destra poco a monte dell'ingresso nella tombinatura di Limbiate, di volume pari a 15'000 m³, e una seconda vasca in sponda sinistra poco a valle dell'intersezione con il CSNO, in territorio comunale di Senago, con un volume di 100'000 m³. Quest'ultima vasca è posta praticamente nella stessa zona dove si è deciso di realizzare la vasca del Seveso; pertanto il progetto definitivo della vasca di Senago ha assegnato alla stessa anche la funzione di laminazione del Garbogera.

L'idrogramma di piena di riferimento (TR=100 anni), a monte della vasca di laminazione di Senago e a monte dell'opera di scolmo nel CSNO, ha un colmo pari a circa 11,8 m³/s; la massima portata che può essere scolmata nel CSNO è pari a 5,5 m³/s e quindi, per ottenere a valle una portata al colmo pari a 2,1 m³/s si è derivato verso la vasca di laminazione una portata al colmo pari a 5 m³/s, per un volume complessivo scolmato pari a circa 40'000 m³, pari al 4% dell'intero volume d'invaso disponibile nell'area di laminazione di Senago.

3. DATI TOPOGRAFICI

Al fine di descrivere con precisione la morfologia del terreno e delle zone urbanizzate nelle aree di interesse è stato acquisito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare il *Modello digitale del terreno* (DTM) con risoluzione a terra 1 metro, derivante da scansione LiDAR su piattaforma aerea (emissione 2013 – attività di rilievo conclusa nel 2010) effettuata nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale.

La geometria dell'alveo inciso del Lambro, del Seveso e degli altri torrenti in esame, compresi i manufatti presenti (attraversamenti stradali e ferroviari, traverse e soglie di derivazione, salti di fondo) sono stati tratti dai rilievi topografici dello studio pregresso dell'Autorità di Bacino del Fiume Po: Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua nell'ambito di pianura Lambro-Olona (Settembre 2004). Per i tratti di alveo oggetto di interventi negli anni successivi tale studio, la geometria è stata aggiornata sulla base delle informazioni desunte dai relativi elaborati progettuali.

Ai fini dell'utilizzo congiunto delle due tipologie di rilievi disponibili è stata condotta, con esito positivo, una verifica di congruenza delle quote assolute caratterizzanti tali rilievi.

Per le aree urbanizzate rappresentate dal rilievo LiDAR è stato infine necessario procedere alle seguenti attività:

- controllo accurato della rappresentatività di tipo "idrodinamico" del rilievo e introduzione dei necessari correttivi in modo da rappresentare in maniera efficace tutte le possibili vie di deflusso delle acque di esondazione (attraverso le strade, i sottopassi stradali, ponti e tombini) nonché, viceversa, le eventuali strutture di contenimento non presenti nel rilievo perché automaticamente "ripulite" nella fase di processamento dei dati grezzi del LiDAR (muri, edifici e rilevati con sponde verticali);
- rappresentazione degli edifici mediante elevazione delle quote dei punti ricadenti nei corrispondenti tematismi tratti dalla cartografia tecnica vettoriale del Comune di Milano; completamento dell'operazione anche per gli edifici ed opere di recente realizzazione desunti dall'esame delle foto aeree più recenti disponibili.

Per la caratterizzazione idraulica dei tratti di torrente tombinati, la geometria è stata tratta dagli elaborati disponibili, tra cui:

- per il torrente Seveso, Guisa, Garbogera e Pudiga: Comune di Milano – Settore Servizio Idrico Integrato Servizio Fognatura "Operazione di materiale rilevamento assistenza e prove al fine di conoscere la situazione statica strutturale delle tombinature dei principali corsi d'acqua, dei grandi collettori, dei collettori di interconnessione zonale e dei sottopassi ferroviari di pertinenza del comune di Milano. 2^a campagna di rilevamento (appalto n. 2/2001) –2002-2004;
- per il torrente Seveso: Comune di Milano - MM S.p.A. "PPM_CDM_08 – Interventi di pulizia mirata all'interno delle tombinature dei corsi d'acqua cittadine: tratto Seveso-Martesana – Profilo dei sedimenti misurati (Anno 2002).

4. ALLESTIMENTO DELLA MODELLISTICA IDRAULICA

4.1 Approccio metodologico

Per la descrizione delle dinamiche di deflusso ed esondazione delle piene dei corsi d'acqua in esame, è stato impiegato il codice di calcolo **MIKE Flood** del DHI, che combina dinamicamente l'approccio monodimensionale e quello bidimensionale.

MIKE Flood è uno strumento modellistico integrato che permette di accoppiare in maniera dinamica, attraverso un'interfaccia utente grafica, i codici monodimensionali MIKE 11 e MIKE URBAN e quello bidimensionale MIKE 21 (per una descrizione sintetica dei codici si vedano rispettivamente gli allegati 1, 2 e 3).

MIKE Flood consente di sfruttare al massimo le potenzialità di MIKE 11, MIKE URBAN e di MIKE 21, facendo intervenire nell'ambito di uno stesso modello l'uno o l'altro codice in funzione delle specifiche esigenze di rappresentazione geometrica e di simulazione necessarie: MIKE 11 per la simulazione monodimensionale di tratti di alveo incisi e per il deflusso idrodinamico attraverso ponti, tombini, salti di fondo, ecc.; MIKE URBAN per la simulazione monodimensionale di collettori chiusi con funzionamento a pelo libero o in pressione tenendo conto della presenza di strutture (salti di fondo, sfioratori, vasche ecc.) e dei pozzetti di ispezione; MIKE 21 per il deflusso nelle aree golenali o di esondazione e di invaso coperte da un DTM (modello digitale del terreno).

MIKE Flood è caratterizzato dal fatto che MIKE 11, MIKE URBAN e MIKE 21 rimangono singoli codici indipendenti l'un l'altro nella messa a punto e nell'input-output, mentre una specifica interfaccia grafica consente di definire i collegamenti reciproci e biunivoci per gli interscambi di portata e di quantità di moto e per la congruenza dei livelli idrici di calcolo.

I modelli MIKE Flood dei vari corsi d'acqua in esame sono stati messi a punto nel modo seguente:

- modello MIKE 21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree allagabili esterne al corso d'acqua (aree naturali o aree urbanizzate);
- modello MIKE 11 monodimensionale per la rappresentazione dei tratti di alveo naturale inciso, caratterizzato da sezioni trasversali d'alveo di rilievo;
- modello MIKE URBAN monodimensionale per la rappresentazione dei tratti tombinati;
- connessione dinamica dei modelli MIKE 11, MIKE URBAN e MIKE 21.

Le restituzioni dei risultati ottenuti con i modelli in tal modo allestiti, presentate nei capitoli che seguono, sono esposte:

- per le parti di modello monodimensionale sotto forma di profili longitudinali di livello e tabelle contenenti i principali parametri idraulici sezione per sezione, riferiti al valore massimo registrato nel corso dell'evento simulato;
- per le parti di modello bidimensionale (aree allagate), sotto forma di mappe dei tiranti idrici massimi rilevati in ciascuna cella nel corso dell'evento.

4.2 Messa a punto dei modelli del fiume Lambro

Nel caso del fiume Lambro sono stati messi a punto due modelli distinti, separati tra loro dall'attraversamento ferroviario in corrispondenza di Viale Lazio, sfruttando il passaggio obbligato dei deflussi attraverso il ponticello ferroviario, che determina una sorta di sconnessione idraulica tra il tratto fluviale di monte e quello di valle. Di conseguenza i deflussi nel Lambro in uscita dal modello di monte costituiscono l'input di portata in ingresso al modello di valle, come meglio illustrato nei capitoli seguenti.

4.2.1 Messa a punto dei modelli monodimensionali

Il tratto fluviale complessivo in esame del Lambro è stato schematizzato nel codice di calcolo MIKE 11 HD (modulo idrodinamico) con 166 sezioni trasversali d'alveo, in parte desunte dal rilievo topografico pregresso dell'AdBPo, alcune estratte dal rilievo LIDAR e ricostruite nella zona di fondo alveo e le restanti desunte dai recenti progetti di sistemazione¹ già realizzati.

In corrispondenza dei ponticelli e dei tombini sono state inserite specifiche strutture tipo "culvert" che riproducono le reali condizioni di deflusso di tali manufatti mentre in corrispondenza dei salti di fondo è stato necessario introdurre strutture tipo "weir".

Nella Tabella 3 è riportato l'elenco delle sezioni trasversali d'alveo inserite nel modello, i cui nomi e progressive sono state mantenute uguali o congruenti a quelle dello studio AdBPo; nella tabella è indicata anche la provenienza delle sezioni (studio AdBPo, rilievo lidar, progetti). Nella Figura 33 è riportato lo schema planimetrico del modello 1D con evidenziate le aree coperte dal modello 2D di monte mentre nella Figura 34 è rappresentato il modello 1D e il contorno del modello 2D di valle.

Come condizione al contorno, nella sezione di monte del primo modello è stato inserito l'idrogramma di portata di assegnato tempo di ritorno relativo allo scenario considerato (vedi Figura 2). Nella sezione più a valle, per entrambi i modelli, è stata inserita una scala di deflusso in moto uniforme, non influente sui risultati ottenuti all'interno del territorio comunale di Milano. Come condizione al contorno di monte del secondo modello sono state invece adottati gli idrogrammi di piena uscenti dal modello di monte.

La scabrezza rappresenta il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito sul fondo di scorrimento, ed è abitualmente utilizzato per tarare il modello. Nel caso in esame, per l'alveo inciso rappresentato con il modello MIKE 11, sono stati confermati i coefficienti medi di Strickler già adottati nello studio pregresso dell'AdBPo, pari a 30-35 m^{1/3}/s.

¹ SEA Prime S.p.A. – Interventi di sistemazione fiume Lambro – Progetto definitivo – giugno 2015.
SEA Prime S.p.A. – Interventi di sistemazione fiume Lambro – Progetto esecutivo II Fase – maggio 2017.

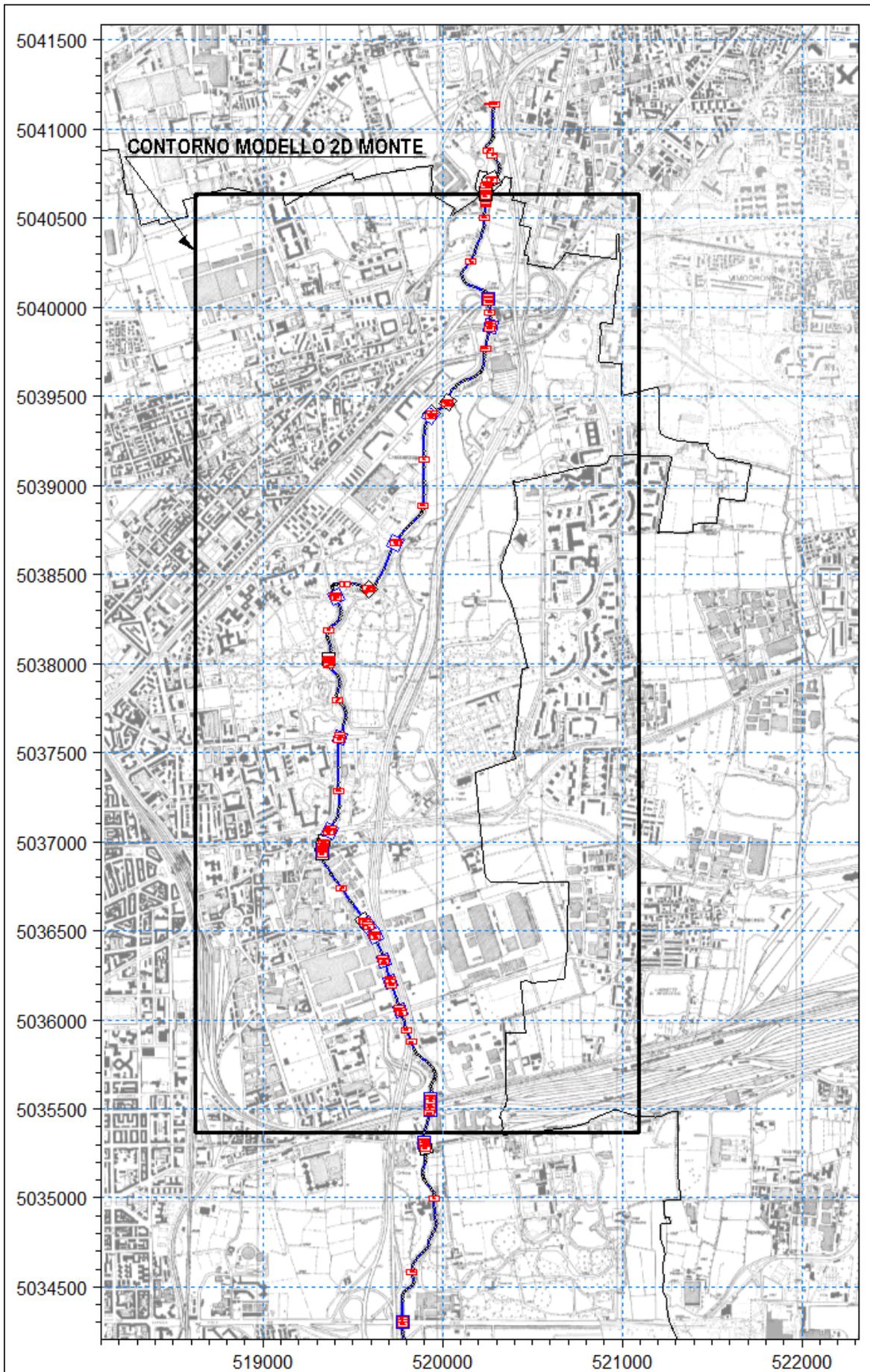


Figura 33 - Rappresentazione planimetrica del modello MIKE 11 del fiume Lambro con indicazione dell'area coperta dal modello MIKE 21 di monte.

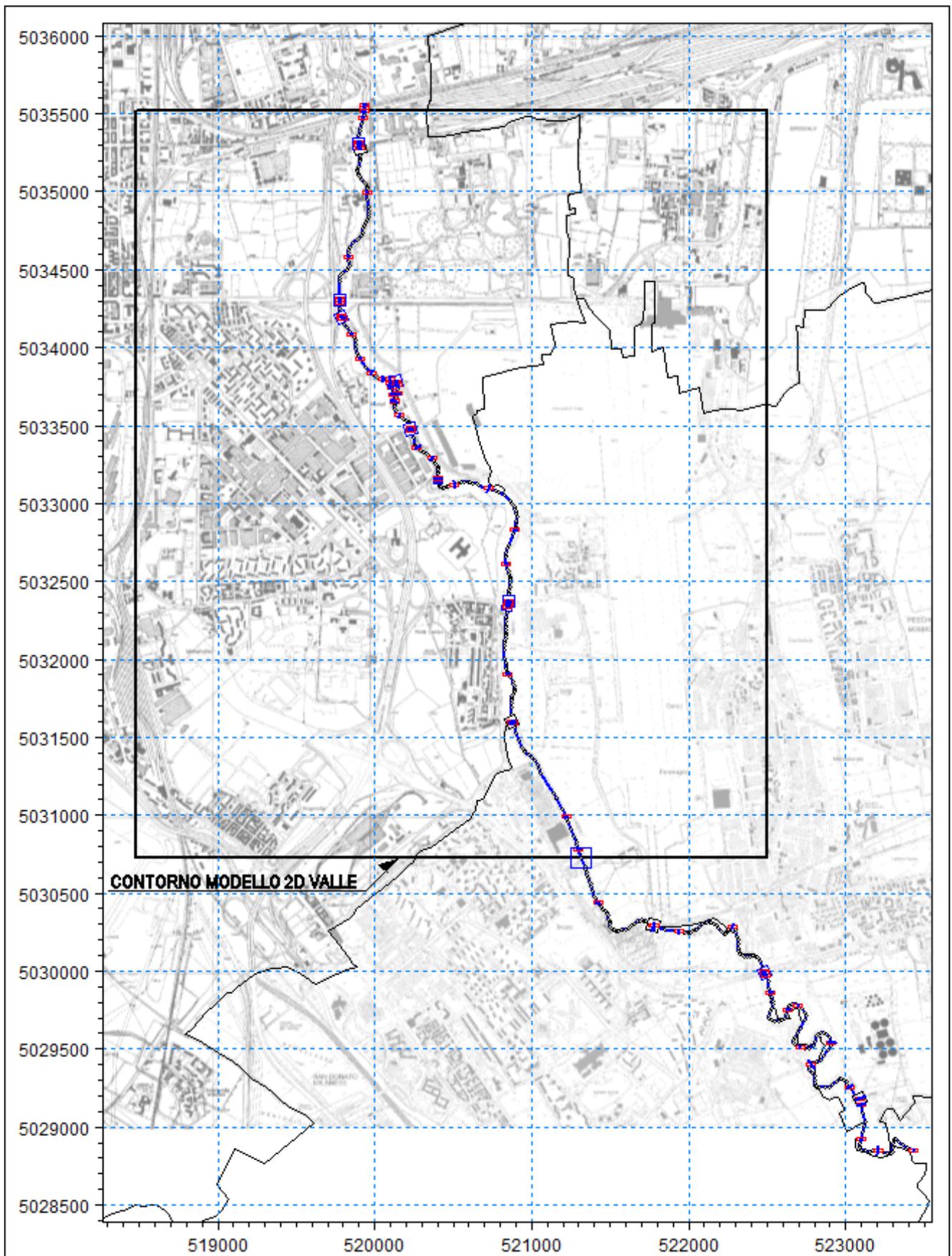


Figura 34 - Rappresentazione planimetrica del modello MIKE 11 del fiume Lambro con indicazione dell'area coperta dal modello MIKE 21 di valle.

ID sez.	Progr. (m)	Fonte	ID sez.	Progr. (m)	Fonte	ID sez.	Progr. (m)	Fonte	ID sez.	Progr. (m)	Fonte
83.2	66980.00	1	79	70406.00	1	P75	72940.00	1	S40bis	76306.00	3
83.1.1	67249.00	1	78.2	70618.00	1	P75v	72955.00	1	S40v	76336.00	3
83.1	67285.00	1	T78.1m	70787.00	1	P74.3m	73052.00	1	70.53	76474.00	3
T83m	67448.00	1	T78.1	70788.00	1	P74.2v	73125.00	1	70.3	76727.00	3
T83	67450.00	1	78.1bis	70821.00	1	P74.1m	73496.00	1	70.19	77122.00	3
83bis	67452.00	1		71037.00	2	P74	73499.50	1	70.08	77353.00	3
T82.4m	67491.00	1	P78m	71253.00	1	P74v	73503.00	1	P70.1m	77602.00	1
T82.4	67493.00	1	P78	71266.00	1	P73.4m	73516.00	1	P70.1	77604.00	1
T82.4v	67495.00	1	P78v	71279.00	1	P73.3m	73540.00	1	P70.1v	77606.00	1
82.3	67539.00	1	77.3	71567.00	1	P73.3	73560.00	1	P70m	77615.00	1
82.1.2	67560.00	1	P77.2m	71786.00	1	P73.3v	73580.00	1	P70	77625.00	1
82.1.1	67605.00	1	P77.2	71798.00	1	P73.2m	73740.00	1	P70v	77635.00	1
82.1	67678.00	1	P77.2v	71810.00	1	P73.2	73749.00	1	69.1	78071.00	1
82	67937.00	1	T77.1m	71873.00	1	P73.2v	73758.00	1	T69m	78392.00	1
P81.5m	68234.00	1	T77.1	71874.00	1	T73.1m	73774.00	1	T69	78393.00	1
P81.5	68249.00	1	77.1bis	71882.00	1	T73.1	73775.00	1	69bis	78403.00	1
81.4.1	68264.00	1	T76.4m	71892.00	1	73.1bis	73780.00	1	68.1	79102.00	1
	68321.00	2	T76.4	71893.00	1	73	74080.00	1	68	79323.00	1
P81.4m	68378.00	1	76.4bis	71896.00	1	72.5	74524.00	1	67.1	79690.00	1
P81.4	68392.00	1	P77m	71918.00	1	P72.4m	74820.00	1	T67m	80176.00	1
P81.4v	68406.00	1	P77	71922.00	1	P72.4	74835.00	1	T67	80177.00	1
P81.3	68522.00	1	P77v	71926.00	1	P72.4v	74850.00	1	67bis	80183.00	1
T81.2m	68918.00	1	T76.3m	71934.00	1	P72.3m	74938.00	1	66.1	80345.00	1
T81.2	68919.00	1	T76.3	71935.00	1	P72.3	74945.00	1	66	80758.00	1
81.2bis	68929.00	1	76.3bis	71942.00	1	P72.3v	74952.00	1	P65.2m	81162.00	1
T81.1m	69028.00	1		72165.00	2	S76	75066.00	3	P65.2	81175.00	1
T81.1	69029.00	1	T76.2m	72388.00	1	S71	75237.00	3	P65.2v	81188.00	1
81.1bis	69031.00	1	T76.2	72389.00	1	S68	75355.00	3	65.1	81304.00	1
P81.0.1m	69043.00	1	76.2bis	72391.00	1	S65	75443.00	3	65	81646.00	1
P81.0.1	69045.00	1	P76.1.1m	72398.00	1	72.1	75492.00	3	64.3	81732.00	1
P81.0.1v	69047.00	1	P76.1.1	72417.00	1	P72.05	75532.00	3	64.2	82058.00	1
81	69294.00	1	P76.1.1v	72436.00	1	P72p	75535.00	3	64.1	82355.00	1
80.2	69555.00	1	P76.1m	72485.00	1	P72	75538.00	3	64	82547.00	1
P80.1m	69820.00	1	P76.1	72495.00	1	71.99	75555.00	3	63.2	82971.00	1
P80.1	69823.00	1	P76.1v	72505.00	1	71.5	75607.00	3	T63.1m	83068.00	1
P80.1v	69826.00	1	P76m	72631.00	1	S56	75662.00	3	T63.1	83069.00	1
T79.2m	70129.00	1	P76	72642.00	1	S53	75761.00	3	63.1bis	83104.00	1
T79.2	70130.00	1	P76v	72653.00	1	S50m	75874.00	3	63	83335.00	1
79.2bis	70140.00	1	P75.1m	72751.00	1	P71.1	75880.00	3	62.1	83513.00	1
	70266.00	2	P75.1	72769.00	1	S50	75886.00	3	62	83844.00	1
P79.1m	70393.00	1	P75.1v	72787.00	1	S47	76016.00	3			
P79.1	70399.00	1	P75m	72925.00	1	S44	76148.00	3			

Tabella 3 - Sezioni trasversali d'alveo del Lambro, con indicazione della progressiva longitudinale e della fonte (1 = AdBPo, 2 = Lidar, 3 = Progetti).

4.2.2 Messa a punto del modello bidimensionale delle aree esterne all'alveo

Come già descritto, per l'analisi dell'idrodinamica di piena del Lambro è stato allestito un modello MIKE Flood con il seguente schema:

- modello MIKE 21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree allagabili esterne al Lambro;
- modello MIKE 11 monodimensionale dell'intero tratto di Lambro caratterizzato dalle sezioni trasversali dell'alveo inciso di rilievo disponibili;
- connessione dinamica dei modelli MIKE 21 e MIKE 11.

Il modello monodimensionale dell'alveo inciso è stato collegato dinamicamente alle adiacenti aree esterne su entrambe le sponde, modellate mediante il codice di calcolo MIKE 21 con approccio bidimensionale su griglia di calcolo a celle quadrate di lato **5,0x5,0** m, mediante le speciali funzioni di MIKE Flood e nel rispetto delle reali quote spondali, come meglio descritto in seguito.

4.2.2.1 *Costruzione della griglia di calcolo*

In un modello bidimensionale alle differenze finite, come MIKE 21, la descrizione geometrica del terreno è eseguita definendo la quota media del terreno in ogni cella di calcolo. Tale valore è usualmente calcolato, a partire dai rilievi topografici, mediante tecniche di interpolazione.

Fondamentale è stata la definizione della dimensione del passo della griglia rettangolare da utilizzare per la messa a punto del modello, che influenza direttamente i tempi di calcolo e l'accuratezza spaziale della soluzione. All'aumentare del passo della griglia diminuiscono i tempi di calcolo, ma diminuisce l'accuratezza spaziale. La scelta deve quindi essere un compromesso tra le due esigenze.

Nel caso in esame la scelta è stata dettata prevalentemente dall'esigenza di rappresentare sufficientemente bene la geometria delle aree allagabili, delle strade e delle possibili vie di deflusso delle portate di esondazione. Si è deciso pertanto di adottare una griglia di calcolo sufficientemente fitta, a maglia 5,0 x 5,0 m, costituita complessivamente da 1053 righe x 494 colonne (520.182 punti di calcolo) per il modello di monte e da 958 righe x 804 colonne (770.232 punti di calcolo) per quello di valle.

Nella Figura 35 è riportata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello di monte mentre nella Figura 36 è riportata quella complessiva del modello di valle. In grigio sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili (aree con quota maggiore di 135 m s.m. per il modello di monte e di 115 m s.m. per quello di valle). In verde scuro sono evidenziate le aree a quote inferiori mentre in giallo e marrone sono distinguibili le aree a quote maggiori. Nelle figure, sovrapposta alla rappresentazione della batimetria, è riportata la base CTR in semitrasparenza.

L'intero alveo inciso del Lambro è stato escluso dalla simulazione con il modello bidimensionale MIKE 21, perché il suo contributo al deflusso delle piene è già simulato con il modello monodimensionale MIKE 11 nell'ambito del codice MIKE Flood.

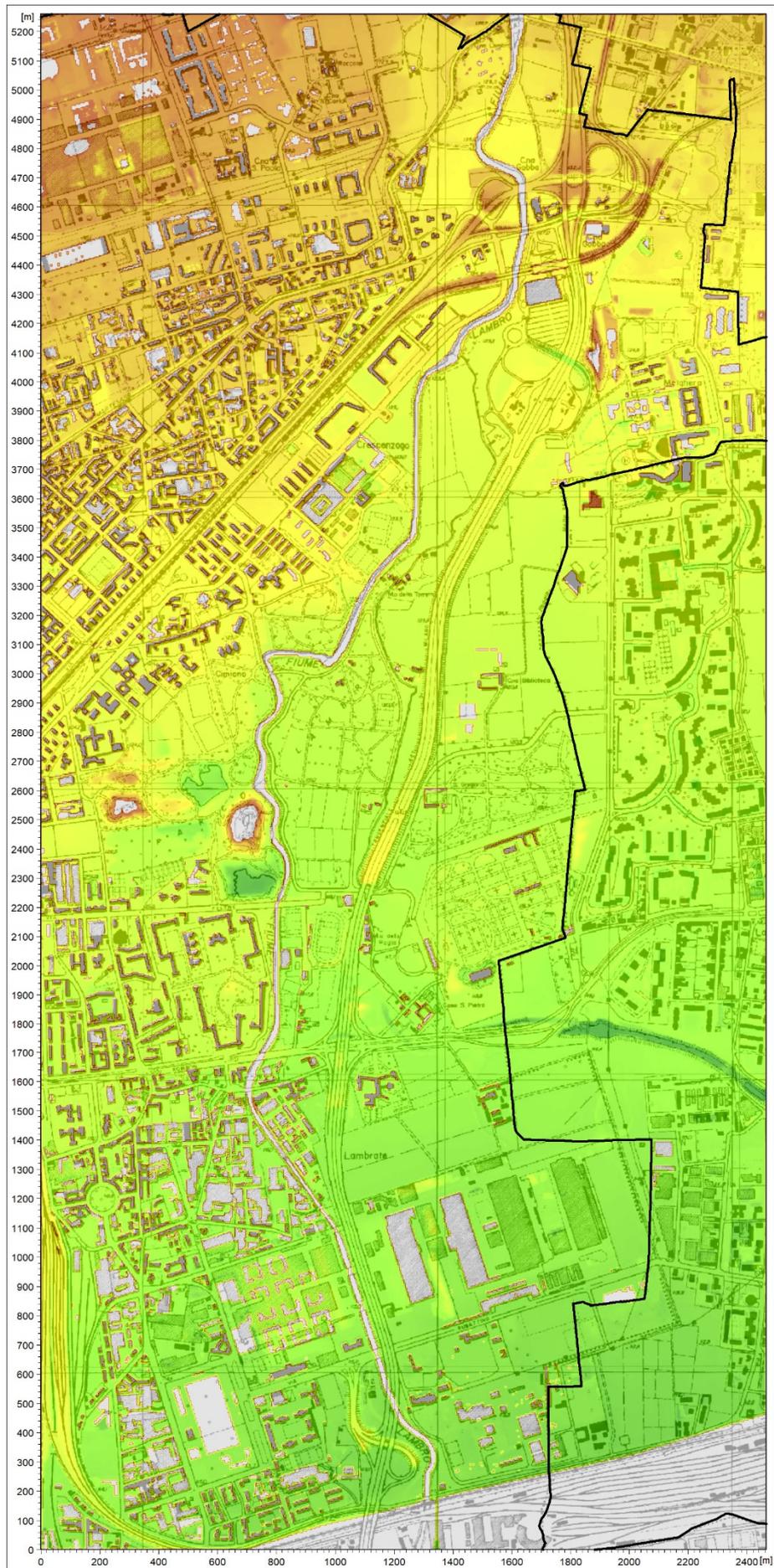


Figura 35 - Batimetria del modello 2D di monte del fiume Lambro a maglia 5,0x5,0 m.

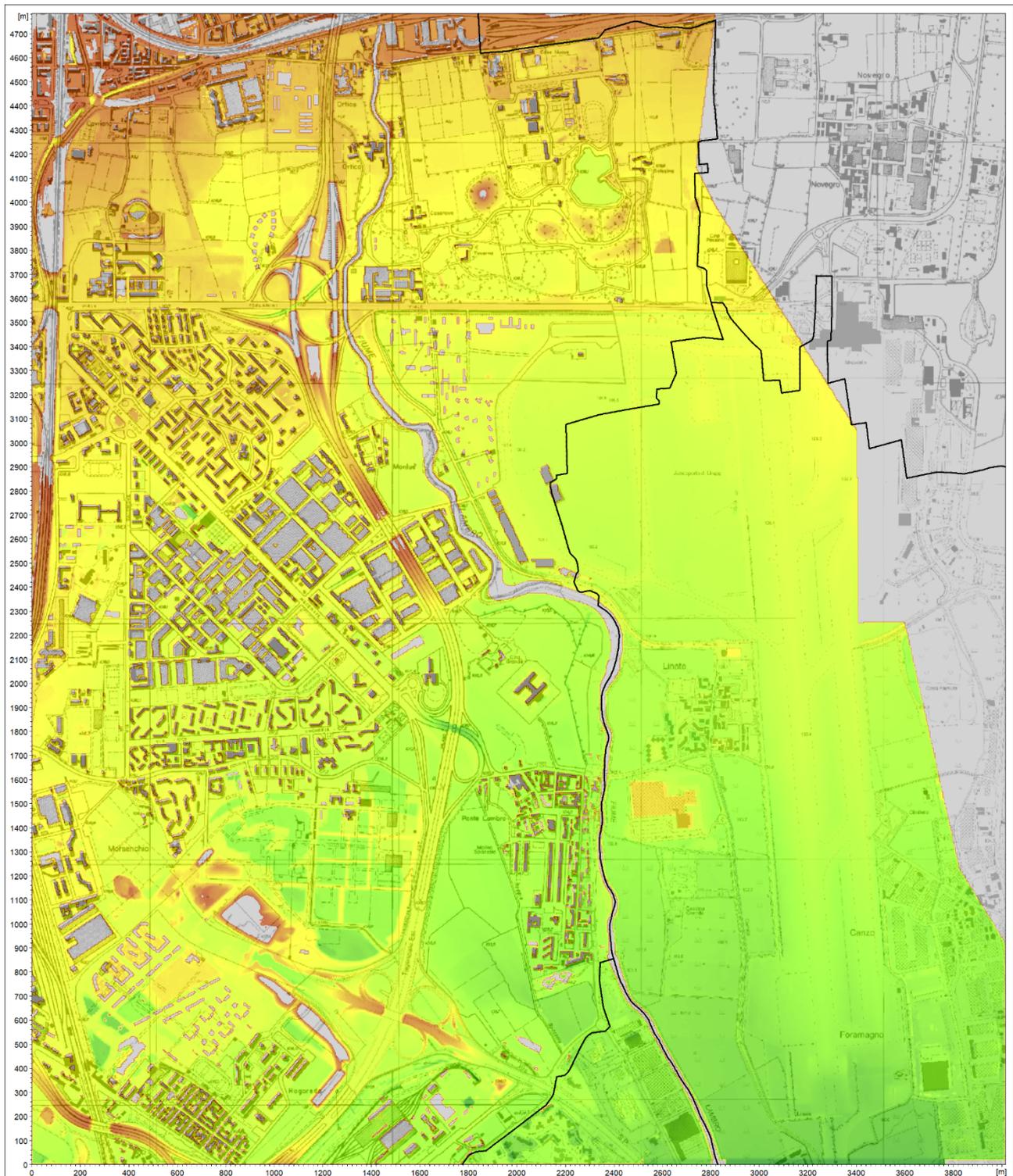


Figura 36 - Batimetria del modello 2D di valle del fiume Lambro a maglia 5,0x5,0 m.

4.2.2.2 Parametri e condizioni al contorno del modello MIKE Flood

Il modello di simulazione, oltre alla descrizione geometrica e alle condizioni al contorno idrodinamiche (portate, livelli), necessita la definizione di un'altra serie di parametri: passo di tempo di integrazione del sistema, coefficienti di scabrezza e coefficiente di viscosità turbolenta ("eddy viscosity").

Come passo di tempo di integrazione, per garantire la stabilità numerica in termini di vincoli sul numero di Courant della corrente, è stato utilizzato un valore pari a 1,0 secondi.

La viscosità turbolenta, legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità, viene generalmente simulata nel modello tramite il coefficiente di “eddy viscosity”. Nel caso in esame al coefficiente di eddy viscosity è stato assegnato un valore costante pari a $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ sull'intera estensione del modello: tale parametro risulta di scarsa rilevanza in quanto simulando deflussi di esondazione con scorrimento superficiale gli aspetti legati alla formazione di vortici sono senza dubbio trascurabili rispetto ai prevalenti termini di resistenza idraulica al moto per attrito sul fondo.

La scabrezza rappresenta, all'interno delle equazioni del moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito sul fondo di scorrimento. Tale parametro è difficilmente valutabile con precisione ed è abitualmente utilizzato per tarare il modello. Nel caso in esame, cautelativamente, si è deciso di adottare un coefficiente medio di scabrezza di Strickler pari a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, uniformemente distribuito su tutta l'area di analisi.

Ai due modelli sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno idrodinamiche:

- condizioni al contorno di monte e di valle sul Lambro assegnate come già descritto (codice MIKE 11);
- condizione al contorno di valle per il calcolo della portata in uscita dal tombino stradale presente in sinistra orografica dell'attraversamento del rilevato ferroviario (codice MIKE 21), imposta sul lato sud della griglia del modello di monte: livello costante pari a $114,00 \text{ m s.m.}$; questa condizione è del tutto ininfluenza sui risultati del modello nella zona di interesse, ma è utile per quantificare la portata transitante attraverso il tombino stradale;
- condizione al contorno di monte corrispondente alla portata in uscita dal tombino stradale dal modello di monte, entrante nel modello di valle, lato nord;
- condizione al contorno di valle per il calcolo delle portate di esondazione in golena uscenti dal lato sud del modello di valle: livello costante pari a $99,00 \text{ m s.m.}$; questa condizione è del tutto ininfluenza sui risultati del modello nella zona di interesse;
- condizioni al contorno “interne” di collegamento tra i due modelli MIKE 11 e MIKE 21: in corrispondenza di tutte le celle lungo le sponde destra e sinistra del Lambro vengono applicate equazioni tipo “stramazzo a larga soglia” con quote di sfioro pari ai valori maggiori tra quelli delle celle del modello 2D e quelli corrispondenti delle quote di sponda delle sezioni d'alveo di MIKE 11, opportunamente interpolate.

4.3 Messa a punto del modello del torrente Seveso

Nel caso del torrente Seveso sono stati messi a punto tre modelli distinti, interfacciati mutuamente tra loro con continuità:

- un modello dell'alveo naturale inciso, rappresentato con il codice di calcolo MIKE 11;
- un modello del successivo tratto tombinato, basato sul codice di calcolo MIKE URBAN CS;
- un modello di esondazione ed allagamento delle aree urbane, realizzato con il codice di calcolo MIKE 21.

4.3.1 Messa a punto del modello monodimensionale dell'alveo inciso

Il tratto di alveo a cielo aperto in esame del torrente Seveso è stato schematizzato nel codice di calcolo MIKE 11 HD (modulo idrodinamico) con 33 sezioni trasversali d'alveo, desunte dal rilievo topografico pregresso dell'AdBPo.

In corrispondenza dei ponticelli e dei tombini sono state inserite specifiche strutture tipo “culvert” che riproducono le reali condizioni di deflusso di tali manufatti mentre in corrispondenza dei salti di fondo è stato necessario introdurre strutture tipo “weir”.

Nella Tabella 4 è riportato l'elenco delle sezioni trasversali d'alveo inserite nel modello MIKE 11, i cui nomi e progressive sono state mantenute uguali a quelle dello studio AdBPo. Nella Figura 37 è riportato lo schema planimetrico del modello 1D con evidenziata l'area coperta dal modello 2D; sono inoltre rappresentate le ubicazioni dei pozzetti di ispezione del tratto tombinato inseriti nel modello MIKE URBAN.

Come condizione al contorno, nella sezione di monte del modello è stato inserito l'idrogramma di portata di assegnato tempo di ritorno relativo allo scenario considerato (vedi Figura 9, Figura 12 e Figura 14, rispettivamente per tempi di ritorno di 100, 10 e 500 anni). Nella sezione più a valle, è stato effettuato il collegamento dinamico con la sezione di monte del tratto tombinato simulato con il codice di calcolo MIKE URBAN CS.

Per l'alveo inciso rappresentato con il modello MIKE 11, sono stati confermati i coefficienti medi di scabrezza di Strickler già adottati nello studio pregresso dell'AdBPo, pari a $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

ID sez.	Progr. (m)						
11-1	35597,94	P9m	36157,65	7	36758,84	3-2	37739,53
P11m	35607,94	9	36163,65	P7v	36760,84	P3m	37907,81
11	35620,94	P9v	36169,65	6	36966,91	3	37919,31
P11v	35633,94	8-1	36303,29	P5m	37225,51	P3v	37930,81
10-1	35676,35	P8m	36314	5	37227,01	2-2	37966,5
P10m2	35686,35	8	36321	P5v	37228,51	2-1	37990,51
P10m1	35690,95	P8v	36328	5-bis	37264,98		
10	35695,55	7-1	36470	4	37452,73		
9-1	35913,2	P7m	36756,84	3-1	37605,89		

Tabella 4 - Sezioni trasversali d'alveo del Seveso con indicazione della progressiva longitudinale.

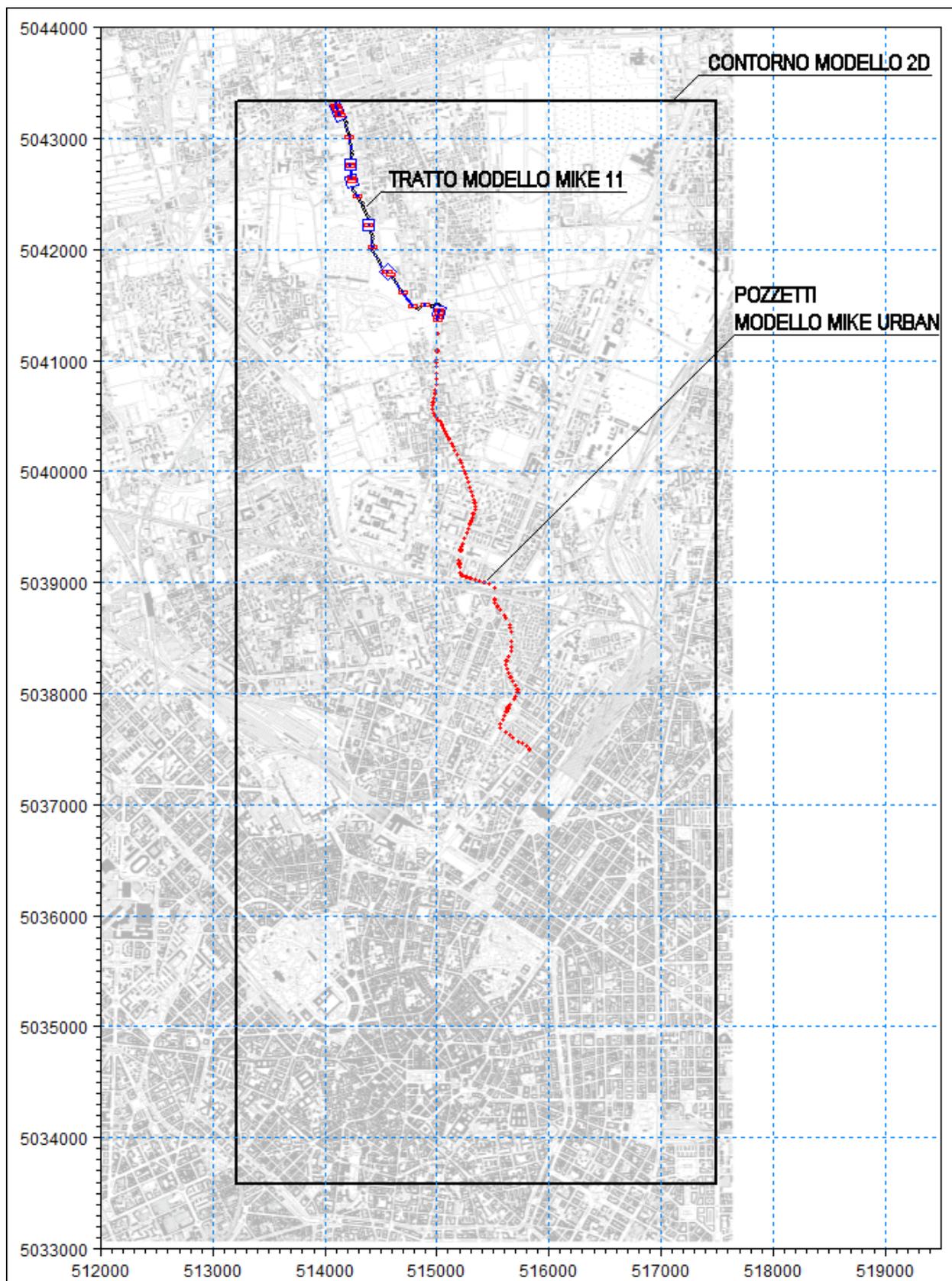


Figura 37 - Rappresentazione planimetrica del modello MIKE 11 del torrente Seveso con indicazione dei pozzetti di ispezione inseriti nel codice MIKE URBAN e dell'area coperta dal modello MIKE 21.

4.3.2 Messa a punto del modello monodimensionale del tratto tombinato

Il tratto tombinato del torrente Seveso è stato schematizzato nel codice di calcolo MIKE URBAN CS con 106 pozzetti di ispezione e 105 tratti di collettore, la cui geometria è stata tratta dai rilievi disponibili precedentemente citati. Nel modello è stato inoltre inserito un tratto del canale Martesana, a cavallo del punto di immissione in esso del torrente Seveso, al fine di assegnare nel punto terminale del tratto di Martesana considerato una condizione al contorno sicuramente non influente sui risultati delle simulazioni in tutto il corso del Seveso (vedi Figura 38); a tale scopo, per la caratterizzazione geometrica del Martesana, sono stati inseriti anche 6 pozzetti di ispezione ed altrettanti tratti di collettore.

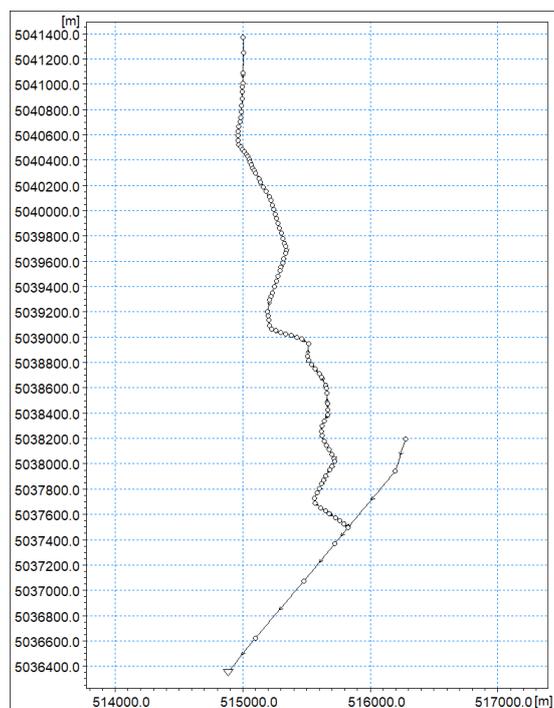


Figura 38 - Schema del modello MIKE URBAN del torrente Seveso.

Nel modello sono state inserite in particolare le sezioni dei collettori del Seveso con presenza dell'interrimento osservato nel corso dei rilievi del 2002, la cui consistenza è facilmente osservabile nel profilo longitudinale estratto dal modello e riportato nella Figura 39.

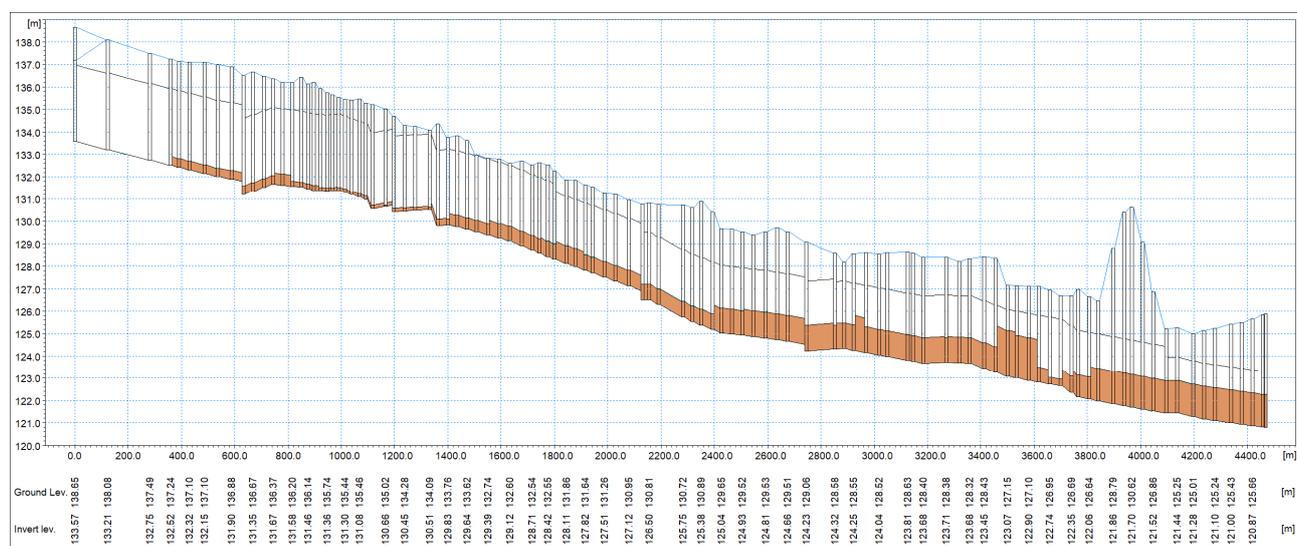


Figura 39 – Profilo longitudinale del tratto tombinato del torrente Seveso inserito nel modello con evidenziazione dell'interrimento rilevato nel 2002.

4.3.3 Messa a punto del modello bidimensionale delle aree urbane

Per l'analisi dell'idrodinamica di piena del Seveso è stato allestito un modello MIKE Flood con il seguente schema:

- modello MIKE 21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree urbane allagabili;
- modello MIKE 11 monodimensionale del tratto di alveo naturale come sopra descritto;
- modello MIKE URBAN monodimensionale del tratto tombinato come sopra descritto;
- connessione dinamica dei modelli MIKE 21, MIKE 11 e MIKE URBAN.

Il modello monodimensionale dell'alveo inciso è stato collegato dinamicamente alle adiacenti aree esterne su entrambe le sponde, modellate mediante il codice di calcolo MIKE 21 con approccio bidimensionale su griglia di calcolo a celle quadrate di lato **5,0x5,0** m, mediante le speciali funzioni di MIKE Flood e nel rispetto delle reali quote spondali, come meglio descritto in seguito.

L'uscita dal modello MIKE 11 è connessa dinamicamente all'ingresso nel modello MIKE URBAN. I pozzetti di ispezione di MIKE URBAN sono connessi alle corrispondenti celle di calcolo di MIKE 21 in modo tale che le portate uscenti da essi diventano portate di esondazione simulate in MIKE 21, nel momento in cui il moto nel tratto tombinato avviene in pressione e la linea piezometrica supera le quote di piano stradale; eventuali rientri di portata nel tratto tombinato sono possibili nel caso in cui in corrispondenza dei pozzetti sia presente volume invasato in superficie e la linea piezometrica risulti inferiore al piano stradale.

4.3.3.1 *Costruzione della griglia di calcolo*

Anche per le aree urbane a rischio di allagamento da parte del torrente Seveso si è deciso di adottare una griglia di calcolo sufficientemente fitta, a maglia 5,0 x 5,0 m, costituita complessivamente da 1954 righe x 858 colonne (1.676.532 punti di calcolo).

Nella Figura 40 è riportata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello 2D. In grigio sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili (aree con quota maggiore di 150 m s.m.). In verde scuro sono evidenziate le aree a quote inferiori mentre in giallo e marrone sono distinguibili le aree a quote maggiori. Nella figura, sovrapposta alla rappresentazione della batimetria, è riportata la base CTR in semitrasparenza.

L'alveo inciso del Seveso è stato escluso dalla simulazione con il modello bidimensionale MIKE 21, perché il suo contributo al deflusso delle piene è già simulato con il modello monodimensionale MIKE 11 nell'ambito del codice MIKE Flood.

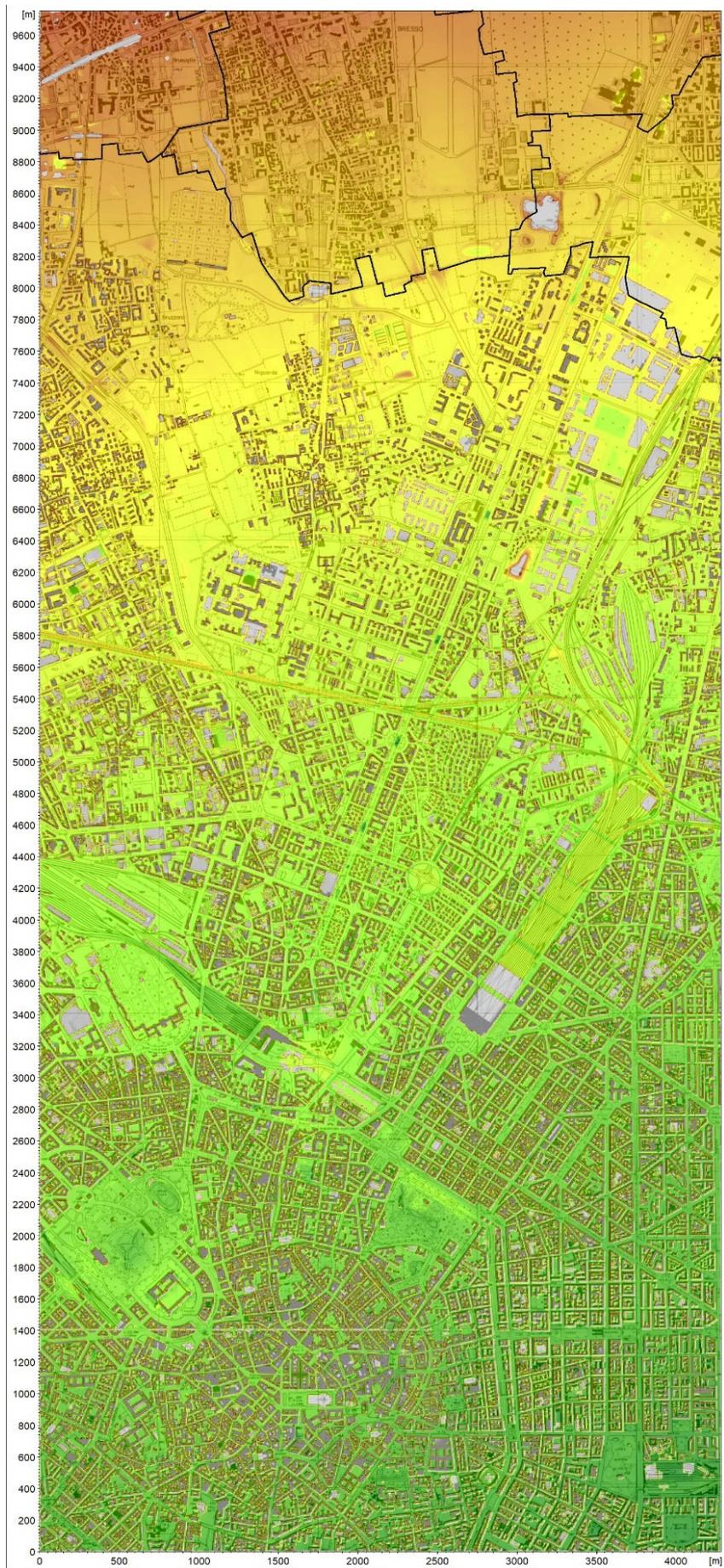


Figura 40 - Batimetria del modello 2D del torrente Seveso a maglia 5,0x5,0 m.

4.3.3.2 Parametri e condizioni al contorno del modello MIKE Flood

Come passo di tempo di integrazione, per garantire la stabilità numerica in termini di vincoli sul numero di Courant della corrente, è stato utilizzato un valore pari a 1,0 secondi.

Al coefficiente di eddy viscosity è stato assegnato un valore costante pari a $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ sull'intera estensione del modello.

Cautelativamente, si è deciso infine di adottare un coefficiente medio di scabrezza di Strickler pari a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, uniformemente distribuito su tutta l'area di analisi.

Al modello sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno idrodinamiche:

- condizioni al contorno di monte assegnate in ingresso al tratto di alveo naturale come sopra descritto (codice MIKE 11);
- condizione al contorno di valle imposta come uscita libera ("outlet") nella sezione terminale del tratto di canale Martesana; questa condizione, per quanto arbitraria, è del tutto ininfluenza sui risultati del modello in tutto il corso del Seveso;
- condizione al contorno "interna" di collegamento tra i due modelli MIKE 11 e MIKE URBAN;
- condizioni al contorno "interne" di collegamento tra i due modelli MIKE 11 e MIKE 21: in corrispondenza di tutte le celle lungo le sponde destra e sinistra del Seveso vengono applicate equazioni tipo "stramazzone a larga soglia" con quote di sfioro pari ai valori maggiori tra quelli delle celle del modello 2D e quelli corrispondenti delle quote di sponda delle sezioni d'alveo di MIKE 11, opportunamente interpolate;
- condizioni al contorno "interne" di collegamento tra i due modelli MIKE URBAN e MIKE 21 in corrispondenza di tutti i pozzetti presenti.

4.4 Messa a punto del modello del fiume Olona e dei torrenti Guisa e Pudiga

Per i torrenti Guisa e Pudiga sono stati messi a punto i seguenti modelli:

- un modello dell'alveo naturale inciso del Guisa, rappresentato con il codice di calcolo MIKE 11;
- un modello dell'alveo naturale inciso del Pudiga, rappresentato con il codice di calcolo MIKE 11;
- un modello unico dei tratti tombinati di Guisa, Pudiga e Olona, basato sul codice di calcolo MIKE URBAN;
- un modello di esondazione ed allagamento delle aree urbane relativo al Pudiga, realizzato con il codice di calcolo MIKE 21.

Per effetto degli interventi realizzati nell'area EXPO il torrente Guisa non induce allagamenti a valle di essa e pertanto non si è resa necessaria la messa a punto di un modello 2D.

4.4.1 Messa a punto del modello monodimensionale dell'alveo inciso del Guisa

Il tratto di alveo a cielo aperto in esame del torrente Guisa, a valle dell'area EXPO, è stato schematizzato nel codice di calcolo MIKE 11 HD (modulo idrodinamico) con 5 sezioni trasversali d'alveo, desunte dal rilievo topografico pregresso dell'AdBPo.

In corrispondenza dell'attraversamento autostradale è stata inserita una struttura tipo "culvert" che riproduce le reali condizioni di deflusso di tale manufatto.

Nella Tabella 5 è riportato l'elenco delle sezioni trasversali d'alveo inserite nel modello, i cui nomi e progressive sono state mantenute uguali a quelle dello studio AdBPo. Nella Figura 41 è riportato lo schema planimetrico del modello 1D.

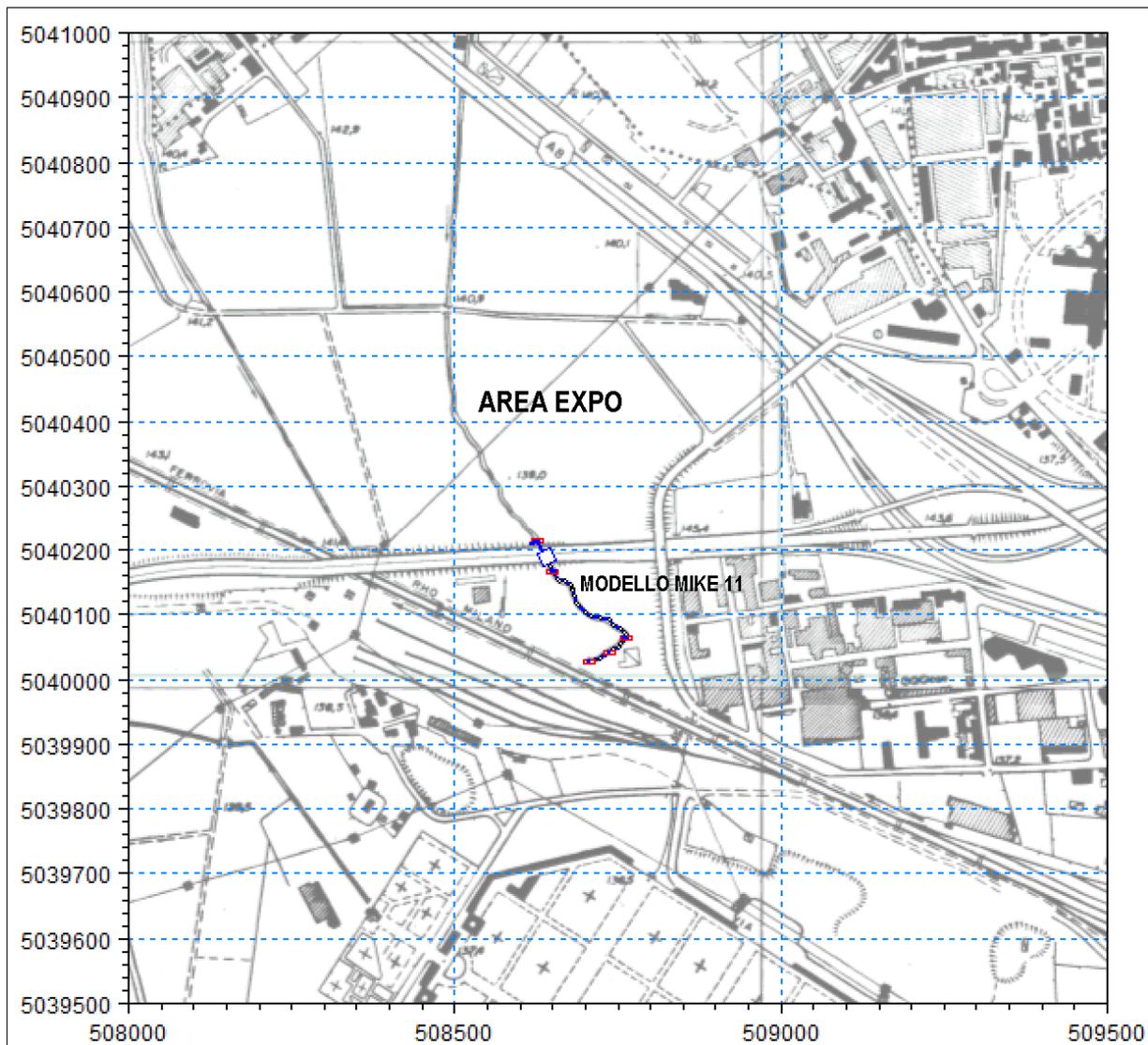


Figura 41 - Rappresentazione planimetrica del modello MIKE 11 del torrente Guisa.

Come condizione al contorno, nella sezione di monte del modello, sono state considerate le seguenti portate in moto stazionario (vedi paragrafo 2.3.4):

- $Q = 8,00 \text{ m}^3/\text{s}$ per $TR = 10$ anni;
- $Q = 9,00 \text{ m}^3/\text{s}$ per $TR = 100$ anni;
- $Q = 11,00 \text{ m}^3/\text{s}$ per $TR = 500$ anni.

Nella sezione più a valle è stata invece assegnata la scala di deflusso relativa al tratto tombinato del torrente Guisa, desunta dall'applicazione del modello MIKE URBAN.

Per l'alveo inciso rappresentato con il modello MIKE 11, sono stati confermati i coefficienti medi di scabrezza di Strickler già adottati nello studio pregresso dell'AdBPo.

ID sez.	Progr. (m)
2	18072,75
2-bis	18115,68
1-1	18280,65
1-1-bis	18313,69
1	18346,02

Tabella 5 - Sezioni trasversali d'alveo del Guisa con indicazione della progressiva longitudinale.

4.4.2 Messa a punto del modello monodimensionale dell'alveo inciso del Pudiga

Il tratto di alveo a cielo aperto in esame del torrente Pudiga è stato schematizzato nel codice di calcolo MIKE 11 HD (modulo idrodinamico) con 23 sezioni trasversali d'alveo, in parte desunte dal rilievo topografico pregresso dell'AdBPo e in parte estratte dal rilievo Lidar.

In corrispondenza dei ponti sono state inserite strutture tipo "culvert" che riproducono le reali condizioni di deflusso di tali manufatti.

Nella Tabella 6 è riportato l'elenco delle sezioni trasversali d'alveo inserite nel modello, i cui nomi e progressive sono state mantenute uguali a quelle dello studio AdBPo. Nella Figura 42 è riportato lo schema planimetrico del modello 1D con evidenziata l'area coperta dal modello 2D.

ID sez.	Progr. (m)	Fonte	ID sez.	Progr. (m)	Fonte
10-bis	17016,00	1	3-1	18168,65	2
	17029,00	2	2-1	18189,06	2
9	17115,85	2	2-1-bis	18207,51	2
8M	17216,06	1	2M	18271,54	1
ponte	17221,06	1	ponte	18276,54	1
8V	17236,06	1	2V	18291,54	1
7	17438,74	2	1	18441,03	1
6	17598,19	2	Tombino	18452,53	1
	17761,78	2	Tombino	18462,53	1
5	17783,15	2	Tombino	18472,53	1
4	17908,72	2	Tombino	18573,53	1
3	18088,26	2			

Tabella 6 - Sezioni trasversali d'alveo del Pudiga, con indicazione della progressiva longitudinale e della fonte (1 = AdBPo, 2 = Lidar).

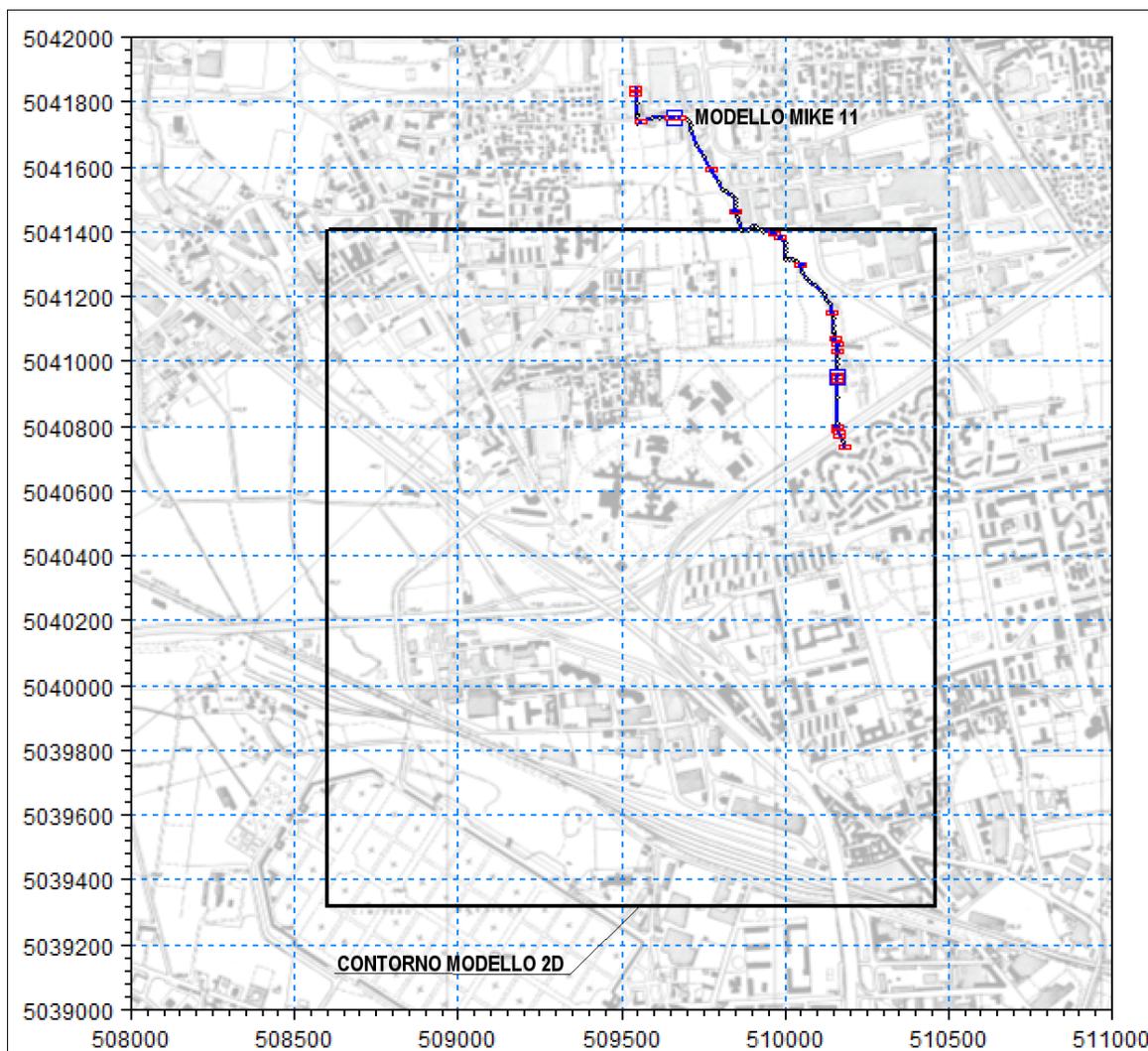


Figura 42 - Rappresentazione planimetrica del modello MIKE 11 del torrente Pudiga e dell'area coperta dal modello MIKE 21.

Come condizione al contorno, nella sezione di monte del modello, sono stati considerati gli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno caratterizzati dalle seguenti portate al colmo (vedi paragrafo 2.3.5):

- $Q = 23,0 \text{ m}^3/\text{s}$ per $TR = 10$ anni;
- $Q = 25,0 \text{ m}^3/\text{s}$ per $TR = 100$ anni;
- $Q = 30,0 \text{ m}^3/\text{s}$ per $TR = 500$ anni.

Nella sezione più a valle è stata invece assegnata la scala di deflusso relativa al tratto tombinato del torrente Pudiga, desunta dall'applicazione del modello MIKE URBAN.

Per l'alveo inciso rappresentato con il modello MIKE 11, sono stati confermati i coefficienti medi di scabrezza di Strickler già adottati nello studio pregresso dell'AdBPo.

4.4.3 Messa a punto del modello monodimensionale dei tratti tombinati di Olona, Guisa e Pudiga

Nel codice di calcolo MIKE URBAN CS il tratto tombinato del torrente Guisa è stato schematizzato con 86 pozzetti di ispezione e 85 tratti di collettore, mentre il tratto tombinato del torrente Pudiga è stato schematizzato con 17 pozzetti di ispezione e 16 tratti di collettore; la geometria è stata tratta dai rilievi disponibili precedentemente citati. Nel modello è stato inoltre inserito un tratto tombinato significativo del fiume Olona, che riceve le immissioni dei torrenti Guisa e Pudiga, al fine di assegnare nel punto terminale del tratto di Olona considerato una condizione al contorno sicuramente non influente sui risultati delle simulazioni in tutto il corso

di Guisa e Pudiga (vedi Figura 52); a tale scopo, per la caratterizzazione geometrica dell'Olona, sono stati inseriti anche ulteriori 17 pozzetti di ispezione ed altrettanti tratti di collettore.

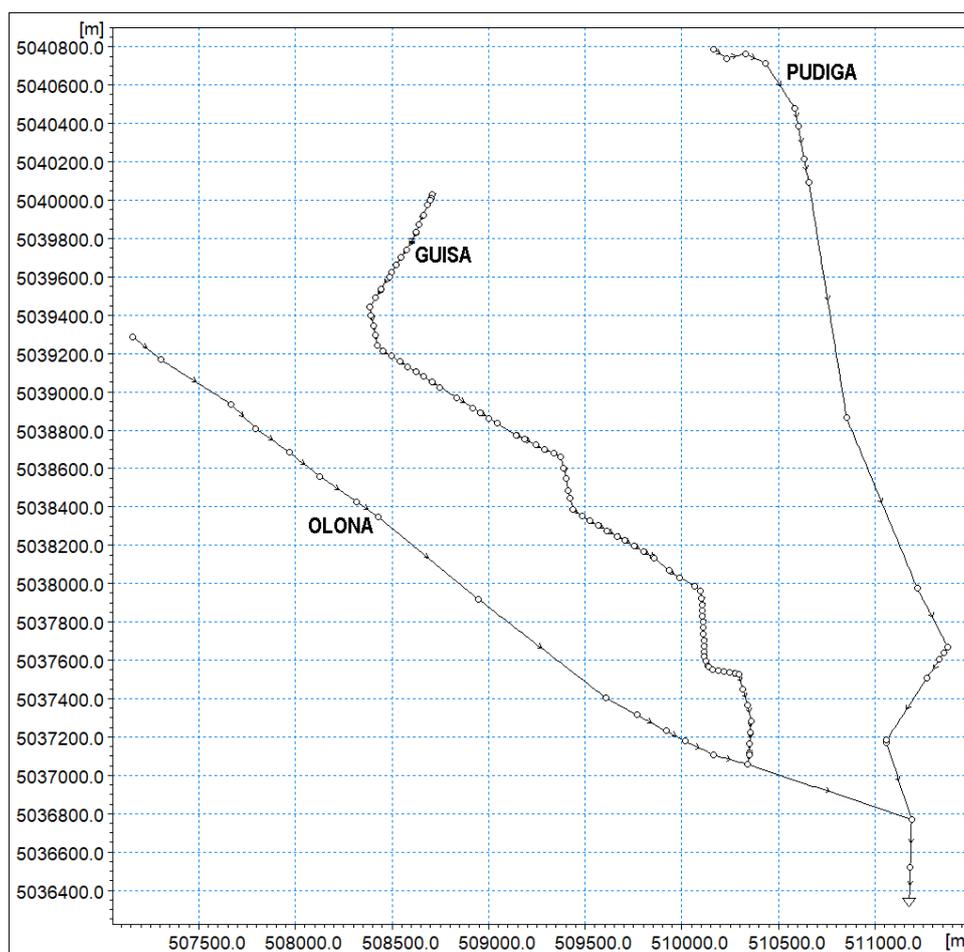


Figura 43 - Schema del modello MIKE URBAN di Olona, Guisa e Pudiga.

In questo caso le simulazioni sono state condotte cautelativamente in moto stazionario considerando in ingresso ai vari tratti i seguenti valori di portata al colmo:

- per TR = 10 anni: Q = 40,0 m³/s per l'Olona;
Q = 8,0 m³/s per il Guisa;
Q = 13,0 m³/s per il Pudiga;
- per TR = 100 anni: Q = 50,0 m³/s per l'Olona;
Q = 9,0 m³/s per il Guisa;
Q = 13,0 m³/s per il Pudiga;
- per TR = 500 anni: Q = 55,0 m³/s per l'Olona;
Q = 11,0 m³/s per il Guisa;
Q = 13,0 m³/s per il Pudiga.

Per il torrente Pudiga la portata è stata calcolata in ingresso al tratto tombinato con il modello MIKE Flood descritto nel paragrafo successivo: i valori calcolati non aumentano molto al crescere del tempo di ritorno TR, per cui in tutti gli scenari si è adottato un valore arrotondato in eccesso pari a 13,0 m³/s.

Nei tre scenari simulati non si verificano fuoriuscite di portata dai pozzetti di ispezione dei tratti tombinati di Guisa e Pudiga, come descritto in dettaglio nel seguito. Pertanto non è stato necessario introdurre nel modello MIKE Flood del Pudiga anche la simulazione con il modello MIKE URBAN come nel caso del Seveso.

Per il Guisa, non essendo nemmeno presenti esondazioni nel tratto di alveo aperto simulato con MIKE 11, non è stata necessaria la messa a punto di alcun modello 2D.

4.4.4 Messa a punto del modello bidimensionale del Pudiga

Per l'analisi idrodinamica di piena del Pudiga è stato allestito un modello MIKE Flood con il seguente schema:

- modello MIKE 21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree urbane allagabili;
- modello MIKE 11 monodimensionale del tratto di alveo naturale come sopra descritto;
- connessione dinamica dei modelli MIKE 21 e MIKE 11.

Il modello monodimensionale dell'alveo inciso è stato collegato dinamicamente alle adiacenti aree esterne su entrambe le sponde, modellate mediante il codice di calcolo MIKE 21 con approccio bidimensionale su griglia di calcolo a celle quadrate di lato **5,0x5,0** m, mediante le speciali funzioni di MIKE Flood e nel rispetto delle reali quote spondali, come meglio descritto in seguito.

4.4.4.1 *Costruzione della griglia di calcolo*

Per le aree a rischio di allagamento da parte del torrente Pudiga si è adottata una griglia di calcolo a maglia 5,0 x 5,0 m, costituita complessivamente da 418 righe x 372 colonne (155.496 punti di calcolo).

Nella Figura 44 è riportata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello 2D. In grigio sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili (aree con quota maggiore di 160 m s.m.). In verde scuro sono evidenziate le aree a quote inferiori mentre in giallo e marrone sono distinguibili le aree a quote maggiori. Nella figura, sovrapposta alla rappresentazione della batimetria, è riportata la base CTR in semitrasparenza.

L'alveo inciso del Pudiga è stato escluso dalla simulazione con il modello bidimensionale MIKE 21, perché il suo contributo al deflusso delle piene è già simulato con il modello monodimensionale MIKE 11 nell'ambito del codice MIKE Flood.

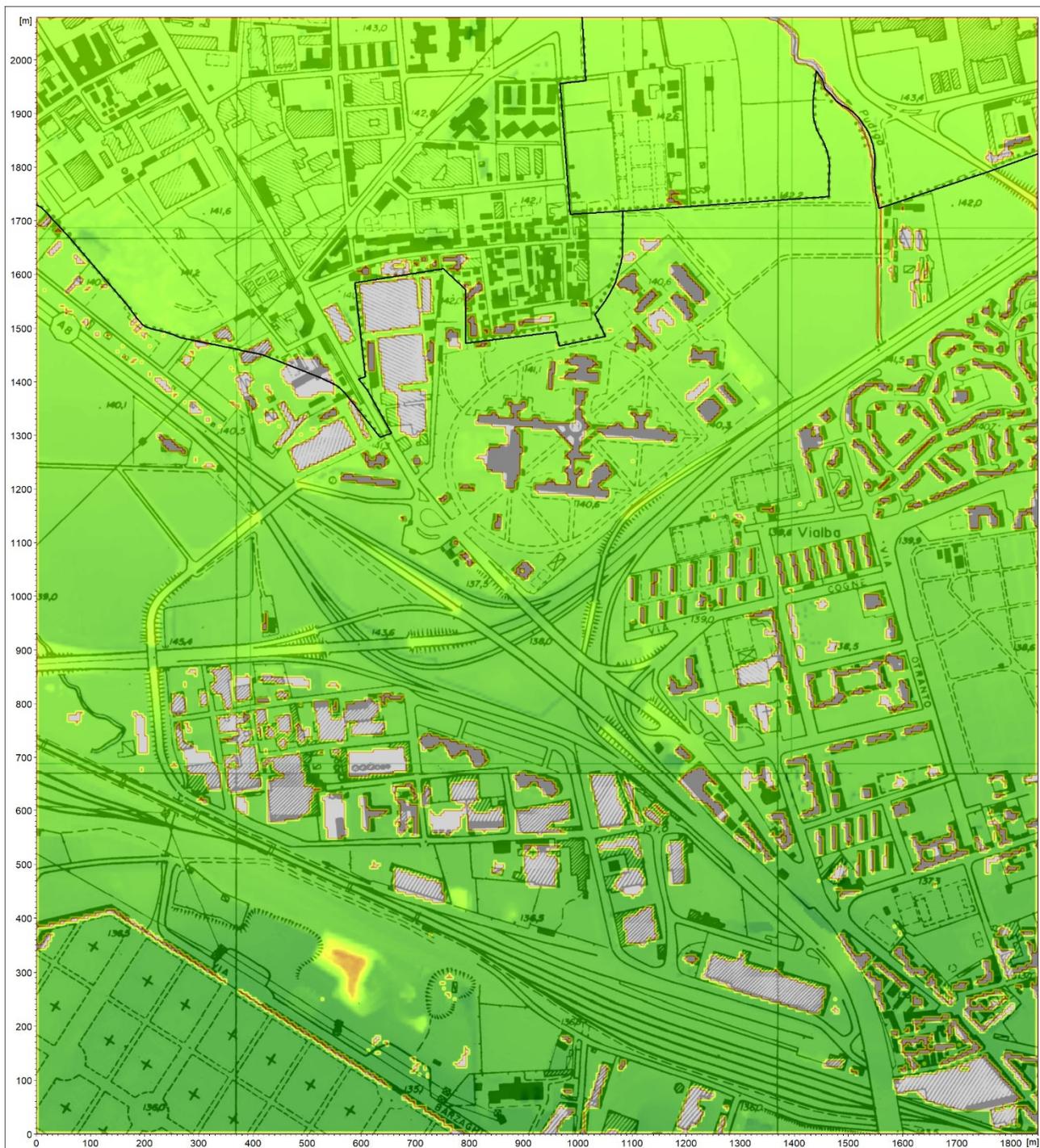


Figura 44 - Batimetria del modello 2D del torrente Pudiga a maglia 5,0x5,0 m.

4.4.4.2 Parametri e condizioni al contorno del modello MIKE Flood

Come passo di tempo di integrazione, per garantire la stabilità numerica in termini di vincoli sul numero di Courant della corrente, è stato utilizzato un valore pari a 0,5 secondi.

Al coefficiente di eddy viscosity è stato assegnato un valore costante pari a $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ sull'intera estensione del modello.

Cautelativamente, si è deciso infine di adottare un coefficiente medio di scabrezza di Strickler pari a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, uniformemente distribuito su tutta l'area di analisi.

Al modello sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno idrodinamiche:

- condizioni al contorno di monte assegnate in ingresso al tratto di alveo naturale come sopra descritto (codice MIKE 11);
- condizioni al contorno “interne” di collegamento tra i due modelli MIKE 11 e MIKE 21: in corrispondenza di tutte le celle lungo le sponde destra e sinistra del Pudiga vengono applicate equazioni tipo “stramazzo a larga soglia” con quote di sfioro pari ai valori maggiori tra quelli delle celle del modello 2D e quelli corrispondenti delle quote di sponda delle sezioni d'alveo di MIKE 11, opportunamente interpolate.

4.5 Messa a punto del modello del torrente Garbogera

Nel caso del torrente Garbogera sono stati messi a punto tre modelli distinti, interfacciati tra loro:

- un modello dell'alveo naturale inciso, rappresentato con il codice di calcolo MIKE 11;
- un modello del successivo tratto tombinato, basato sul codice di calcolo MIKE URBAN CS;
- un modello di esondazione ed allagamento delle aree urbane, realizzato con il codice di calcolo MIKE 21.

4.5.1 Messa a punto del modello monodimensionale dell'alveo inciso

Il tratto di alveo a cielo aperto in esame del torrente Garbogera è stato schematizzato nel codice di calcolo MIKE 11 HD (modulo idrodinamico) con 7 sezioni trasversali d'alveo, desunte dal rilievo topografico pregresso dell'AdBPo.

In corrispondenza dei ponti sono state inserite strutture tipo “culvert” che riproducono le reali condizioni di deflusso di tali manufatti.

Nella Tabella 7 è riportato l'elenco delle sezioni trasversali d'alveo inserite nel modello, i cui nomi e progressive sono state mantenute uguali a quelle dello studio AdBPo. Nella Figura 45 è riportato lo schema planimetrico del modello 1D con evidenziata l'area coperta dal modello 2D.

ID sez.	Progr. (m)
5v	16183,17
4	16316,41
4v	16331,41
3	16508,35
3v	16528,35
2	16605,79
1	16797,33

Tabella 7 - Sezioni trasversali d'alveo del Garbogera, con indicazione della progressiva longitudinale.

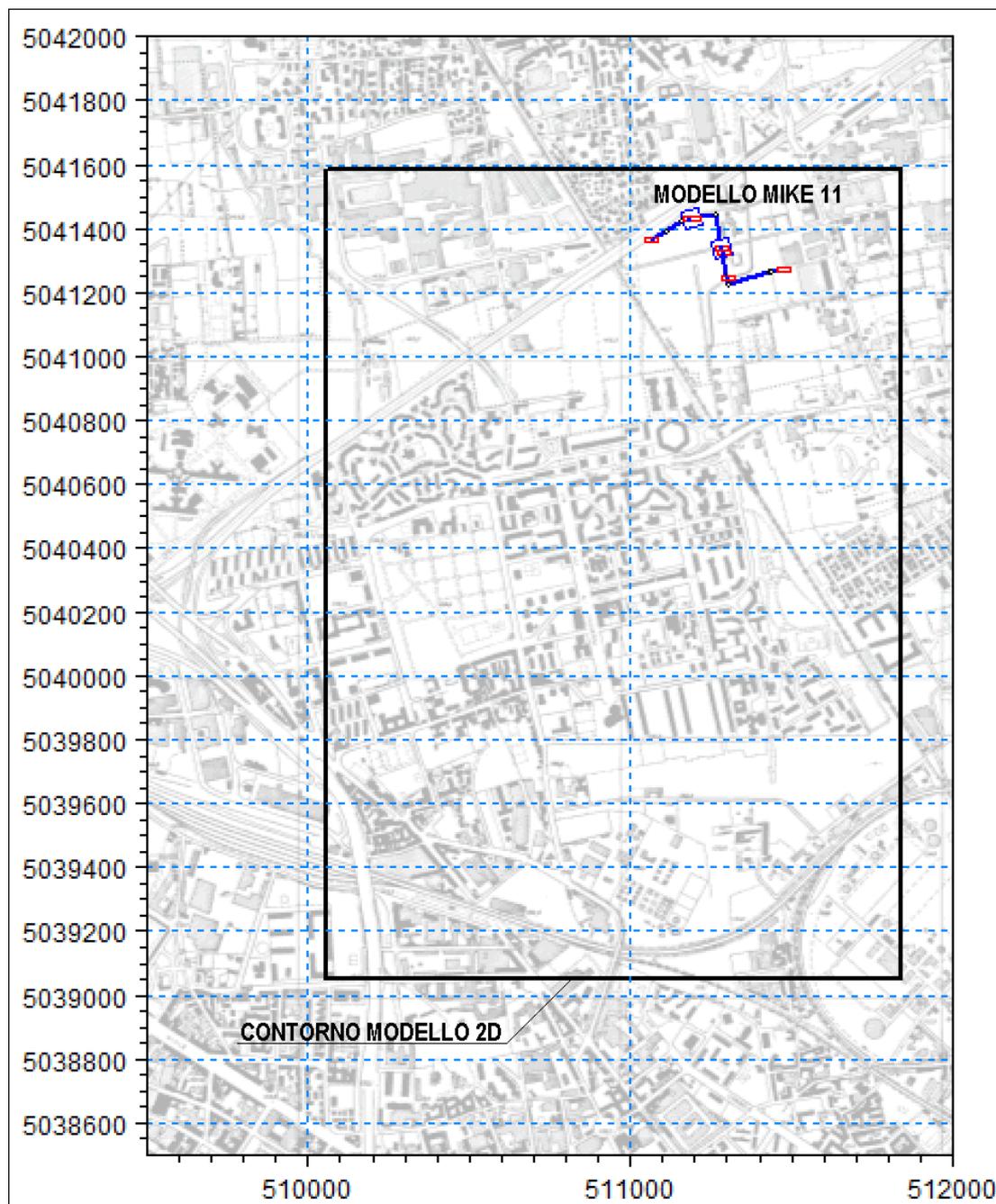


Figura 45 - Rappresentazione planimetrica del modello MIKE 11 del torrente Garbogera e dell'area coperta dal modello MIKE 21.

Come condizione al contorno, nella sezione di monte del modello, sono stati considerati gli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno caratterizzati dalle seguenti portate al colmo (vedi paragrafo 2.4.1), con forma desunta dallo studio pregresso dell'AdBPo, rappresentati nella Figura 46:

- $Q = 6,0 \text{ m}^3/\text{s}$ per $TR = 10$ anni;
- $Q = 7,0 \text{ m}^3/\text{s}$ per $TR = 100$ anni;
- $Q = 8,0 \text{ m}^3/\text{s}$ per $TR = 500$ anni.

Nella sezione più a valle è stata invece assegnata la scala di deflusso relativa al tratto tombinato del torrente Garbogera, desunta dall'applicazione del modello MIKE URBAN.

Per l'alveo inciso rappresentato con il modello MIKE 11, sono stati confermati i coefficienti medi di scabrezza di Strickler già adottati nello studio pregresso dell'AdBPo.

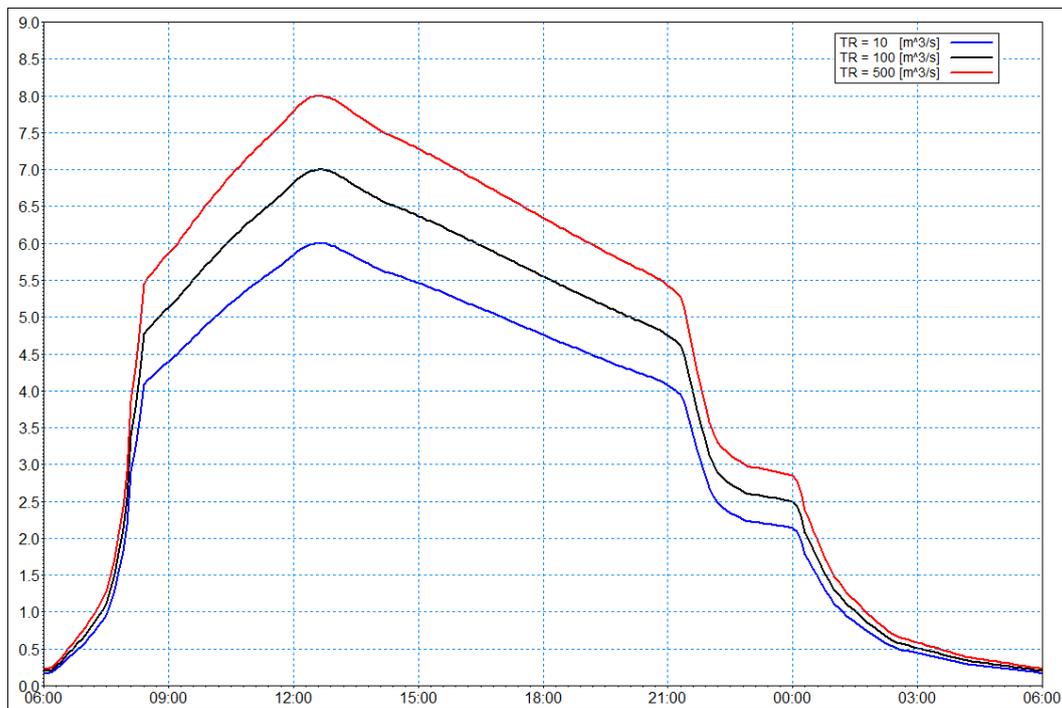


Figura 46 - Idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno in ingresso nel tratto in esame del torrente Garbogera.

4.5.2 Messa a punto del modello monodimensionale del tratto tombinato

Il tratto tombinato del torrente Garbogera è stato schematizzato nel codice di calcolo MIKE URBAN CS con 83 pozzetti di ispezione e altrettanti tratti di collettore, la cui geometria è stata tratta dai rilievi disponibili precedentemente citati. Nella Figura 47 è riportato lo schema planimetrico del tratto in esame.

Come condizione al contorno di monte sono stati assegnati in ingresso al tratto tombinato gli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno rappresentati nella Figura 48, calcolati con il modello MIKE Flood descritto nel paragrafo successivo: i valori calcolati non aumentano molto al crescere del tempo di ritorno TR.

Come condizione al contorno di valle si è imposta una scala di deflusso in moto permanente nel ramo terminale del tratto in esame.

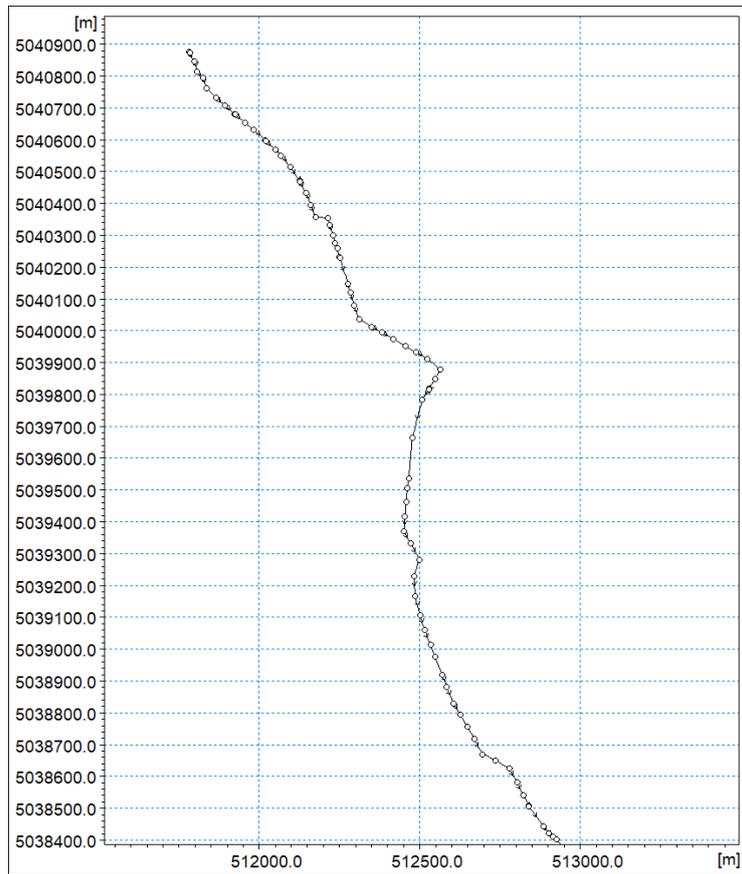


Figura 47 - Schema del modello MIKE URBAN del torrente Garbogera.

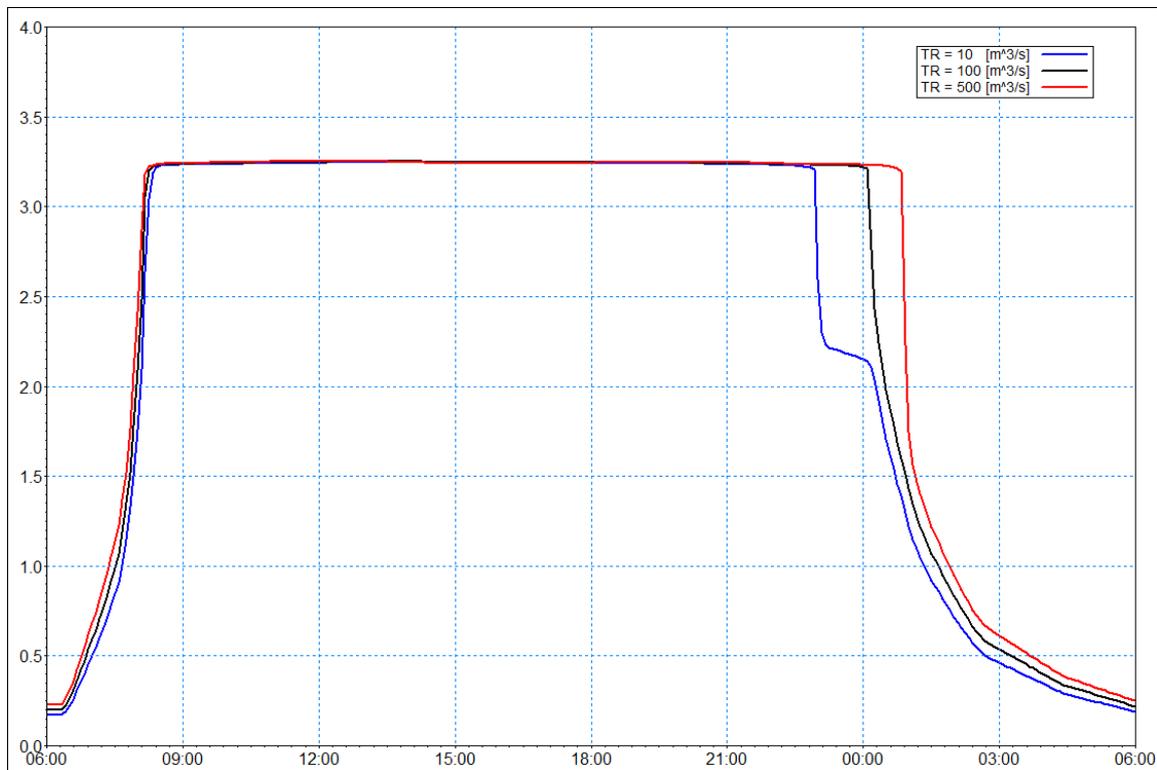


Figura 48 - Idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno in ingresso nel tratto in esame del torrente Garbogera.

4.5.3 Messa a punto del modello bidimensionale delle aree urbane

Per l'analisi idrodinamica di piena del Garbogera è stato allestito un modello MIKE Flood con il seguente schema:

- modello MIKE 21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree urbane allagabili;
- modello MIKE 11 monodimensionale del tratto di alveo naturale come sopra descritto;
- connessione dinamica dei modelli MIKE 21 e MIKE 11.

Il modello monodimensionale dell'alveo inciso è stato collegato dinamicamente alle adiacenti aree esterne su entrambe le sponde, modellate mediante il codice di calcolo MIKE 21 con approccio bidimensionale su griglia di calcolo a celle quadrate di lato **5,0x5,0** m, mediante le speciali funzioni di MIKE Flood e nel rispetto delle reali quote spondali, come meglio descritto in seguito.

4.5.3.1 *Costruzione della griglia di calcolo*

Per le aree a rischio di allagamento da parte del torrente Garbogera si è adottata una griglia di calcolo a maglia 5,0 x 5,0 m, costituita complessivamente da 506 righe x 357 colonne (180.642 punti di calcolo).

Nella Figura 49 è riportata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello 2D. In grigio sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili (aree con quota maggiore di 146 m s.m.). In verde scuro sono evidenziate le aree a quote inferiori mentre in giallo e marrone sono distinguibili le aree a quote maggiori. Nella figura, sovrapposta alla rappresentazione della batimetria, è riportata la base CTR in semitrasparenza.

L'alveo inciso del Garbogera è stato escluso dalla simulazione con il modello bidimensionale MIKE 21, perché il suo contributo al deflusso delle piene è già simulato con il modello monodimensionale MIKE 11 nell'ambito del codice MIKE Flood.



Figura 49 - Batimetria del modello 2D del torrente Garbogera a maglia 5,0x5,0 m.

4.5.3.2 Parametri e condizioni al contorno del modello MIKE Flood

Come passo di tempo di integrazione, per garantire la stabilità numerica in termini di vincoli sul numero di Courant della corrente, è stato utilizzato un valore pari a 1,0 secondi.

Al coefficiente di eddy viscosity è stato assegnato un valore costante pari a $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ sull'intera estensione del modello.

Cautelativamente, si è deciso infine di adottare un coefficiente medio di scabrezza di Strickler pari a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, uniformemente distribuito su tutta l'area di analisi.

Al modello sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno idrodinamiche:

- condizioni al contorno di monte assegnate in ingresso al tratto di alveo naturale come sopra descritto (codice MIKE 11);
- condizioni al contorno "interne" di collegamento tra i due modelli MIKE 11 e MIKE 21: in corrispondenza di tutte le celle lungo le sponde destra e sinistra del Garbogera vengono applicate equazioni tipo "stramazzo a larga soglia" con quote di sfioro pari ai valori maggiori tra quelli delle celle del modello 2D e quelli corrispondenti delle quote di sponda delle sezioni d'alveo di MIKE 11, opportunamente interpolate.

5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

I modelli descritti sono stati utilizzati per simulare i seguenti scenari:

- **TR10**: scenario attuale con portata decennale;
- **TR100**: scenario attuale con portata centennale (**TR200**: scenario attuale con portata duecentennale per il solo fiume Lambro);
- **TR500**: scenario attuale con portata cinquecentennale.

Le simulazioni sono state condotte generalmente in moto vario ipotizzando in ingresso ai modelli gli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno precedentemente definiti. Solo in pochi casi, comunque dichiarati, per semplicità e in favore di sicurezza, sono state condotte simulazioni in moto stazionario.

I risultati delle simulazioni ottenuti con il modello sono illustrati nei capitoli successivi mediante l'ausilio di elaborati grafici esplicativi:

- mappe con rappresentazione delle aree allagate calcolate con il modello MIKE 21;
- profili longitudinali di corrente lungo l'alveo inciso calcolati con il modello MIKE 11;
- profili longitudinali di corrente lungo i tratti tombinati calcolati con il modello MIKE URBAN;
- confronto tra idrogrammi di piena in ingresso e uscita dal modello al fine di valutare l'effetto di laminazione indotto dai volumi di esondazione calcolati.

5.1 Fiume Lambro

5.1.1 Tratto a monte dell'attraversamento ferroviario presso viale Lazio

Nella Figura 50 è riportata la distribuzione calcolata con il modello bidimensionale MIKE 21 nella situazione attuale delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena con tempo di ritorno 10 anni: le tonalità blu evidenziano le aree di esondazione con tiranti idrici minori, quelle giallo/rosso le aree con tiranti idrici maggiori e quelle verdi con tiranti idrici intermedi. Le aree interne all'alveo inciso del Lambro non sono rappresentate perché, come già detto, il loro contributo al deflusso è stato già preso in conto nell'ambito del modello MIKE 11.

Analogamente nella Figura 51 è rappresentata la mappa involuppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per tempo di ritorno 200 anni e nella Figura 52 quella corrispondente al tempo di ritorno 500 anni.

In tutte le figure sono inoltre riportati i confini comunali (linee bianche) e i limiti delle aree con probabilità di alluvioni elevata (linee nere tratteggiate), media (linee nere continue) e scarsa (linee nere a tratto e punto) desunte dal "Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni".

Nella Figura 53 è riportata la distribuzione calcolata con il modello 2D nella situazione attuale delle massime velocità di deflusso verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena con tempo di ritorno 10 anni: le tonalità blu evidenziano le aree con velocità di deflusso basse, quelle giallo/rosso le aree con velocità maggiori.

Analogamente nella Figura 54 è rappresentata la mappa inviluppo delle massime velocità di deflusso per tempo di ritorno 200 anni e nella Figura 55 quella corrispondente al tempo di ritorno 500 anni.

Nella Figura 56 è fornita la corrispondente rappresentazione grafica dei profili di piena di assegnato tempo di ritorno TR, con indicazione della variabilità della portata massima defluente lungo lo sviluppo longitudinale dell'alveo inciso.

Nella Figura 57 sono rappresentati, per i tempi di ritorno di 10, 200 e 500 anni, i confronti tra l'idrogramma in ingresso al modello e l'idrogramma in uscita da esso (a valle dell'attraversamento ferroviario) nelle condizioni di stato attuale. Analizzando questi risultati si osserva quanto segue:

- per effetto delle esondazioni nelle aree del parco e in quelle urbane, la portata al colmo si riduce da 180 m³/s a 130 m³/s con un grado di laminazione pari a 27,8% per TR=10 anni, da 315 m³/s a 217 m³/s con un grado di laminazione pari a 31,1% per TR=200 anni e da 340 m³/s a 228 m³/s con un grado di laminazione pari a 32,9% per TR=500 anni;
- le portate al colmo degli idrogrammi in uscita dal modello di monte confermano la riduzione di portata definita nella tabella 4.7 del P.G.R.A. (vedi Tabella 1 della presente relazione) nel passaggio dalla sezione LA78 (Milano via Feltre) e la sezione LA67 (Traversa di Bolgiano).

Nella Figura 58 sono riportati gli idrogrammi di piena con tempo di ritorno 200 e 500 anni in uscita dal tombino stradale presente a lato dell'attraversamento ferroviario del Lambro in corrispondenza di viale Lazio: tali idrogrammi sono stati inseriti nel modello di valle come condizione al contorno di monte. Per tempo di ritorno 10 anni il tombino stradale non viene interessato da deflussi di piena.

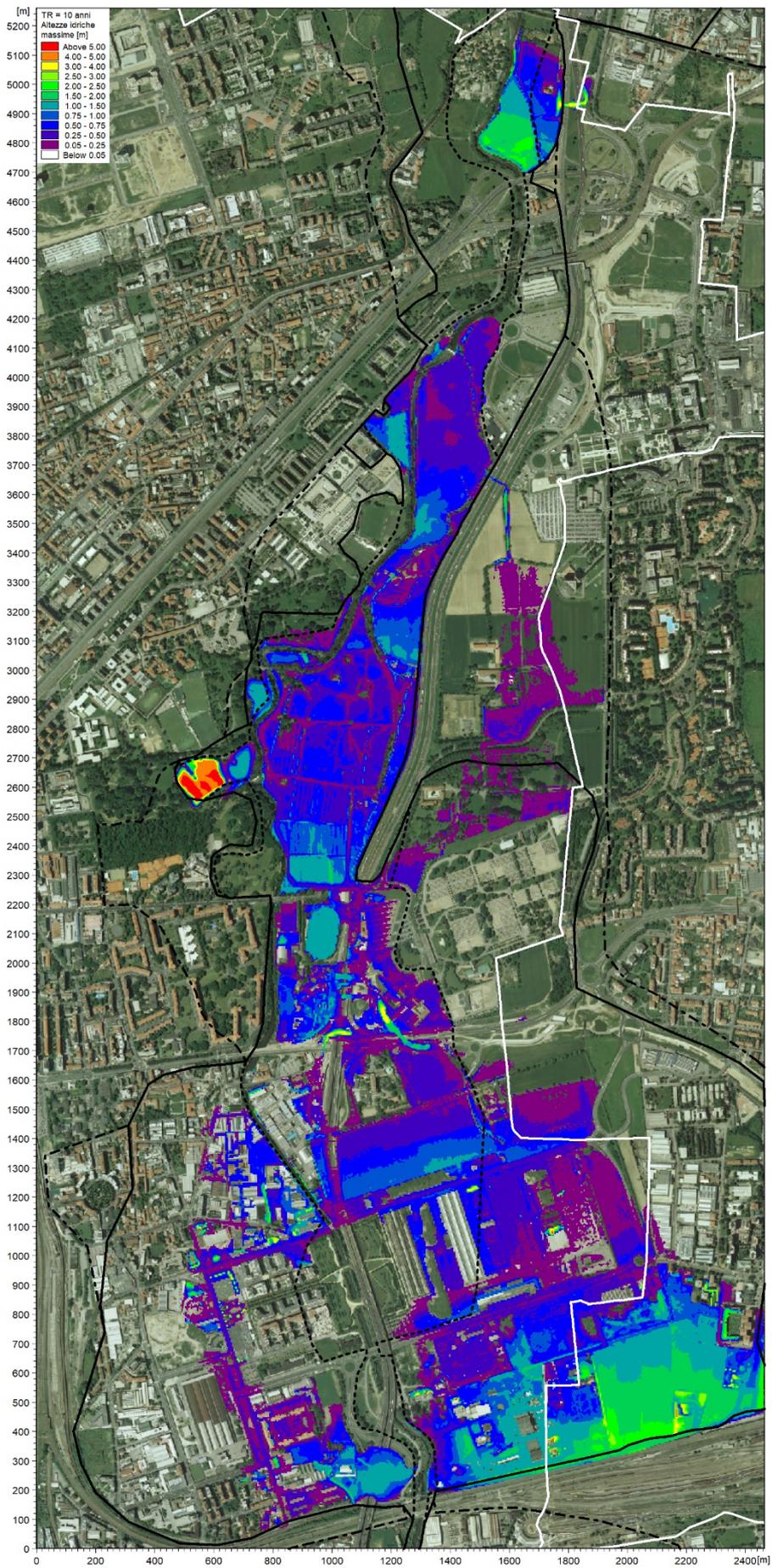


Figura 50 - Stato attuale, TR10: inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

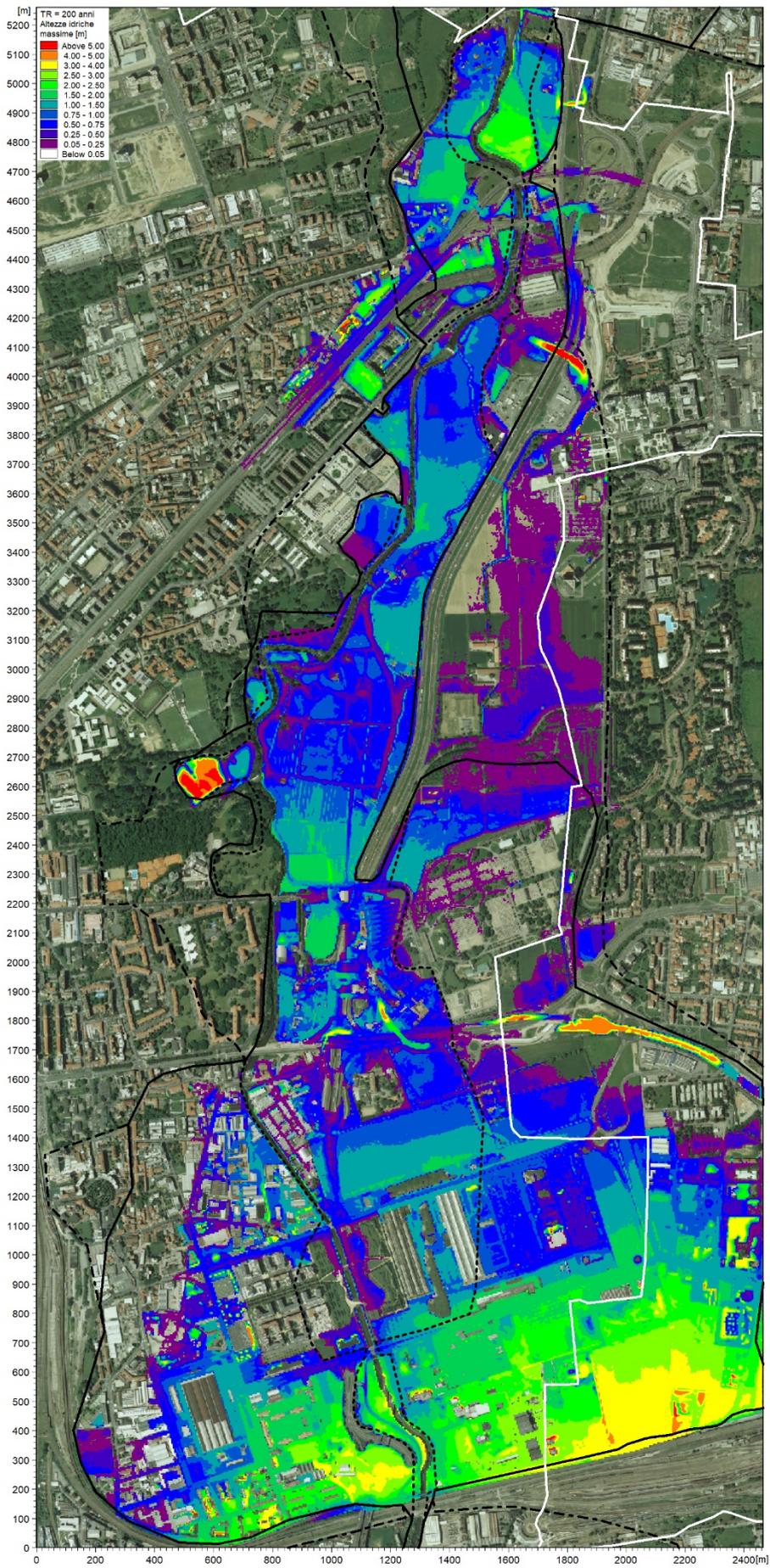


Figura 51 - Stato attuale, TR200: inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

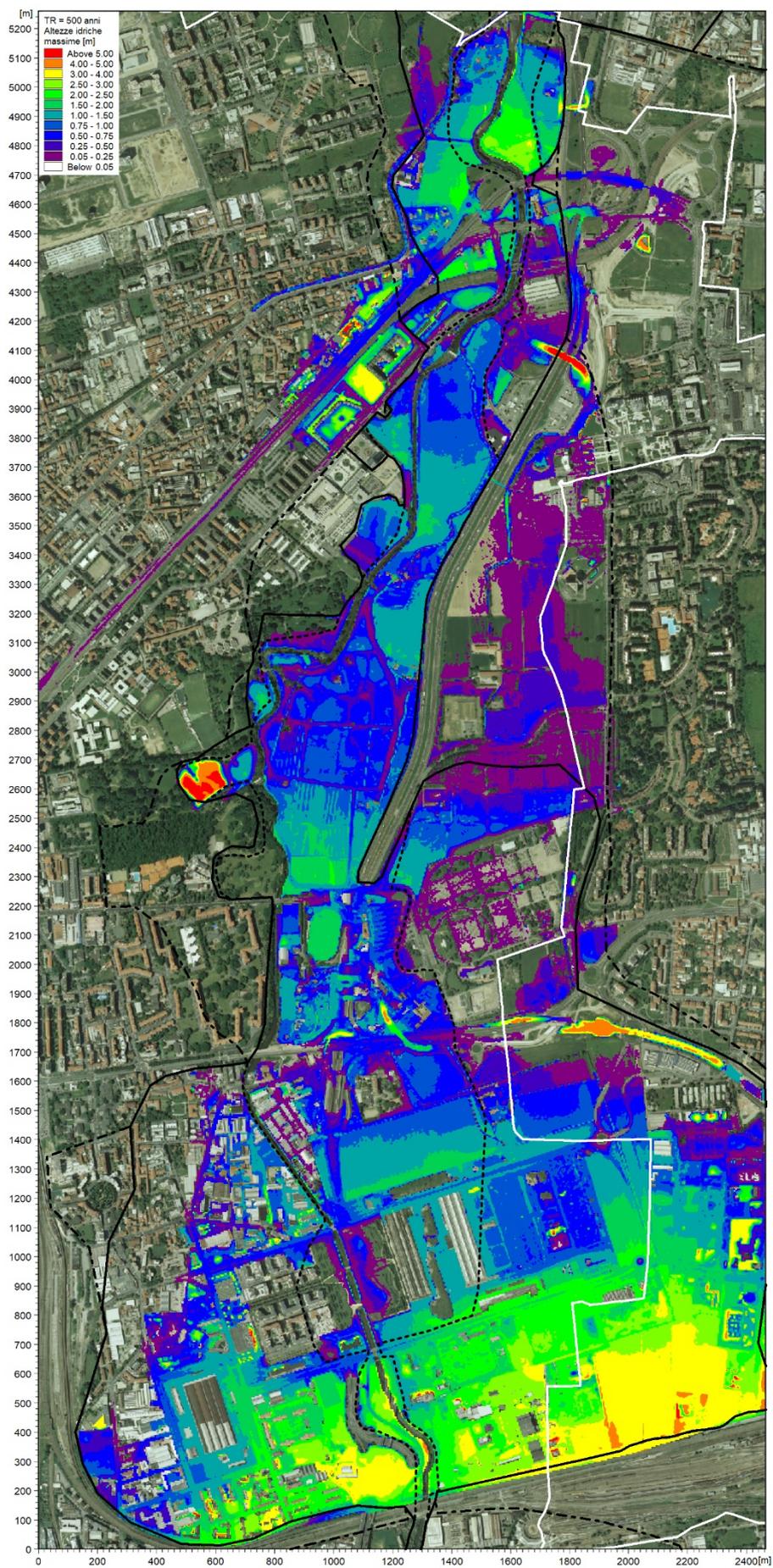


Figura 52 - Stato attuale, TR500: inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

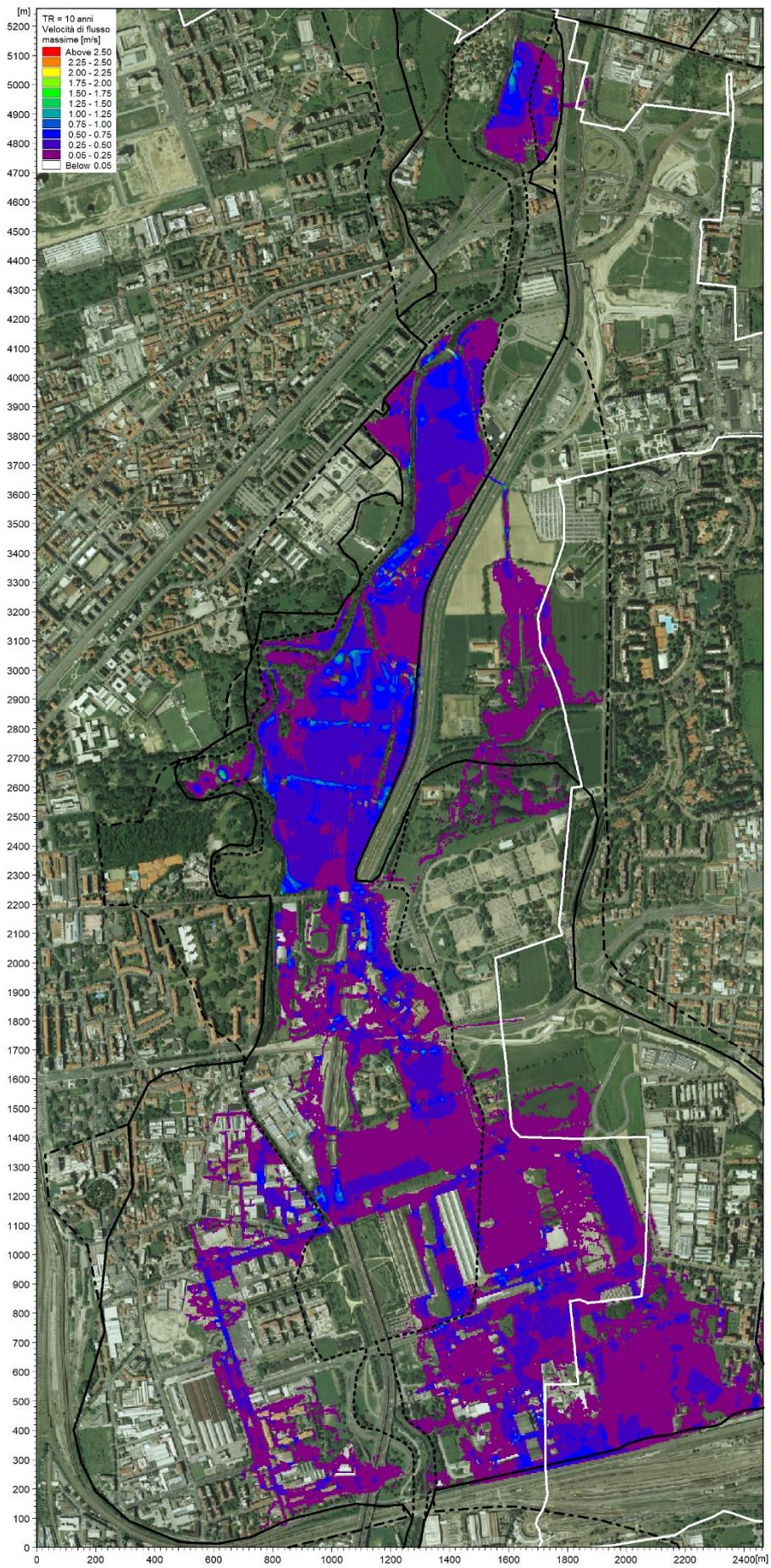


Figura 53 - Stato attuale, TR10: involucro delle massime velocità di deflusso.

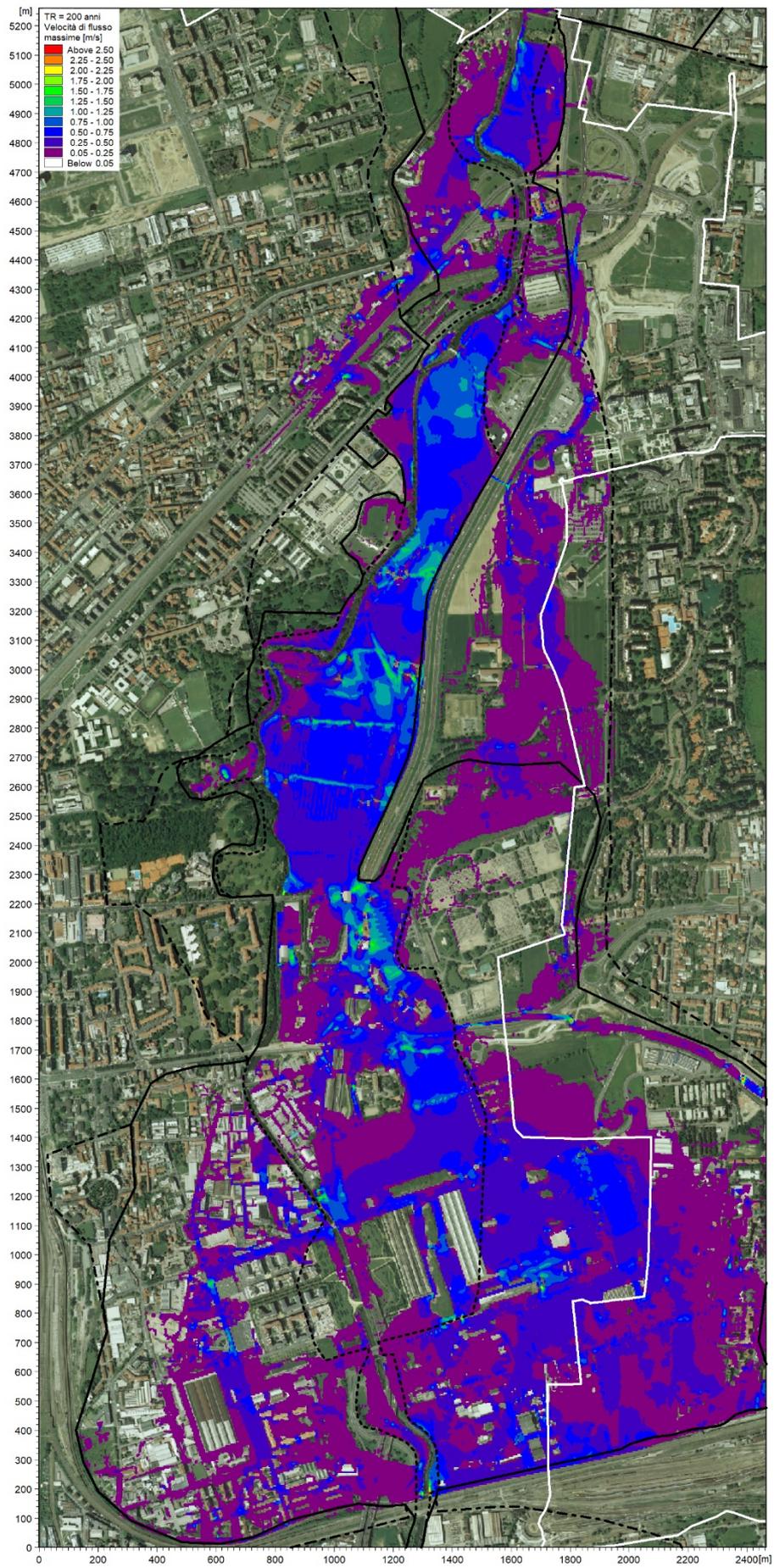


Figura 54 - Stato attuale, TR200: inviluppo delle massime velocità di deflusso.

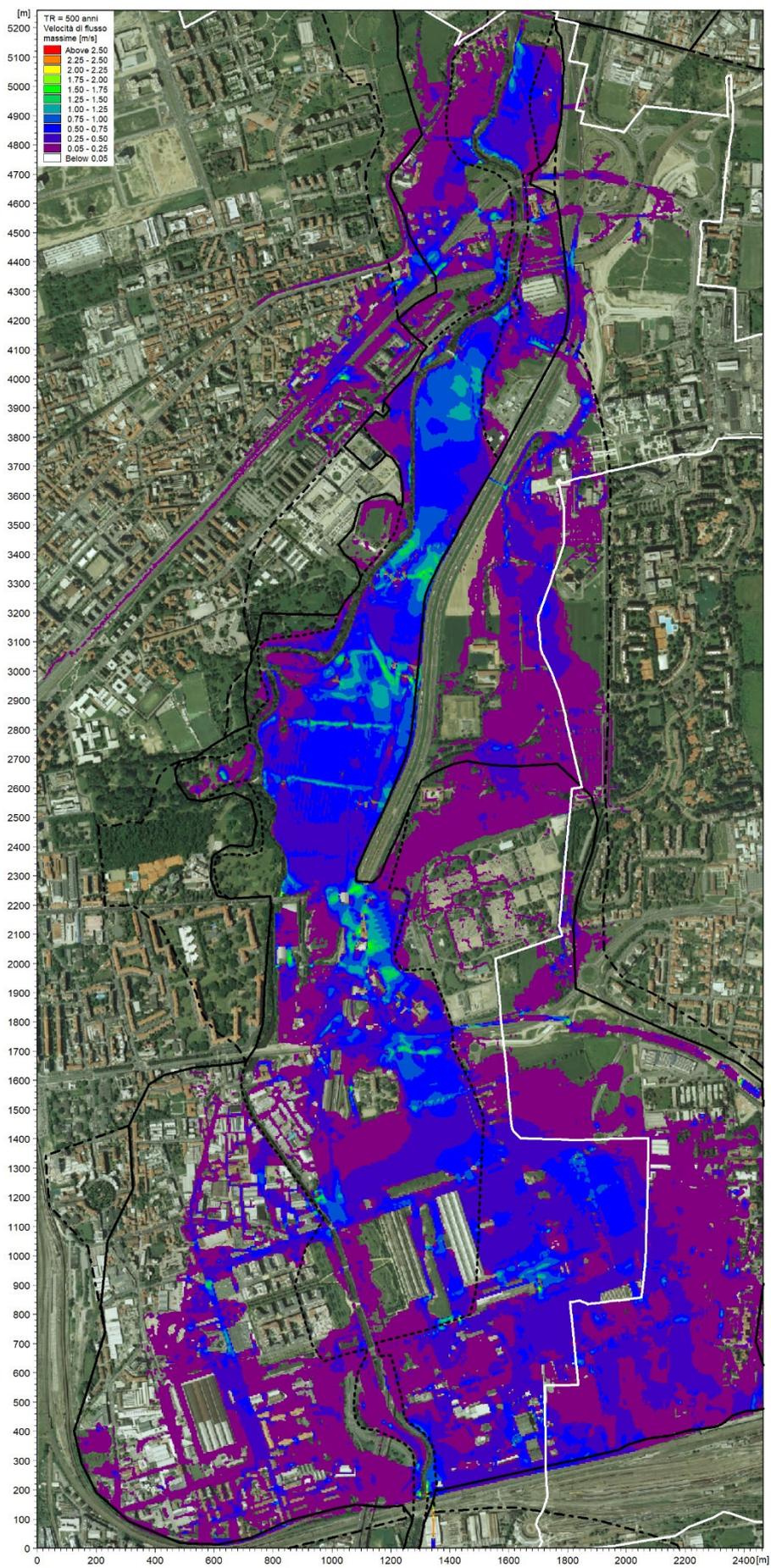


Figura 55 - Stato attuale, TR500: inviluppo delle massime velocità di deflusso.

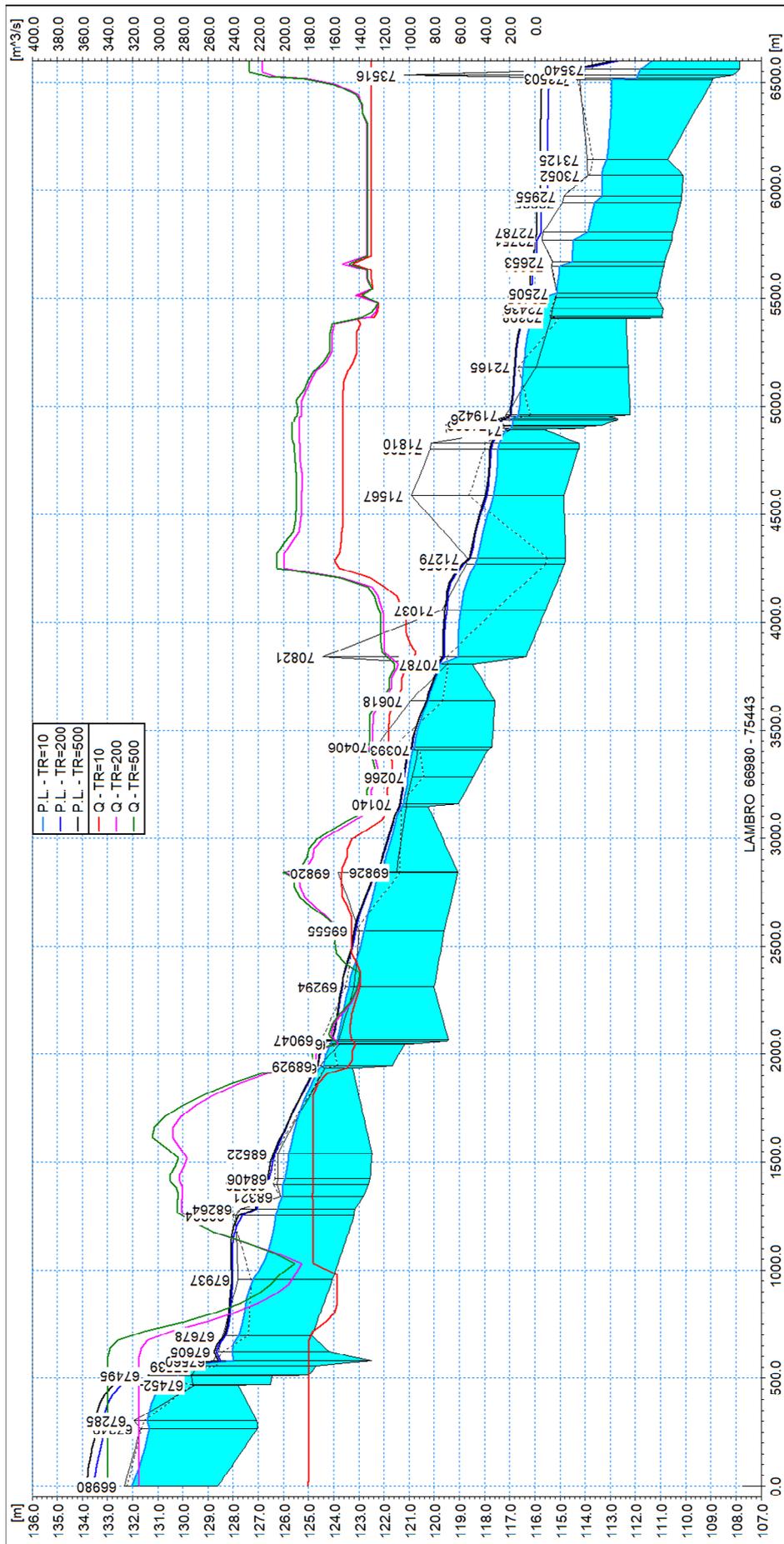


Figura 56 – Profili di corrente lungo l'alveo inciso del Lambro allo stato attuale per assegnati TR.

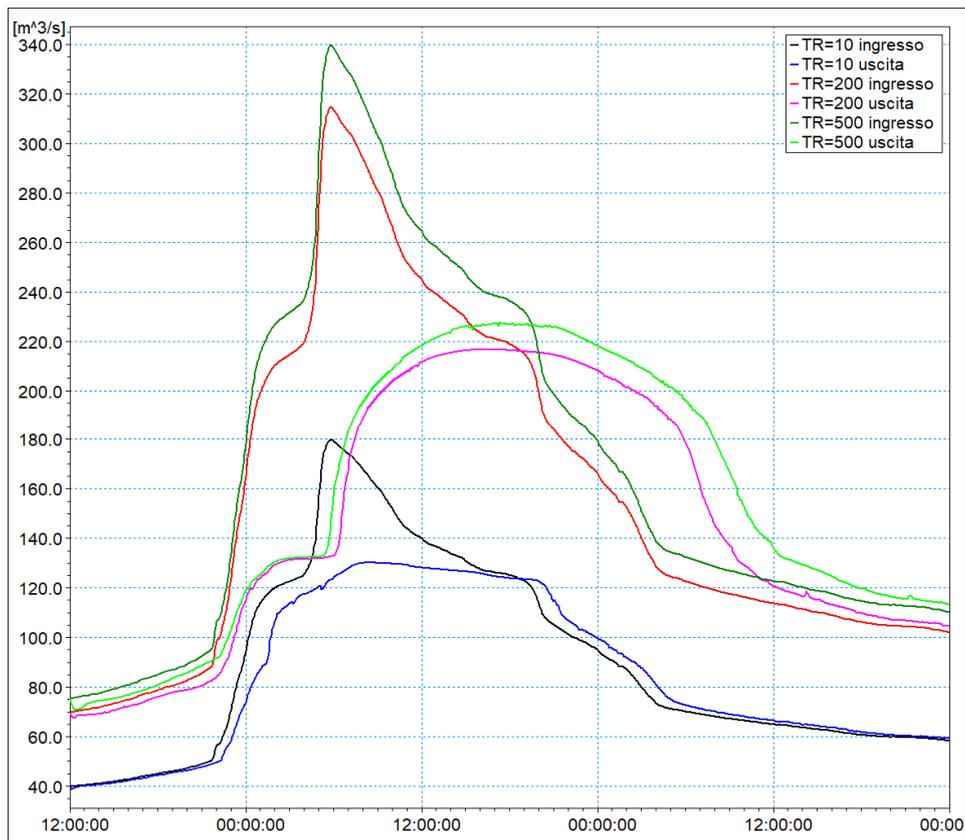


Figura 57 – Confronto tra idrogrammi di piena in ingresso e in uscita dal modello per tempi di ritorno di 10, 200 e 500 anni, nelle condizioni attuali.

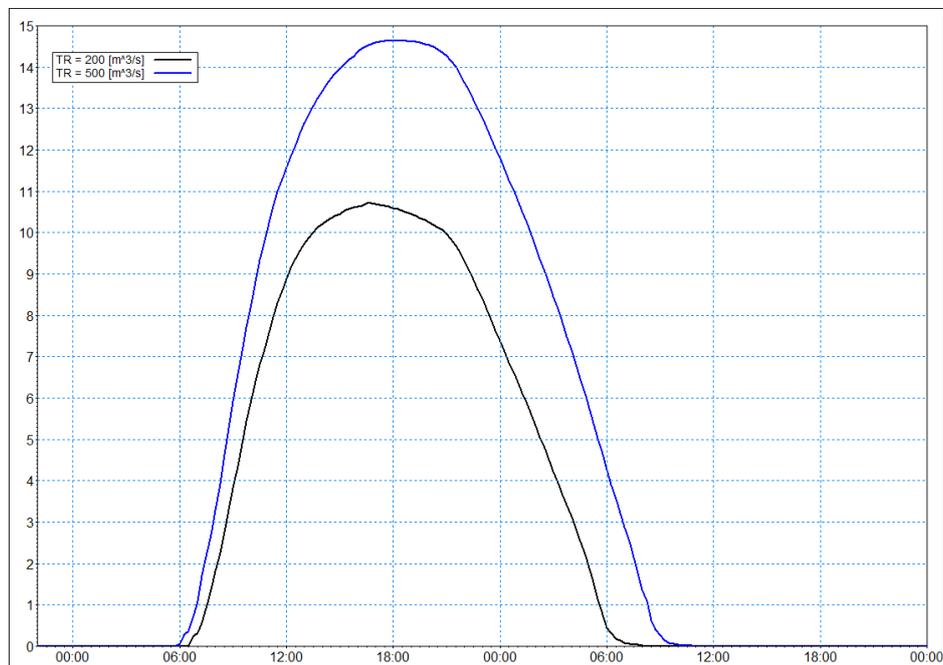


Figura 58 – Idrogrammi di piena per tempi di ritorno di 200 e 500 anni sottopassanti la ferrovia attraverso il tombino stradale di attraversamento presente lungo viale Lazio.

5.1.2 Tratto a valle dell'attraversamento ferroviario presso viale Lazio

Nella Figura 59 per il tempo di ritorno 10 anni, nella Figura 60 per il tempo di ritorno 200 anni e nella Figura 61 per il tempo di ritorno 500 anni è riportata la distribuzione calcolata con il modello bidimensionale MIKE 21 nella situazione attuale delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena: le tonalità blu evidenziano le aree di esondazione con tiranti idrici minori, quelle giallo/rosso le aree con tiranti idrici maggiori e quelle verdi con tiranti idrici intermedi. Le aree interne all'alveo inciso del Lambro non sono rappresentate perché, come già detto, il loro contributo al deflusso è stato già preso in conto nell'ambito del modello MIKE 11.

Anche per questo tratto, in tutte le figure sono riportati i confini comunali (linee bianche) e i limiti delle aree con probabilità di alluvioni elevata (linee nere tratteggiate), media (linee nere continue) e scarsa (linee nere a tratto e punto) desunte dal P.G.R.A..

Nella Figura 62 per il tempo di ritorno 200 anni e nella Figura 63 per il tempo di ritorno 500 anni è riportata la distribuzione calcolata con il modello 2D nella situazione attuale delle massime velocità di deflusso verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena: le tonalità blu evidenziano le aree con velocità di deflusso basse, quelle giallo/rosso le aree con velocità maggiori. La mappa relativa al tempo di ritorno 10 anni non è stata invece prodotta a causa dell'esiguità dell'area allagata (vedi Figura 59) e della corrispondente limitata velocità.

Nella Figura 64 è fornita la rappresentazione grafica dei profili di piena di assegnato tempo di ritorno TR calcolati con il modello MIKE 11, con indicazione della variabilità della portata massima defluente lungo lo sviluppo longitudinale dell'alveo inciso.

Nella Figura 65 sono infine rappresentati, per i tempi di ritorno di 10, 200 e 500 anni, i confronti tra l'idrogramma in ingresso al modello e l'idrogramma in uscita da esso nelle condizioni di stato attuale. Analizzando questi risultati si osserva quanto segue:

- per effetto delle esondazioni nelle aree golenali e urbane, la portata al colmo si riduce da 217 m³/s a 161 m³/s con un grado di laminazione pari a 25,8% per TR=200 anni e da 228 m³/s a 161 m³/s con un grado di laminazione pari a 29,4% per TR=500 anni; per TR=10 anni, essendo le esondazioni trascurabili, la portata al colmo di 130 m³/s rimane pressoché invariata;
- agli idrogrammi di portata uscenti dal modello nell'alveo inciso rappresentati in Figura 65 occorre però aggiungere anche le portate uscenti dal modello in sinistra orografica provenienti dalle esondazioni che avvengono a monte di viale Forlanini, che interessano le aree limitrofe all'aeroporto di Linate e che si propagano verso valle non riuscendo più a rientrare in alveo (vedi Figura 66). Tenendo poi conto che nel modello entrano come condizione al contorno di monte anche gli idrogrammi rappresentati nella Figura 58, il grado di laminazione risulta soltanto pari a 2,4% per TR=200 anni e pari a 1,7% per TR=500 anni.



Figura 59 - Stato attuale, TR10: inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

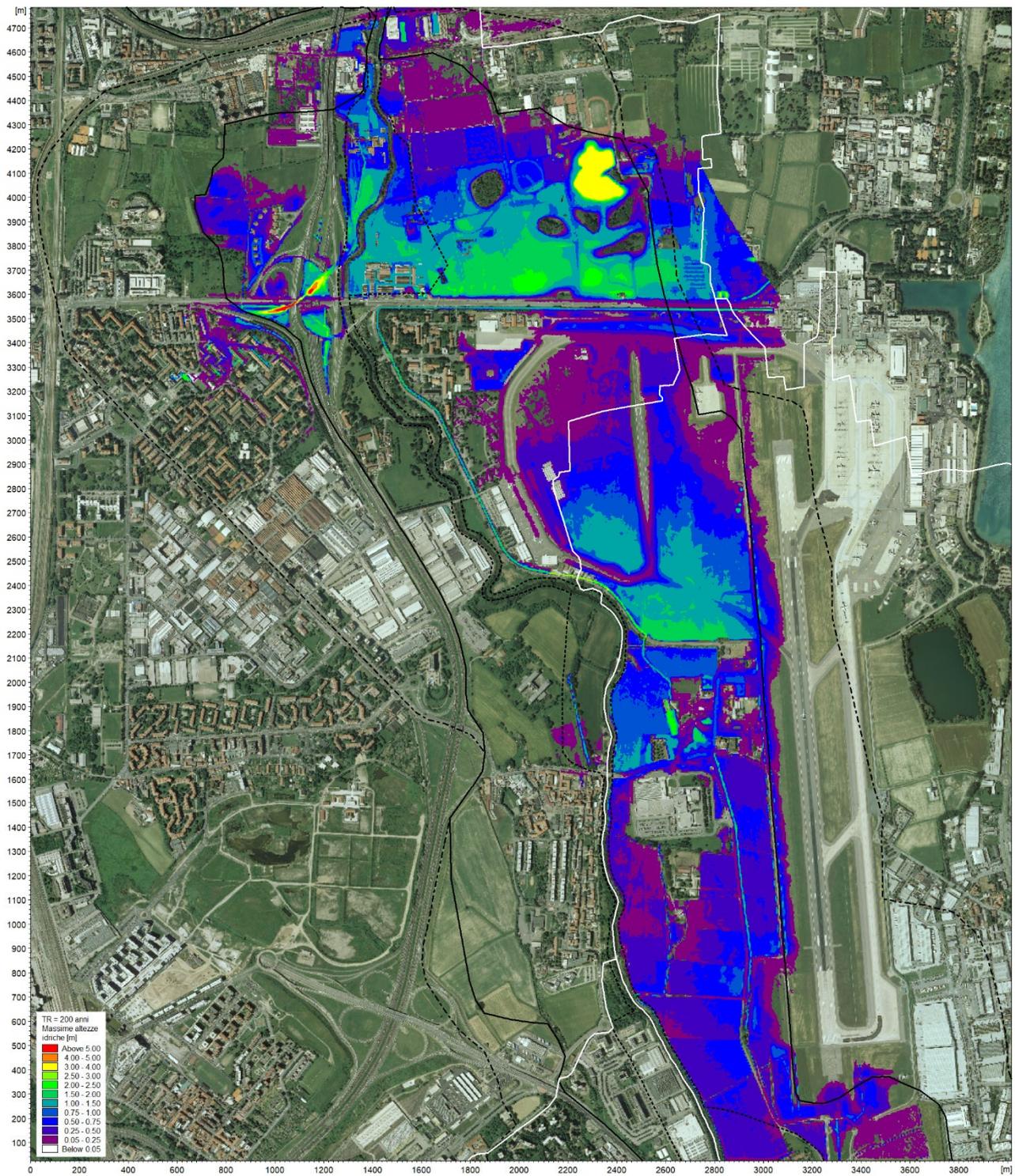


Figura 60 - Stato attuale, TR200: involuppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

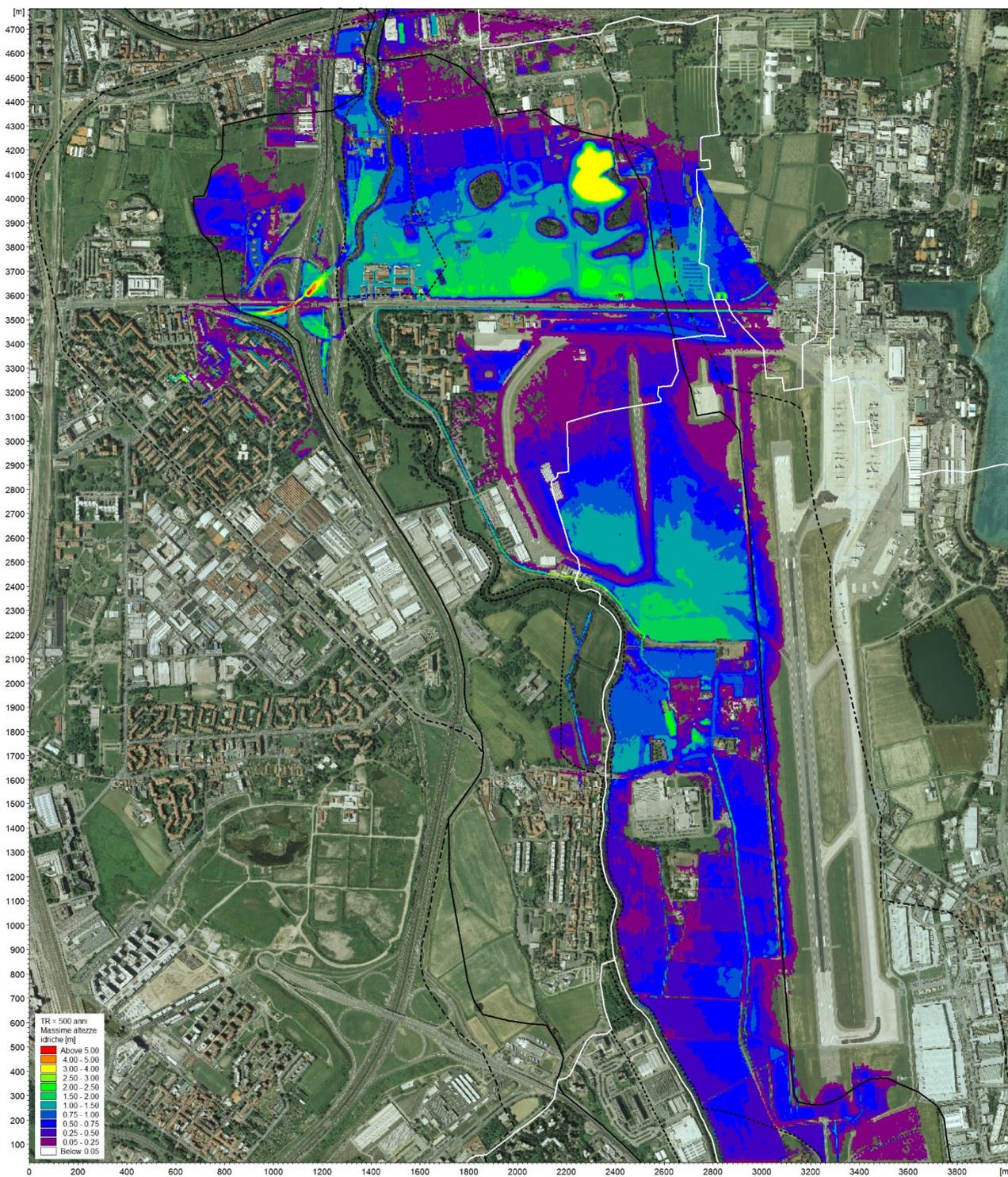


Figura 61 - Stato attuale, TR500: involuppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

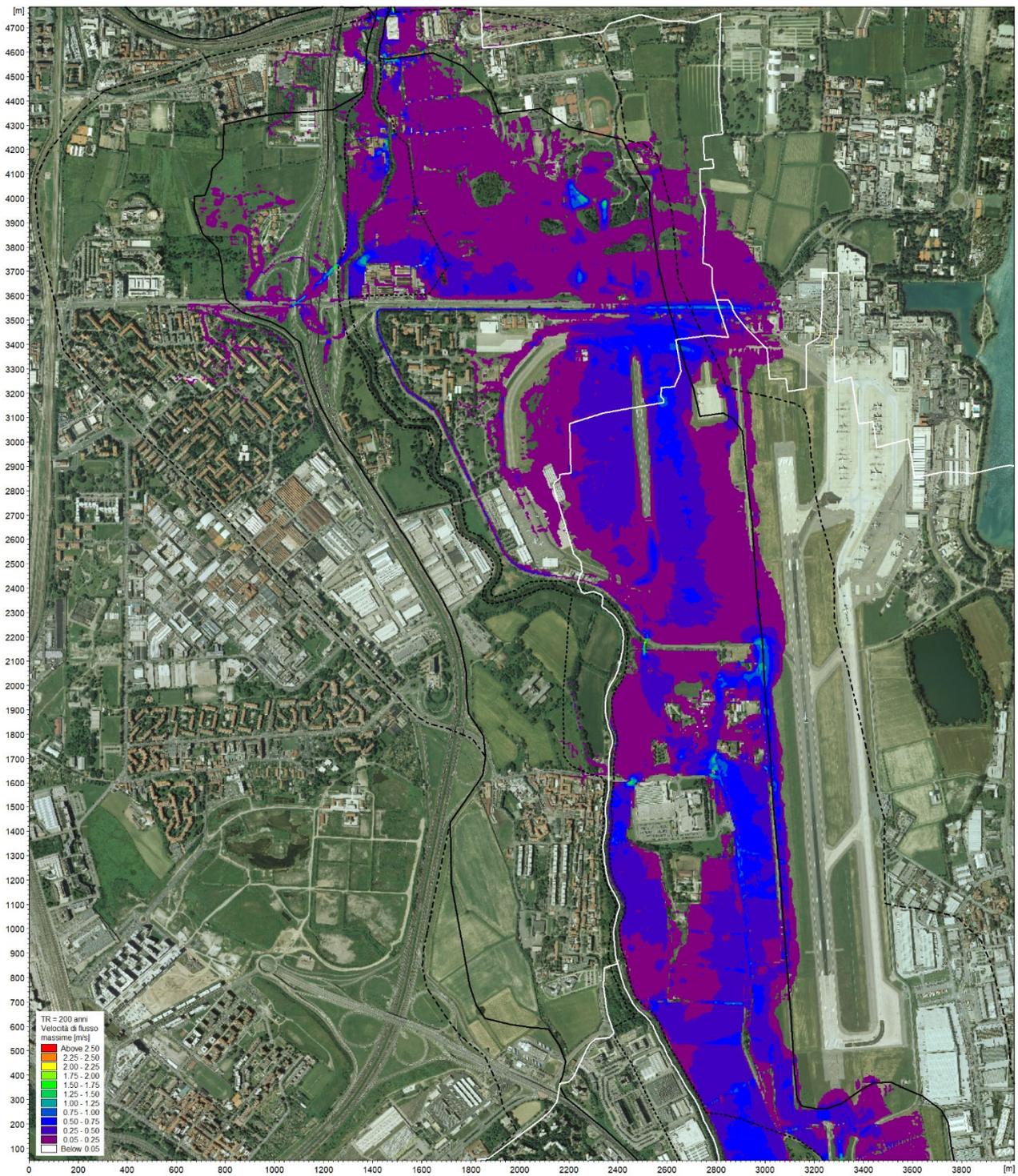


Figura 62 - Stato attuale, TR200: inviluppo delle massime velocità di deflusso.

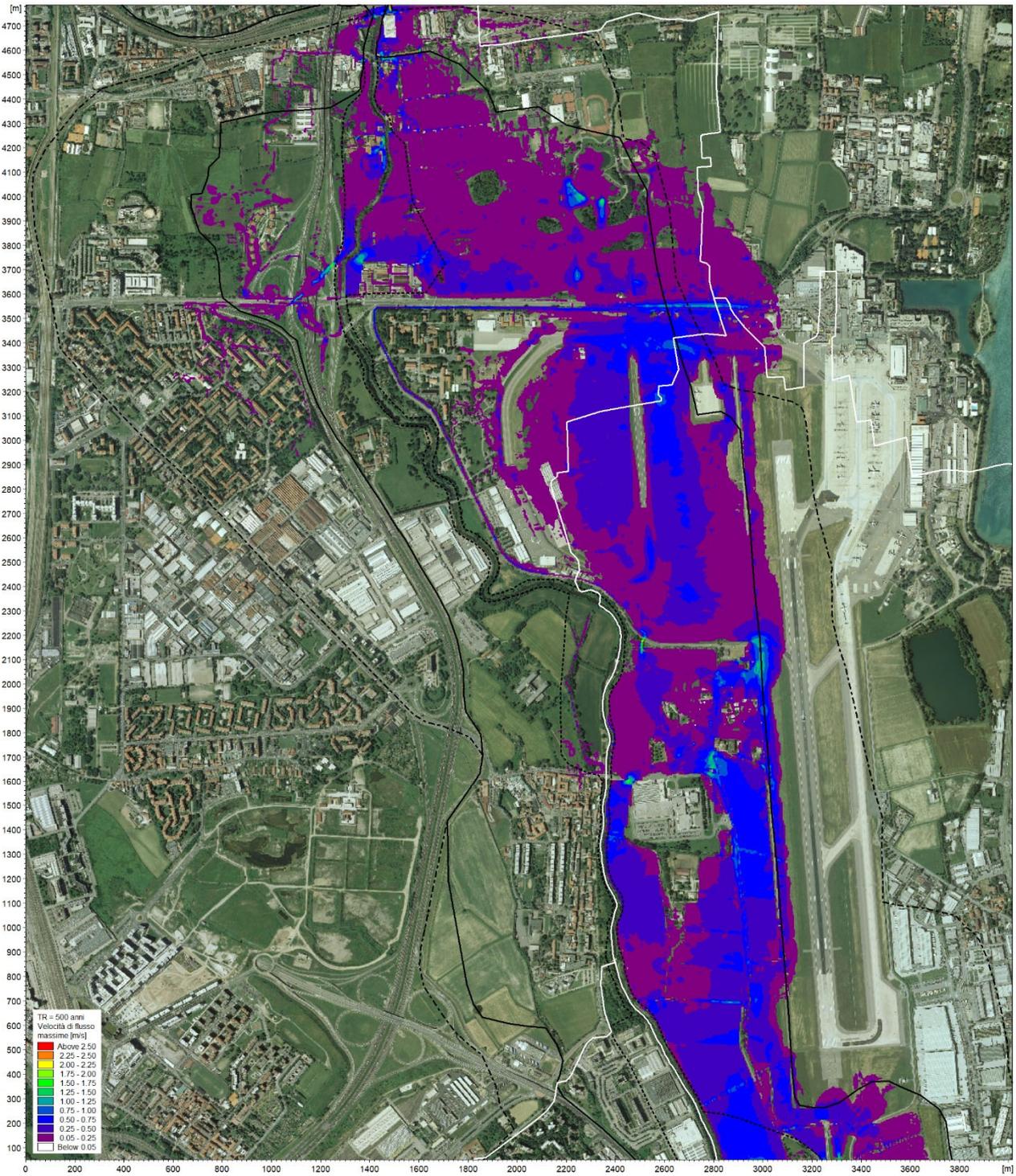


Figura 63 - Stato attuale, TR500: inviluppo delle massime velocità di deflusso.

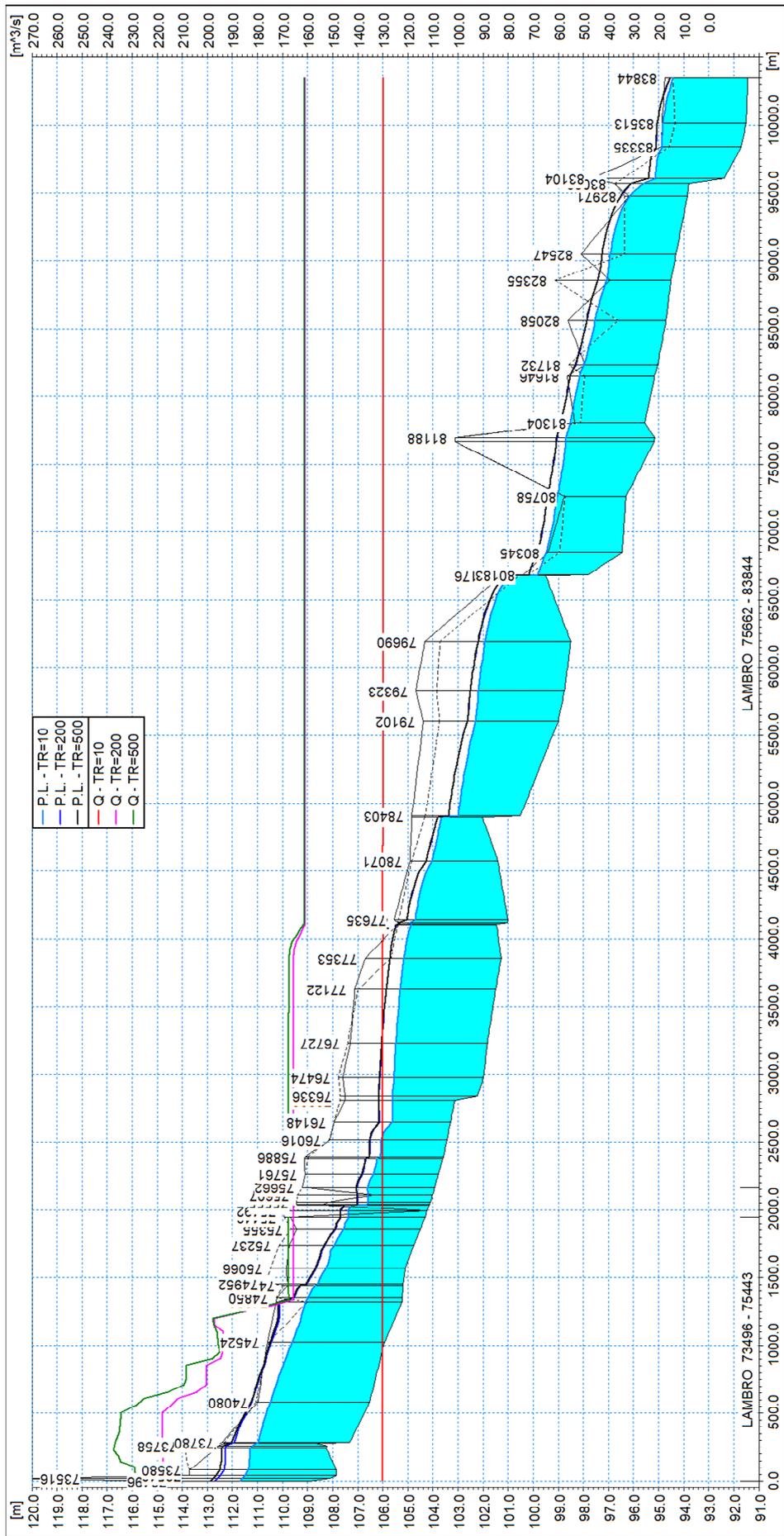


Figura 64 – Profili di corrente lungo l'alveo inciso del Lambro allo stato attuale per assegnati TR.

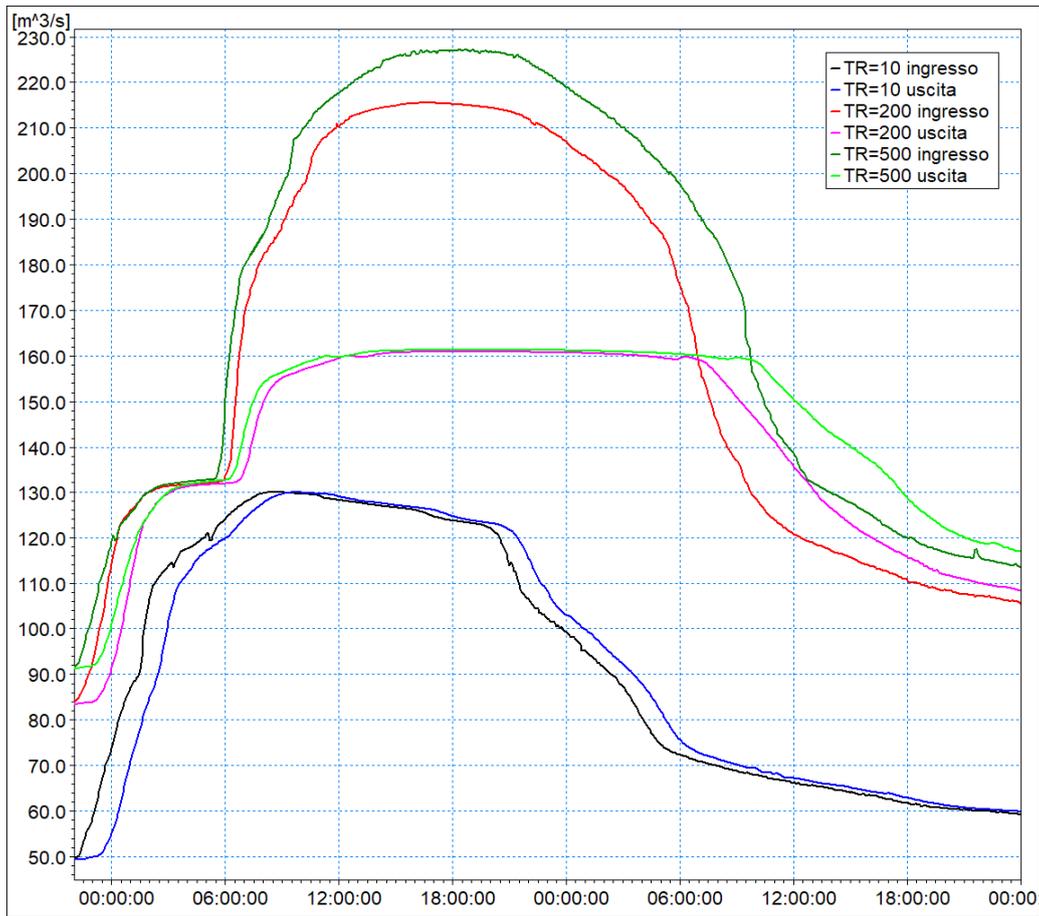


Figura 65 – Confronto tra idrogrammi di piena in ingresso e in uscita dal modello per tempi di ritorno di 10, 200 e 500 anni, nelle condizioni attuali.

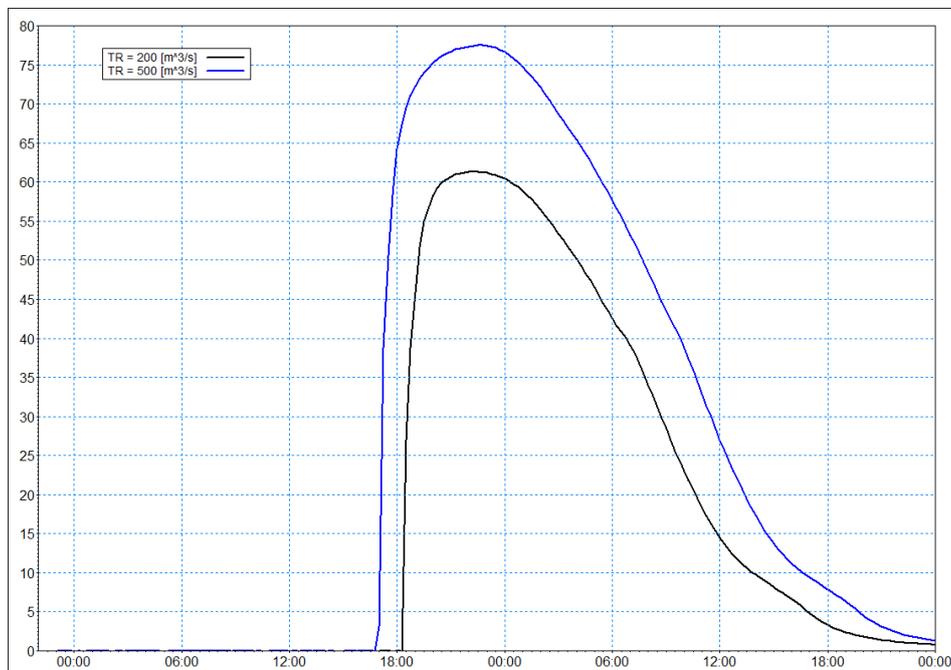


Figura 66 – Idrogrammi di piena in uscita dal modello 2D in sinistra orografica per tempi di ritorno di 200 e 500 anni, nelle condizioni attuali.

5.2 Torrente Seveso

Nella Figura 67 è riportata la distribuzione calcolata con il modello bidimensionale MIKE 21 nella situazione attuale delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena con tempo di ritorno 10 anni: le tonalità blu evidenziano le aree di esondazione con tiranti idrici minori, quelle giallo/rosso le aree con tiranti idrici maggiori e quelle verdi con tiranti idrici intermedi. Le aree interne all'alveo inciso del Seveso non sono rappresentate perché, come detto in precedenza, il loro contributo al deflusso è stato già preso in conto nell'ambito del modello MIKE 11.

Analogamente nella Figura 68 è rappresentata la mappa involuppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per tempo di ritorno 100 anni e nella Figura 69 quella corrispondente al tempo di ritorno 500 anni.

In tutte le figure sono inoltre riportati i confini comunali (linee bianche) e i limiti delle aree con probabilità di alluvioni elevata (linee nere tratteggiate), media (linee nere continue) e scarsa (linee nere a tratto e punto) desunte dal P.G.R.A..

Nella Figura 70 è riportata la distribuzione calcolata con il modello 2D nella situazione attuale delle massime velocità di deflusso verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena con tempo di ritorno 10 anni: le tonalità blu evidenziano le aree con velocità di deflusso basse, quelle giallo/rosso le aree con velocità maggiori.

Analogamente nella Figura 71 è rappresentata la mappa involuppo delle massime velocità di deflusso per tempo di ritorno 100 anni e nella Figura 72 quella corrispondente al tempo di ritorno 500 anni.

Nella Figura 73 è fornita la rappresentazione grafica dei profili di piena di assegnato tempo di ritorno TR, con indicazione della variabilità della portata massima defluente lungo lo sviluppo longitudinale dell'alveo inciso (modello MIKE 11). Si può osservare come al termine del tratto di alveo inciso, ovvero all'imbocco del tratto tombinato, la portata massima defluente varia poco, tra circa 72 e 77 m³/s passando dall'evento con tempo di ritorno di 10 anni a quello di 500 anni.

Nella Figura 74 è rappresentato il profilo longitudinale del tratto tombinato con indicazione dei livelli piezometrici massimi raggiunti nel corso dell'evento con tempo di ritorno 100 anni (modello MIKE URBAN). Non sono stati invece riportati i livelli massimi relativi agli eventi con tempo di ritorno 10 e 500 anni perché poco discosti da quello rappresentato, a causa della scarsa differenza tra i corrispondenti valori massimi di portata defluente come sopra detto.

Nella Figura 75 è rappresentato, per il tempo di ritorno di 100 anni, il confronto tra gli idrogrammi di piena in ingresso al modello MIKE 11, in ingresso al tratto tombinato e in uscita dal tratto tombinato: la portata al colmo di circa 112 m³/s si riduce a circa 76 m³/s a monte del tratto tombinato e a circa 40 m³/s in uscita da quest'ultimo.

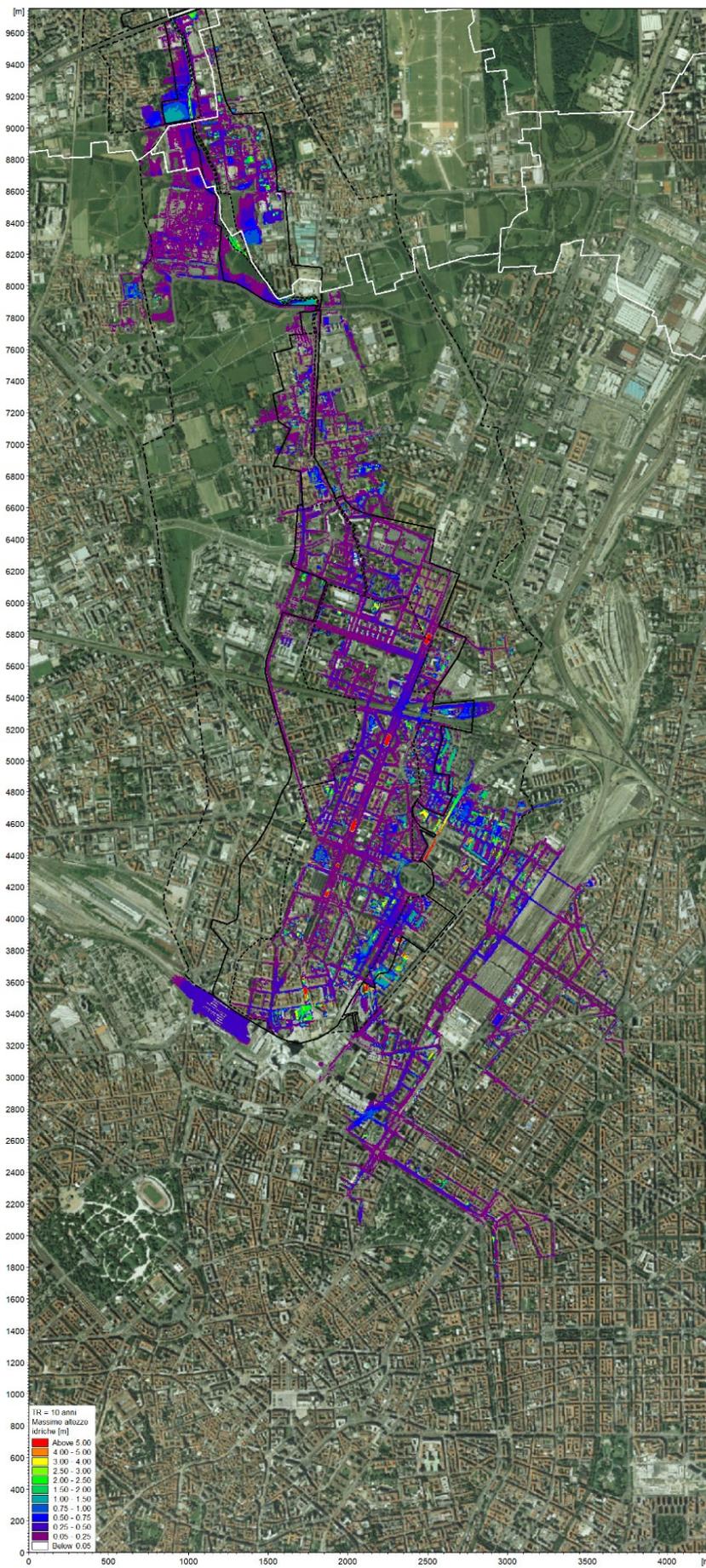


Figura 67 - Stato attuale, TR10: inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

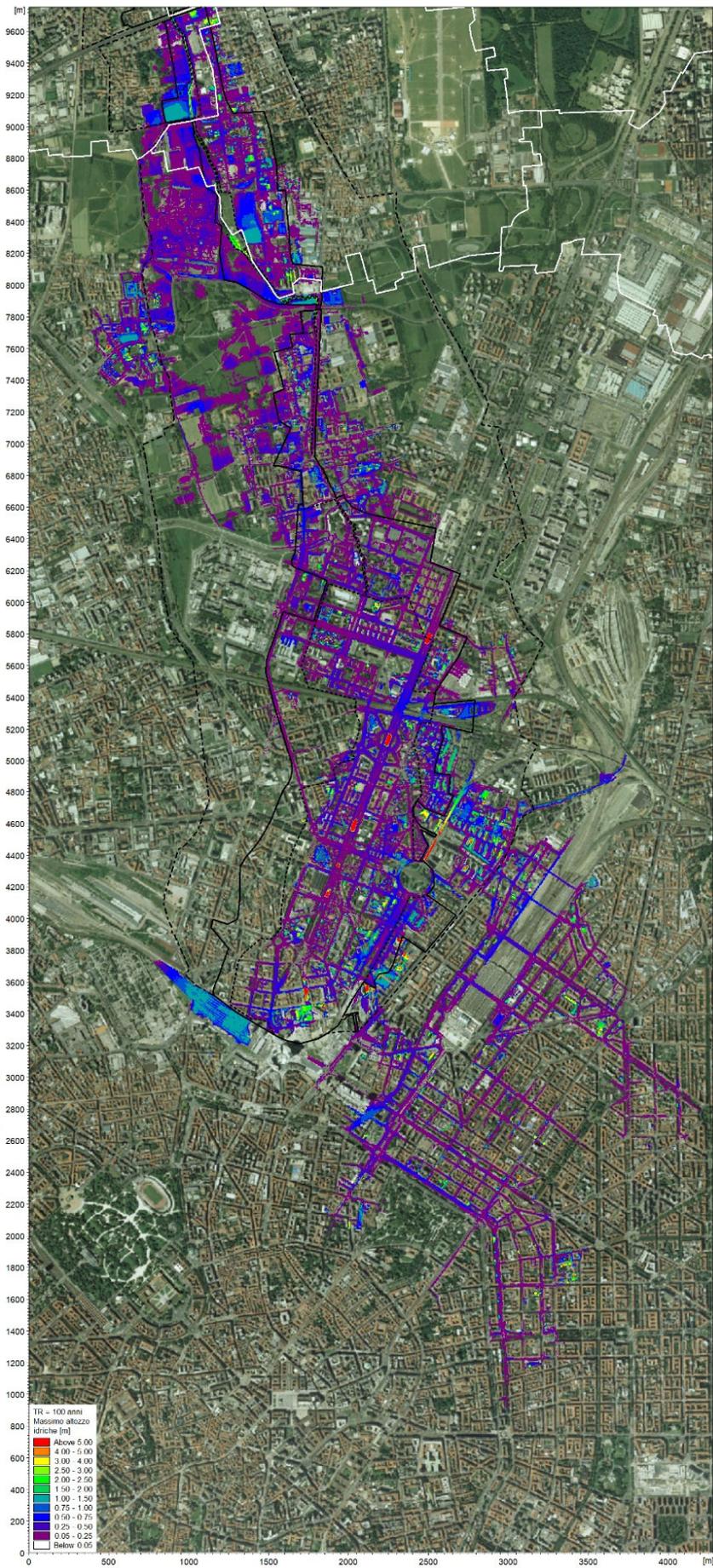


Figura 68 - Stato attuale, TR100: involucro delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

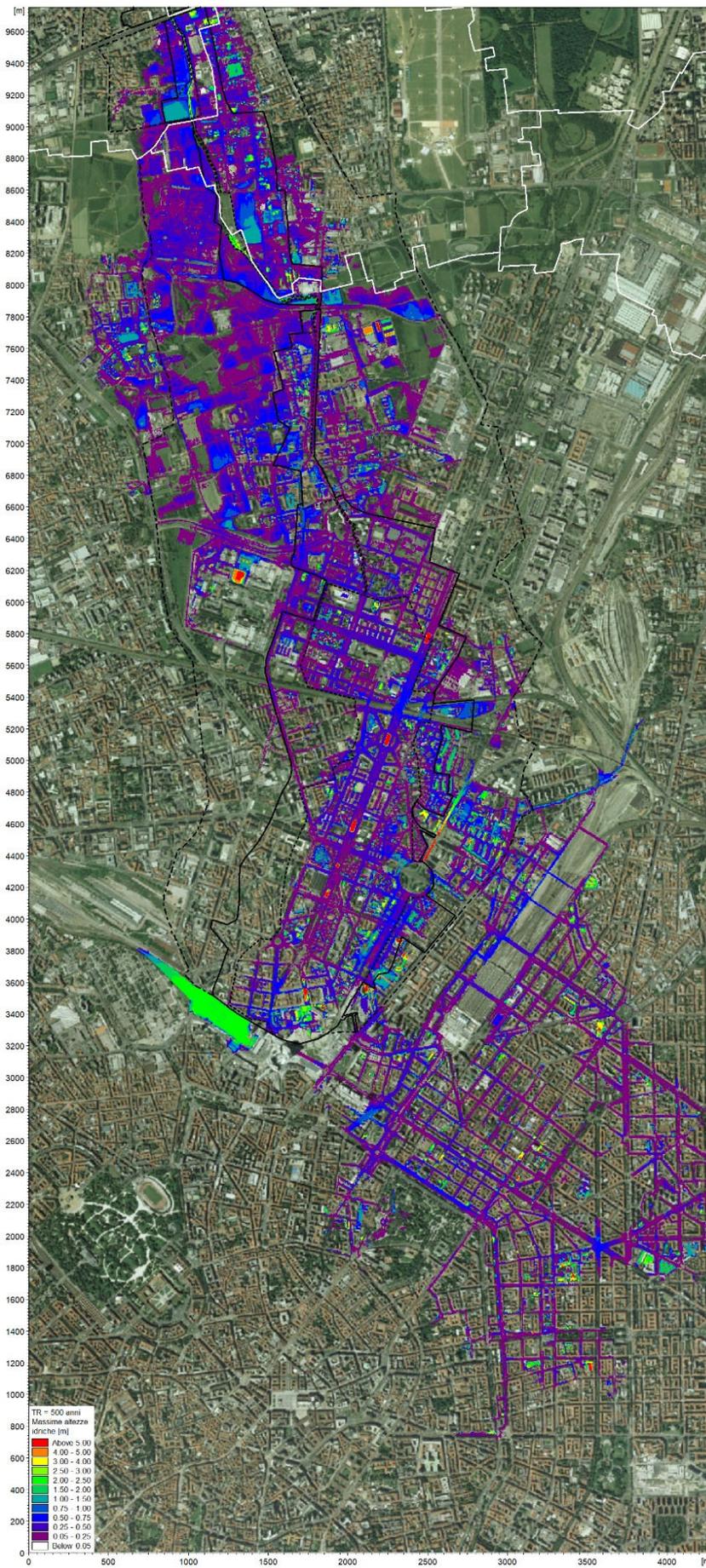


Figura 69 - Stato attuale, TR500: involucro delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

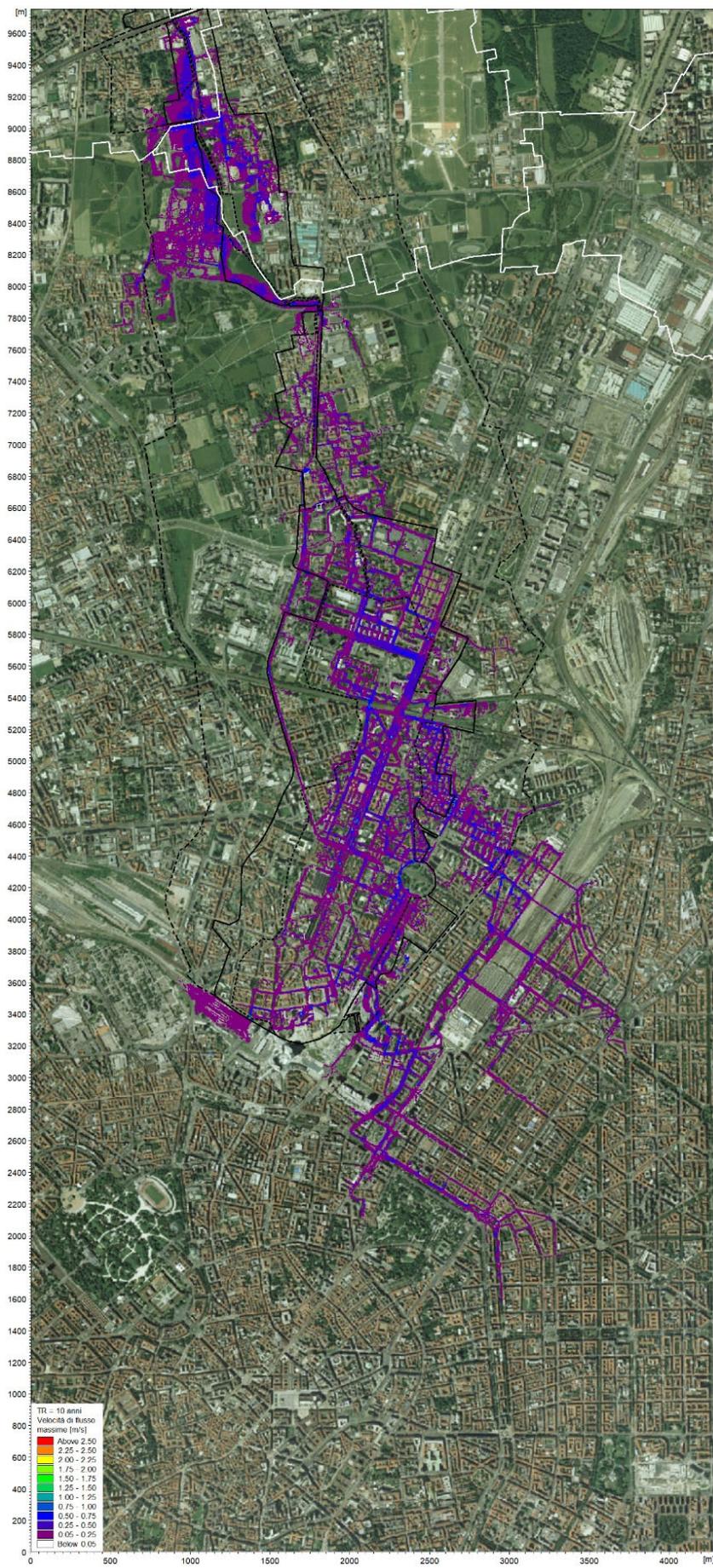


Figura 70 - Stato attuale, TR10: involucro delle massime velocità di deflusso.

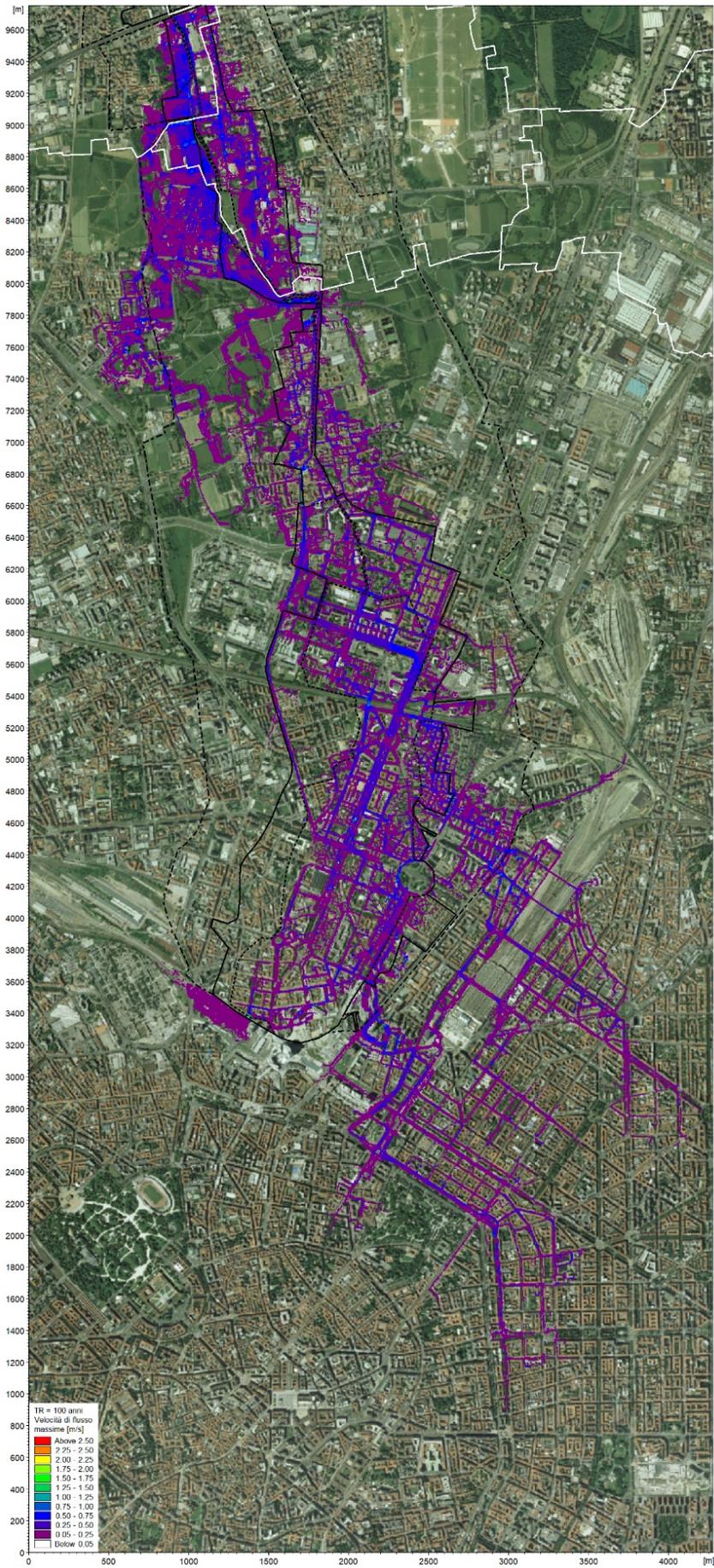


Figura 71 - Stato attuale, TR100: involucro delle massime velocità di deflusso.

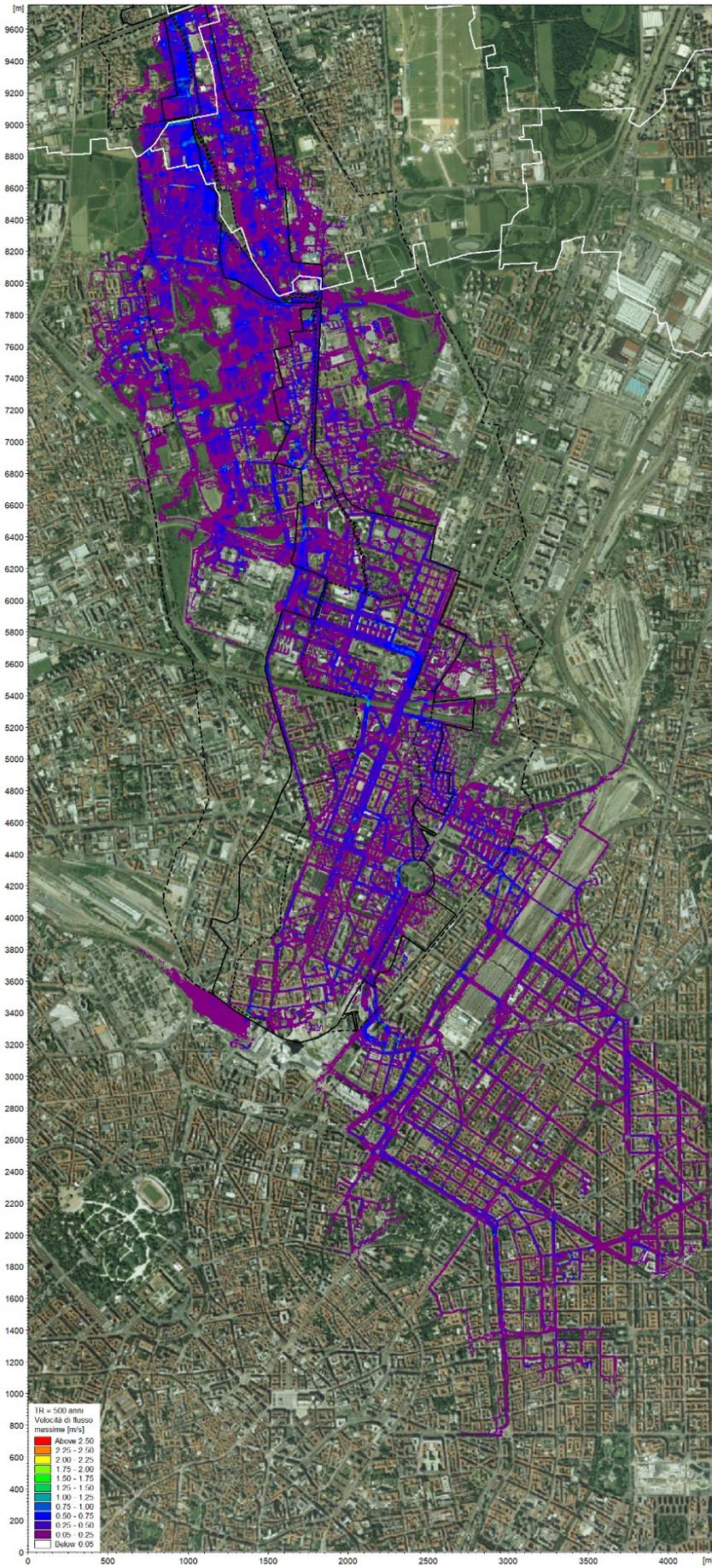


Figura 72 - Stato attuale, TR500: inviluppo delle massime velocità di deflusso.

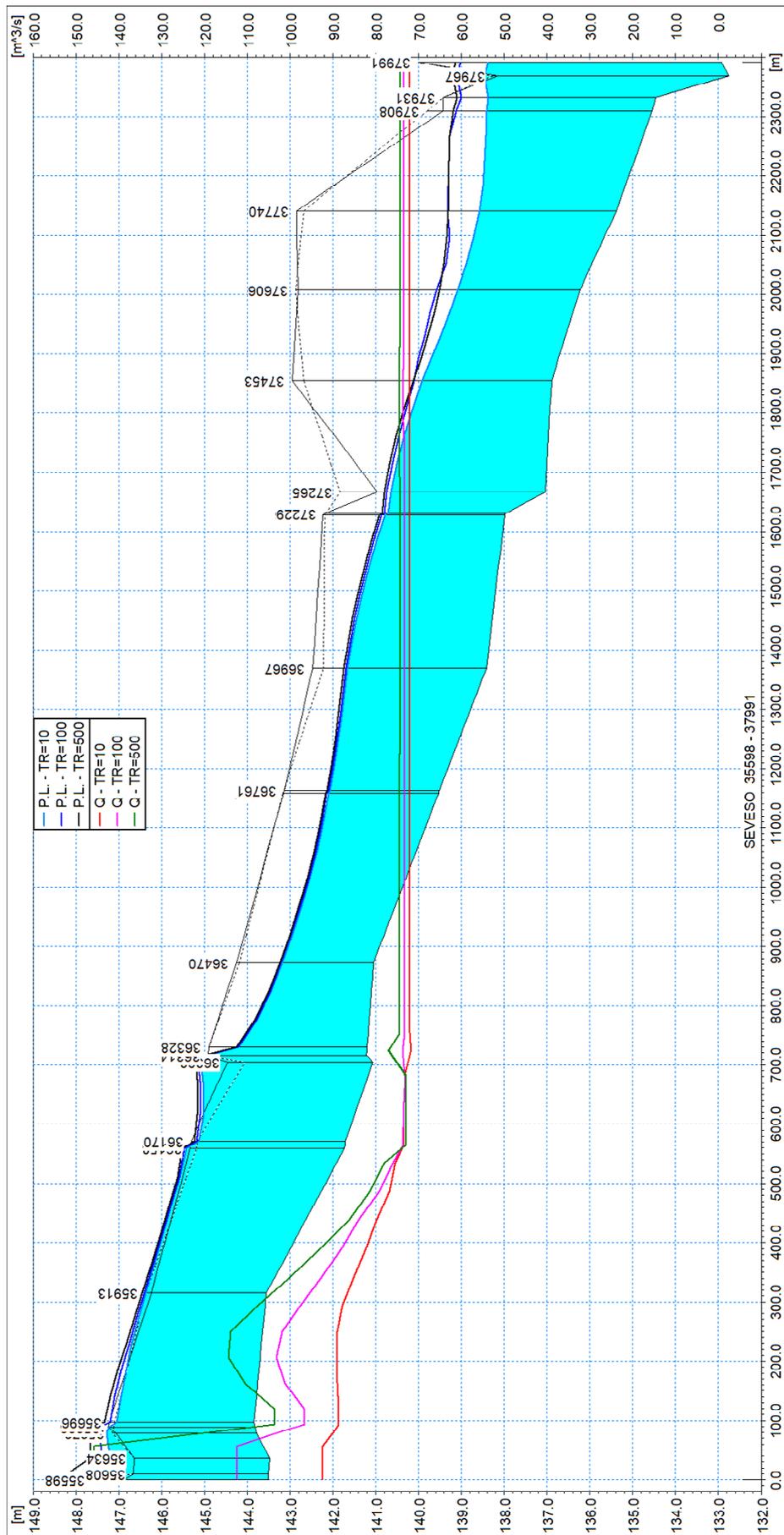


Figura 73 – Profili di corrente lungo l'alveo inciso del Seveso allo stato attuale per assegnati TR.

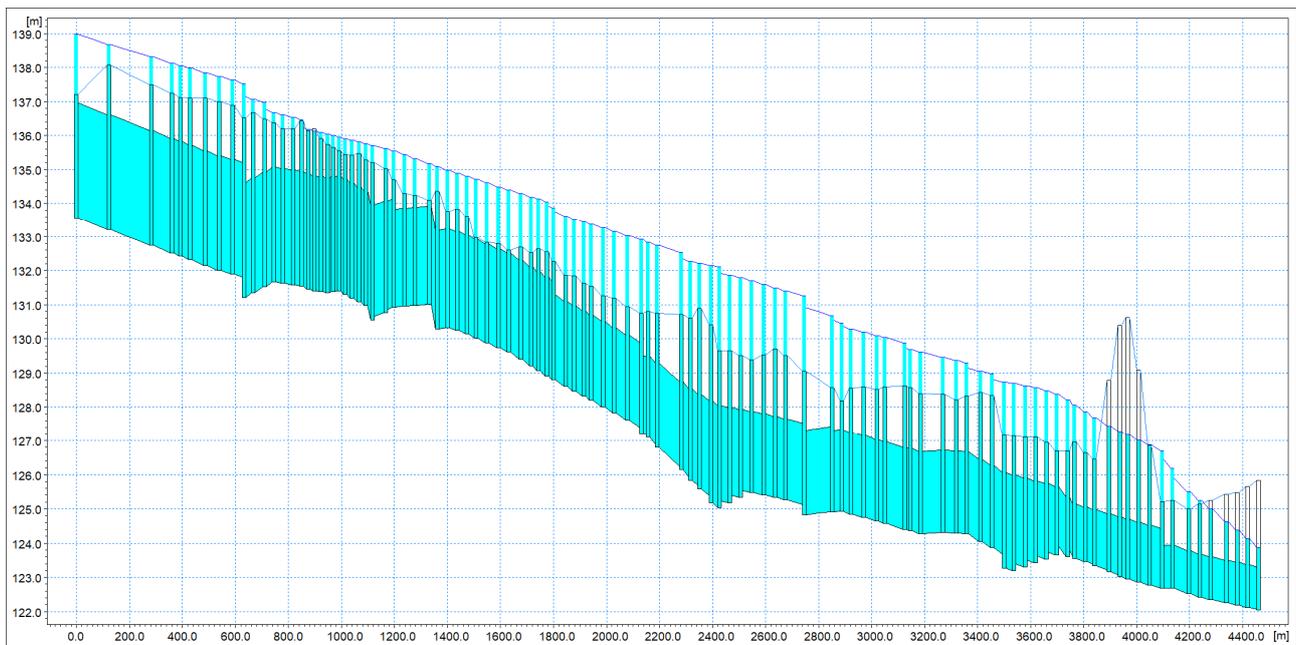


Figura 74 – Profilo longitudinale del tratto tombinato del Seveso (con presenza di sedimento sul fondo) con andamento dei livelli piezometrici massimi per tempo di ritorno 100 anni.

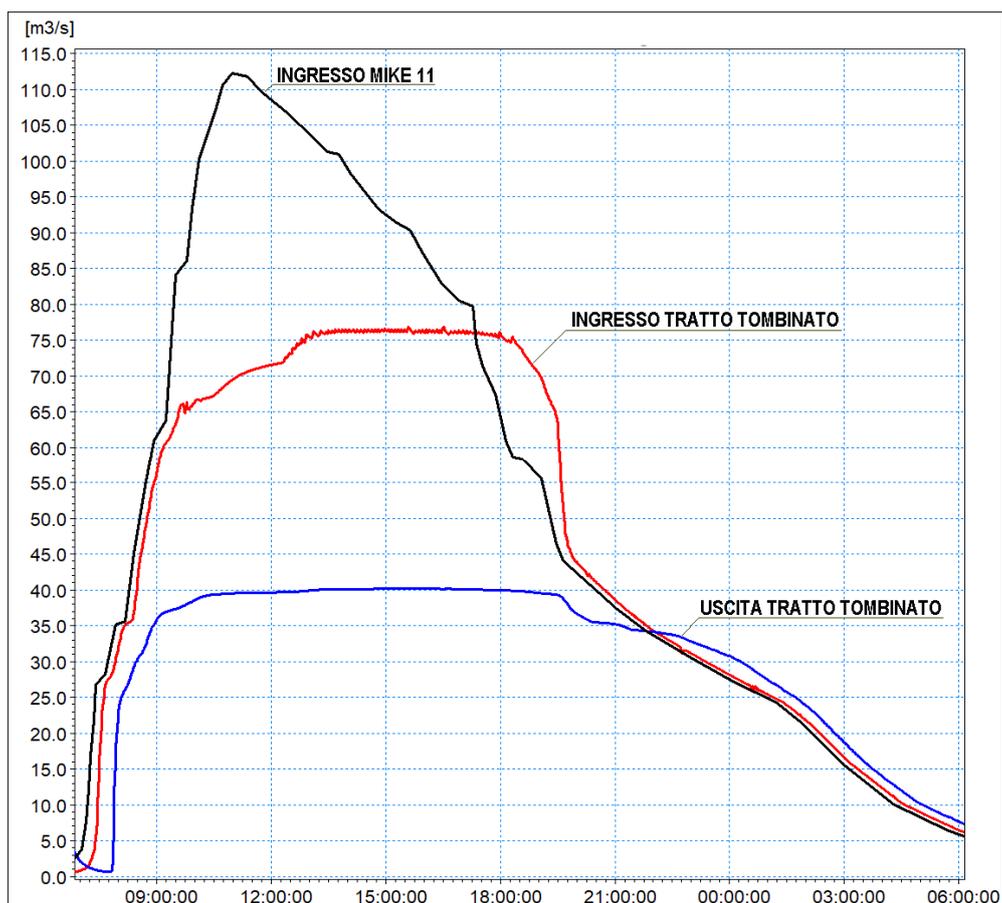


Figura 75 – Confronto tra gli idrogrammi di piena in ingresso al modello MIKE 11, in ingresso al tratto tombinato e in uscita dal tratto tombinato per tempo di ritorno di 100 anni, nelle condizioni attuali.

5.3 Torrente Guisa

Come già detto in precedenza, per effetto degli interventi realizzati nell'area EXPO, il torrente Guisa non induce allagamenti a valle di tale area e pertanto non si è resa necessaria la messa a punto di un modello 2D. Vengono pertanto presentati i risultati ottenuti con i due modelli monodimensionali: MIKE 11 per il breve tratto di alveo naturale a valle dell'area EXPO e MIKE URBAN per il tratto più esteso a valle di quest'ultimo fino alla confluenza nel tratto tombinato dell'Olona.

Nella Figura 76 sono riportati i profili di piena di assegnato tempo di ritorno TR, con indicazione della variabilità della portata massima defluente lungo lo sviluppo longitudinale del breve tratto di alveo inciso (modello MIKE 11) compreso tra l'area EXPO e l'inizio del tratto tombinato. Si può osservare come i profili di corrente siano ampiamente contenuti nell'alveo inciso, con franchi di sicurezza compresi mediamente tra 1,5 e 2,0 m.

Nella Figura 77 sono rappresentati, sul profilo longitudinale del tratto tombinato, gli andamenti dei livelli piezometrici massimi raggiunti nel corso degli eventi con tempo di ritorno di 10, 100 e 500 anni (modello MIKE URBAN). Per 10 e 100 anni di tempo di ritorno le condizioni di moto sono a pelo libero, mentre per tempo di ritorno 500 anni il deflusso avviene in pressione nei primi 2/3 del collettore, ma non si verificano fuoriuscite di portata dai pozzetti di ispezione.

Infine nella Figura 78 è rappresentato il profilo longitudinale del tratto tombinato dell'Olona con l'andamento dei livelli piezometrici massimi determinato per il tempo di ritorno di 500 anni: le condizioni di deflusso sono a pelo libero.

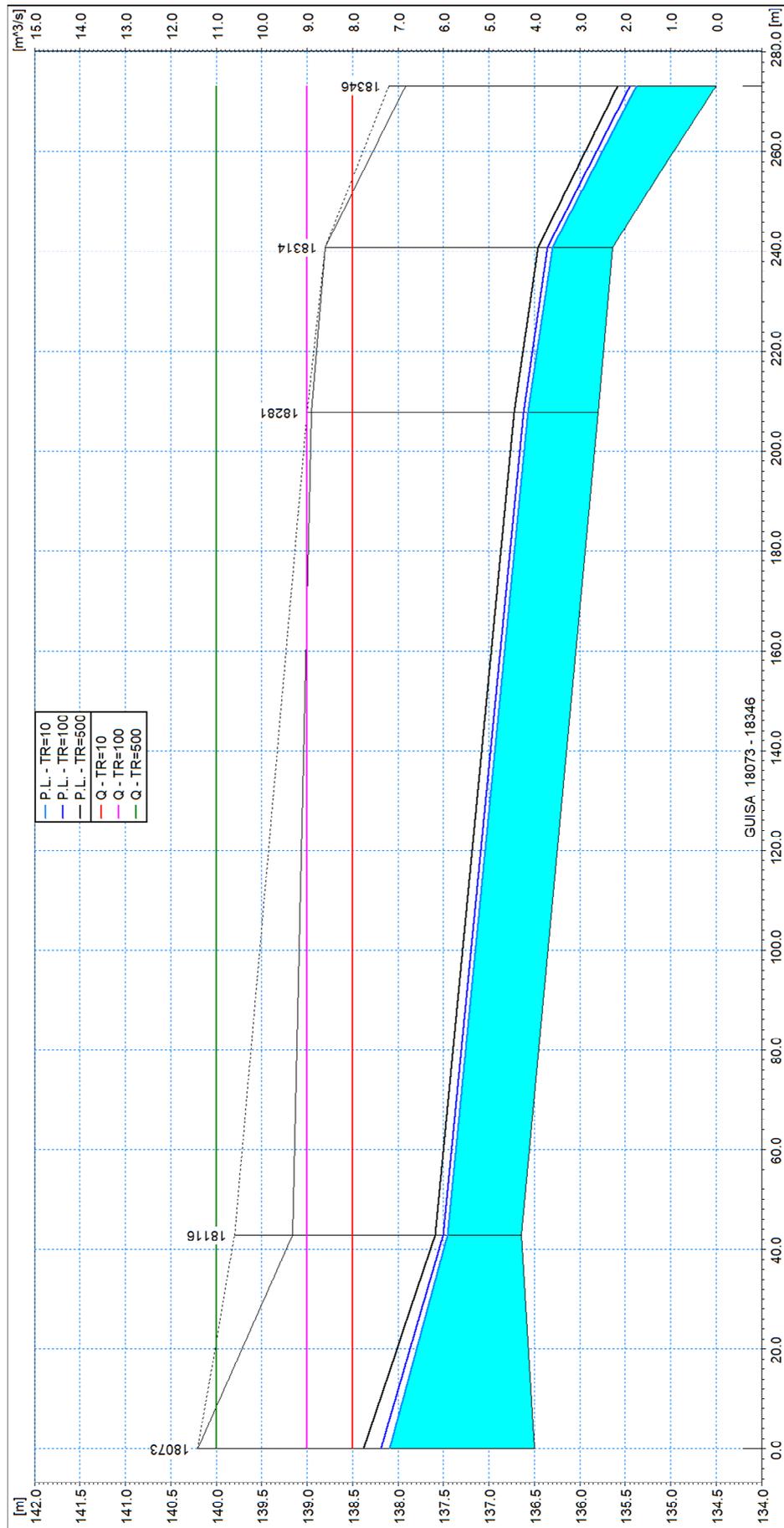


Figura 76 – Profili di corrente lungo l'alveo inciso del Guisa allo stato attuale per assegnati TR.

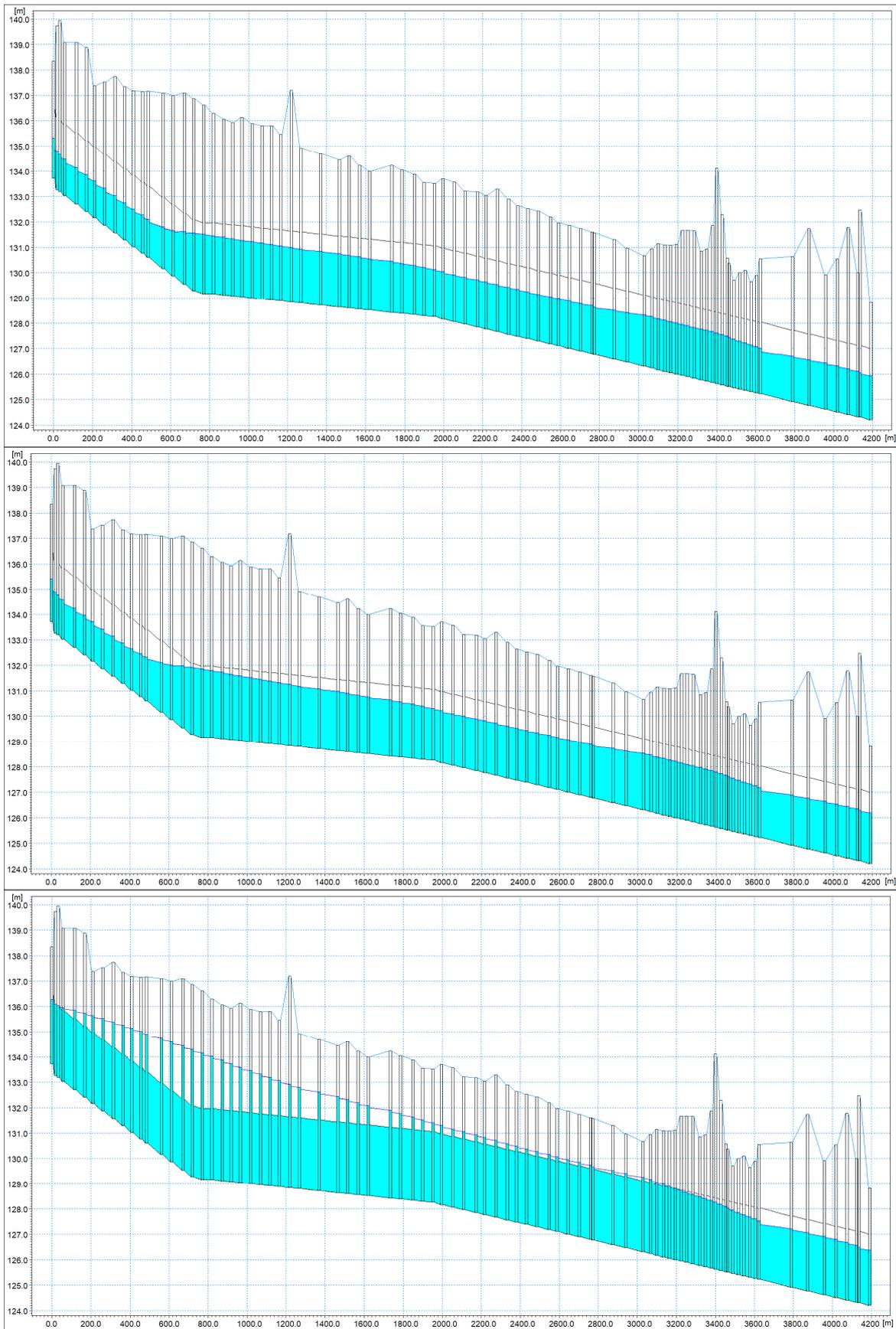


Figura 77 – Profilo longitudinale del tratto tombinato del Guisa con andamento dei livelli piezometrici massimi per tempo di ritorno di 10, 100 e 500 anni.

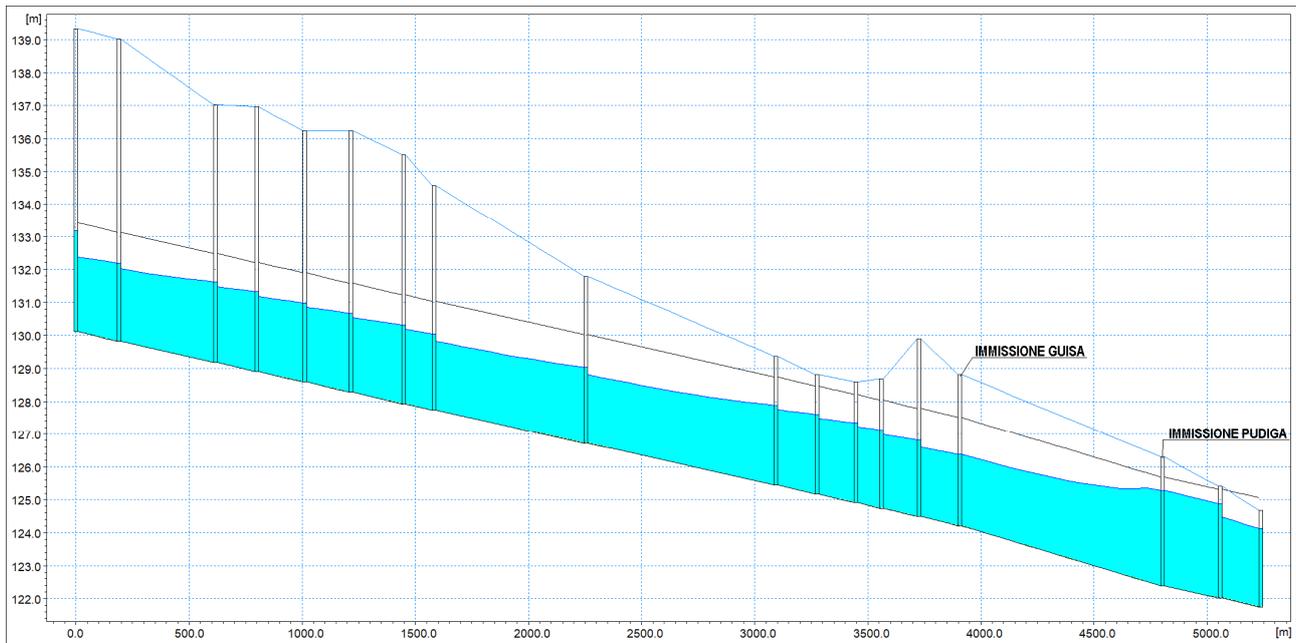


Figura 78 – Profilo longitudinale del tratto tombinato dell'Olonza con andamento dei livelli piezometrici massimi per tempo di ritorno di 500 anni.

5.4 Torrente Pudiga

Nella Figura 79 è riportata la distribuzione calcolata con il modello bidimensionale MIKE 21 nella situazione attuale delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena con tempo di ritorno 10 anni: le tonalità blu evidenziano le aree di esondazione con tiranti idrici minori, quelle giallo/rosso le aree con tiranti idrici maggiori e quelle verdi con tiranti idrici intermedi. Le aree interne all'alveo inciso del Pudiga non sono rappresentate perché il loro contributo al deflusso è stato già preso in conto nell'ambito del modello MIKE 11.

Analogamente nella Figura 80 è rappresentata la mappa involuppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per tempo di ritorno 100 anni e nella Figura 81 quella corrispondente al tempo di ritorno 500 anni.

In tutte le figure sono inoltre riportati i confini comunali (linee bianche) e i limiti delle aree con probabilità di alluvioni elevata (linee nere tratteggiate), media (linee nere continue) e scarsa (linee nere a tratto e punto) desunte dal P.G.R.A..

Nella Figura 82 è riportata la distribuzione calcolata con il modello 2D nella situazione attuale delle massime velocità di deflusso verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena con tempo di ritorno 10 anni: le tonalità blu evidenziano le aree con velocità di deflusso basse, quelle giallo/rosso le aree con velocità maggiori.

Analogamente nella Figura 83 è rappresentata la mappa involuppo delle massime velocità di deflusso per tempo di ritorno 100 anni e nella Figura 84 quella corrispondente al tempo di ritorno 500 anni.

Nella Figura 85 è fornita la rappresentazione grafica dei profili di piena di assegnato tempo di ritorno TR, con indicazione della variabilità della portata massima defluente lungo lo sviluppo longitudinale dell'alveo inciso (modello MIKE 11). Si può osservare come al termine del tratto di alveo inciso, ovvero all'imbocco del tratto tombinato, la portata massima defluente varia poco, tra circa 12 e 13 m³/s passando dall'evento con tempo di ritorno di 10 anni a quello di 500 anni

Nella Figura 86 è rappresentato il profilo longitudinale del tratto tombinato con indicazione dei livelli piezometrici massimi raggiunti nel corso dell'evento con tempo di ritorno 100 anni (modello MIKE URBAN). Non sono stati invece riportati i livelli massimi relativi agli eventi con tempo di ritorno 10 e 500 anni perché poco discosti da quello rappresentato, a causa della scarsa differenza tra i corrispondenti valori massimi di portata defluente come sopra detto. Le condizioni di moto sono prevalentemente a pelo libero; solo all'imbocco e nel tratto finale il deflusso avviene localmente in pressione, senza tuttavia comportare rischi di fuoriuscite dai pozzetti.

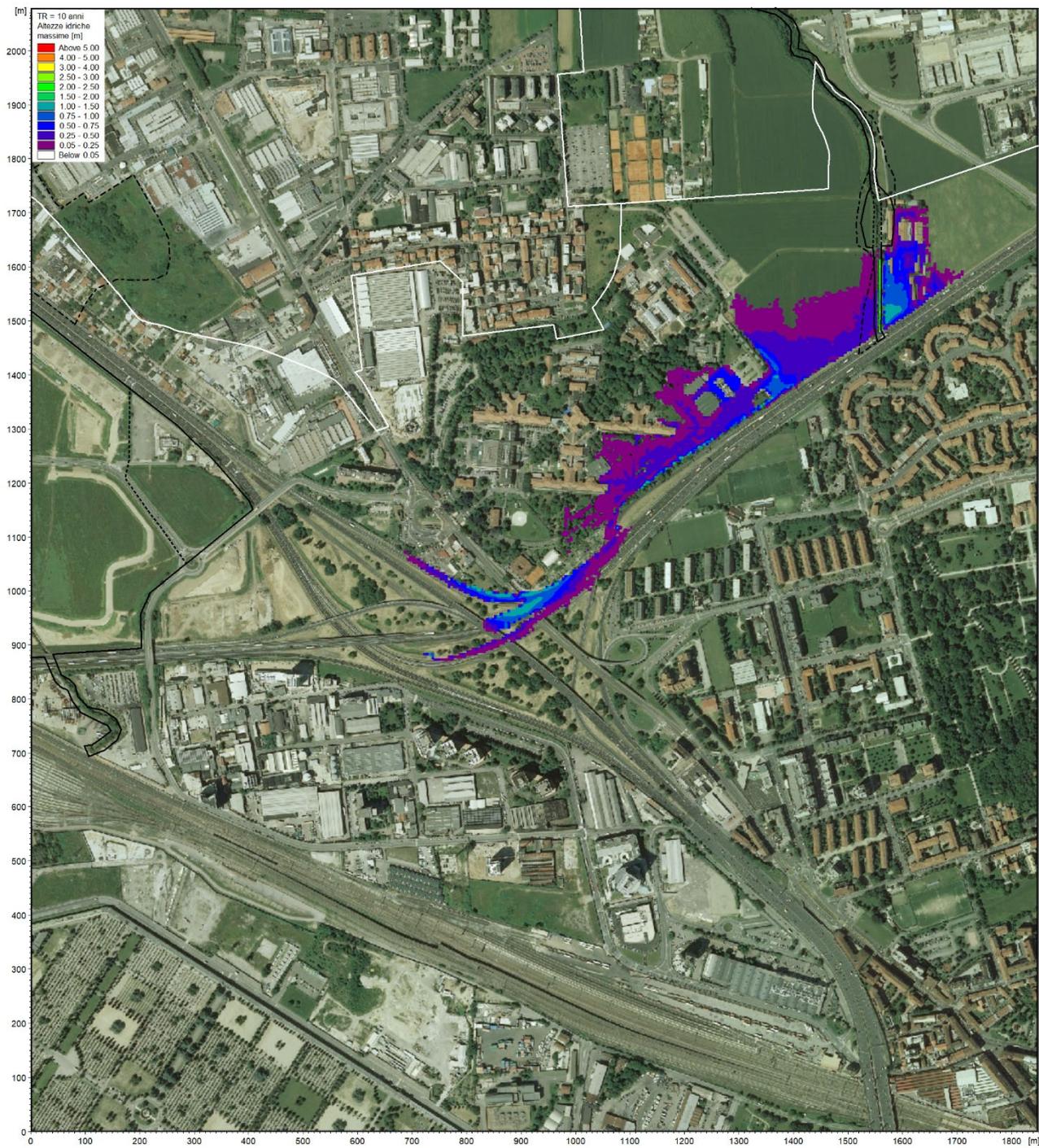


Figura 79 - Stato attuale, TR10: inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

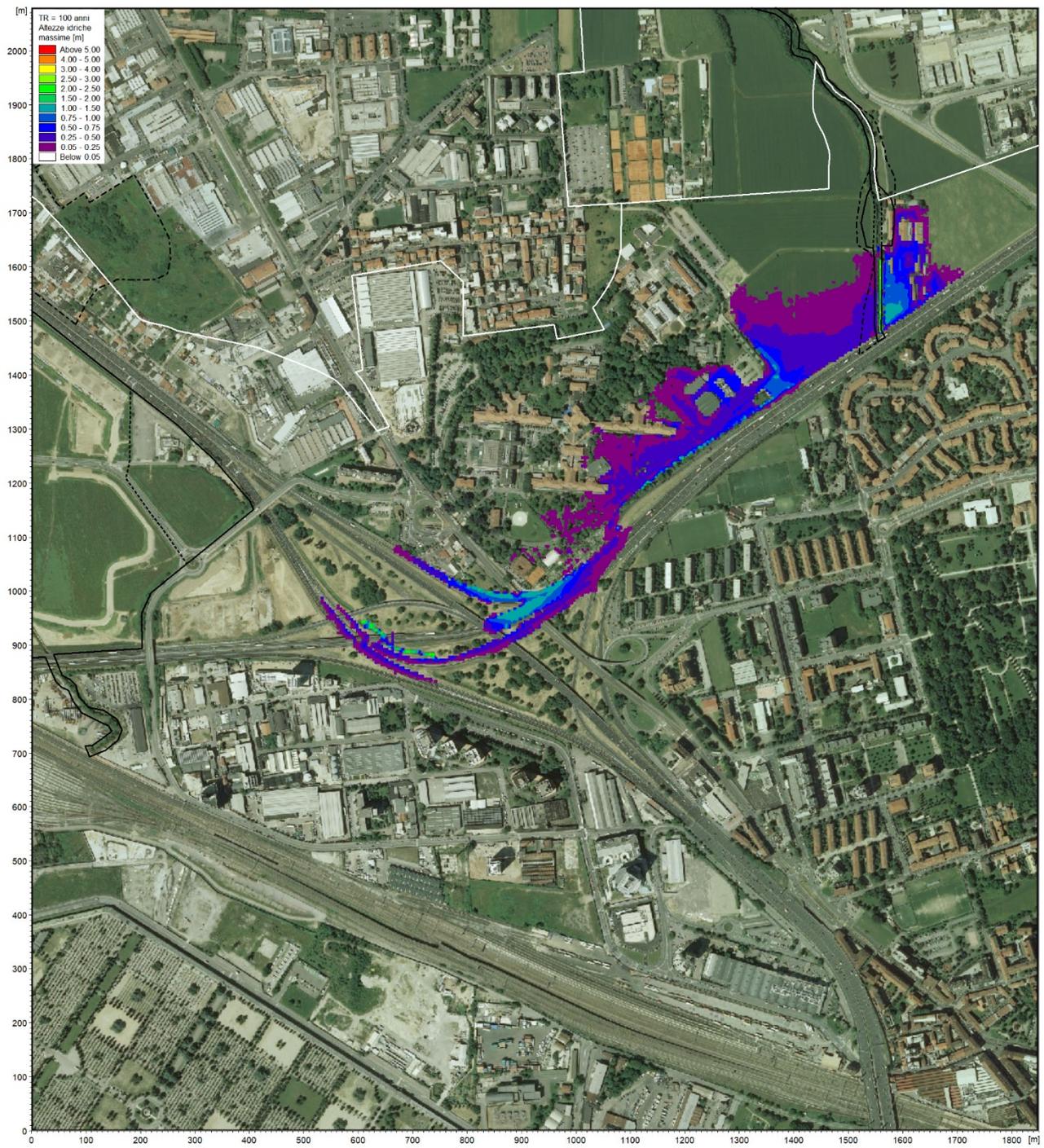


Figura 80 - Stato attuale, TR100: inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

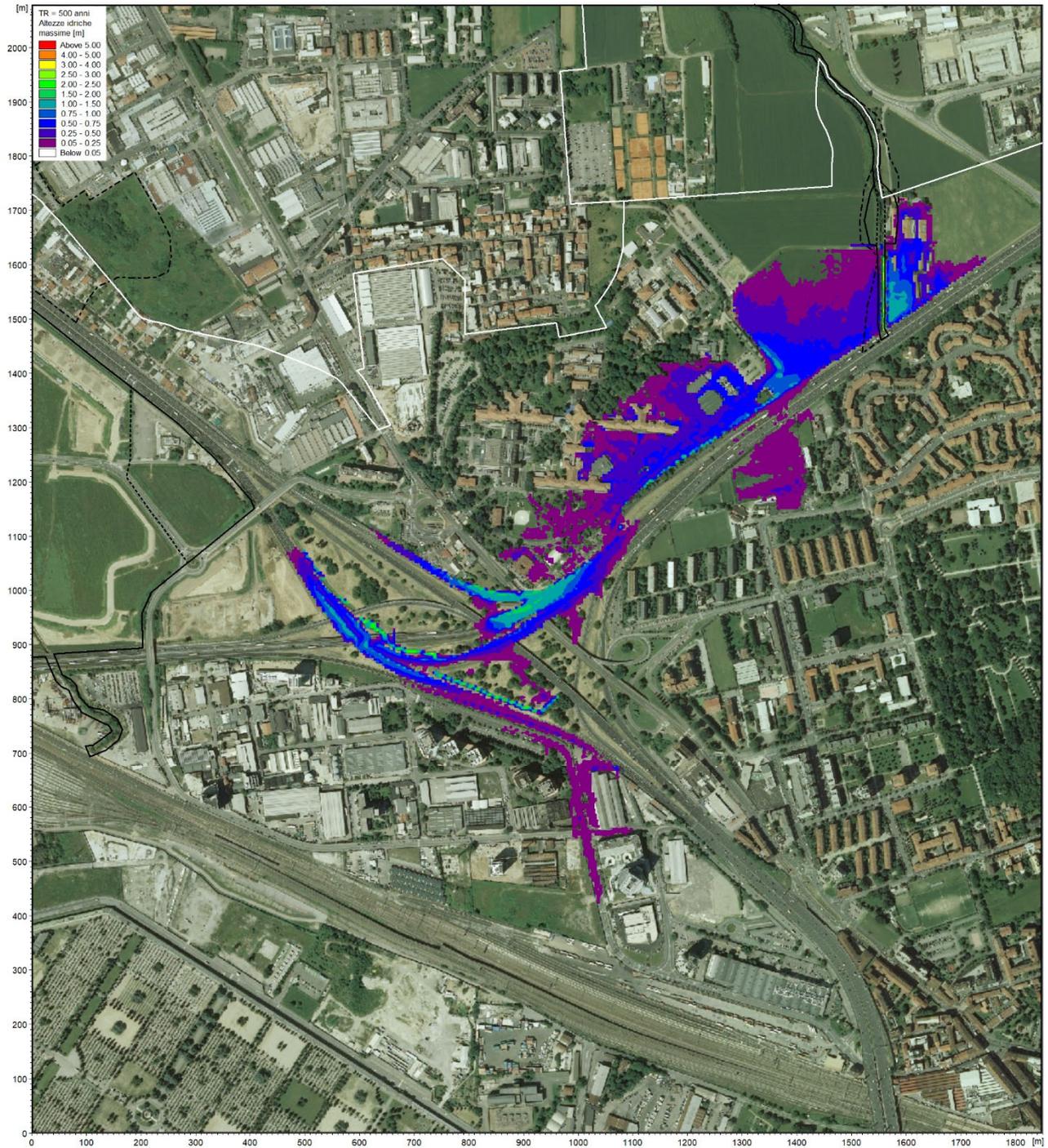


Figura 81 - Stato attuale, TR500: involuppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

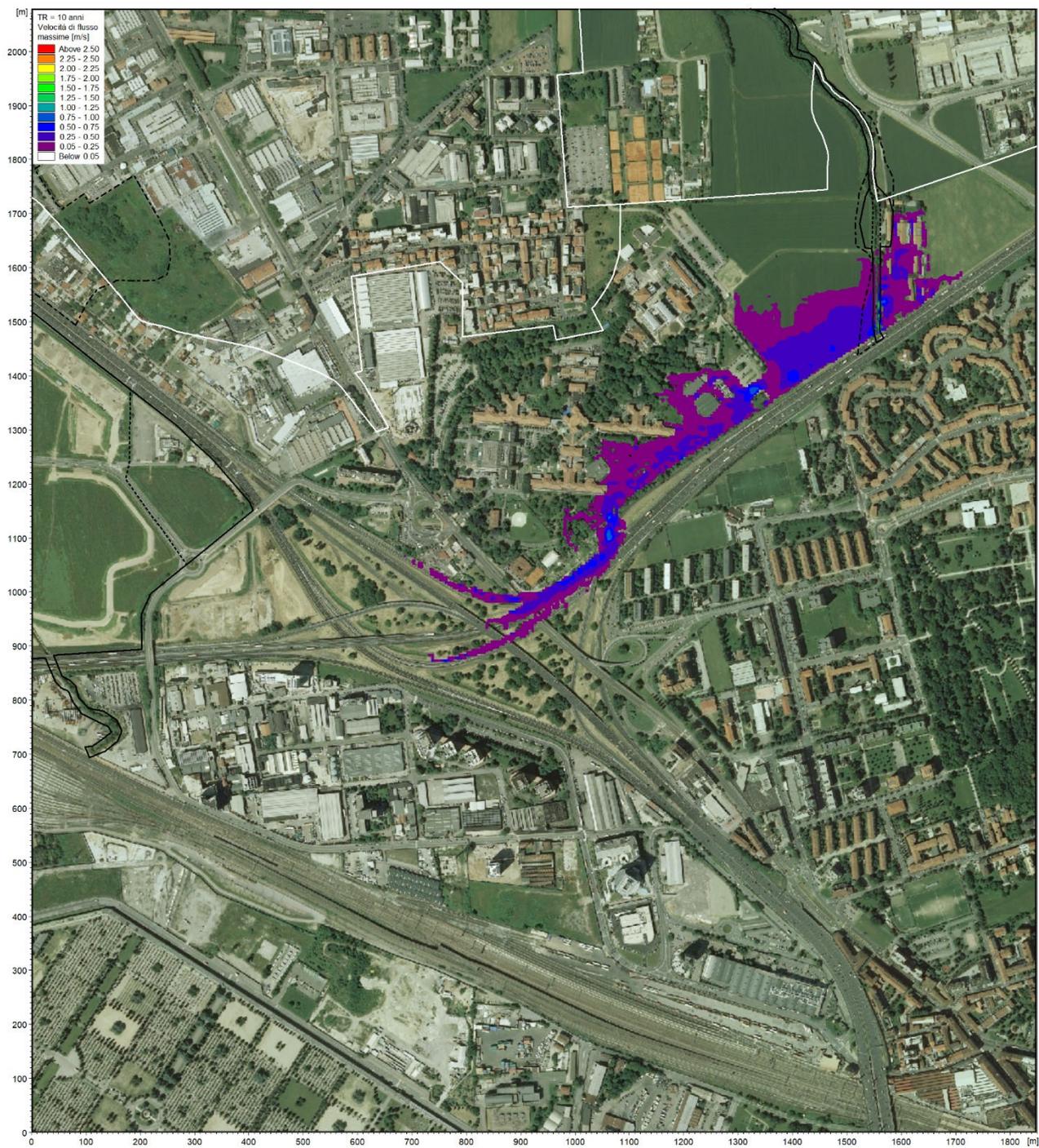


Figura 82 - Stato attuale, TR10: inviluppo delle massime velocità di deflusso.

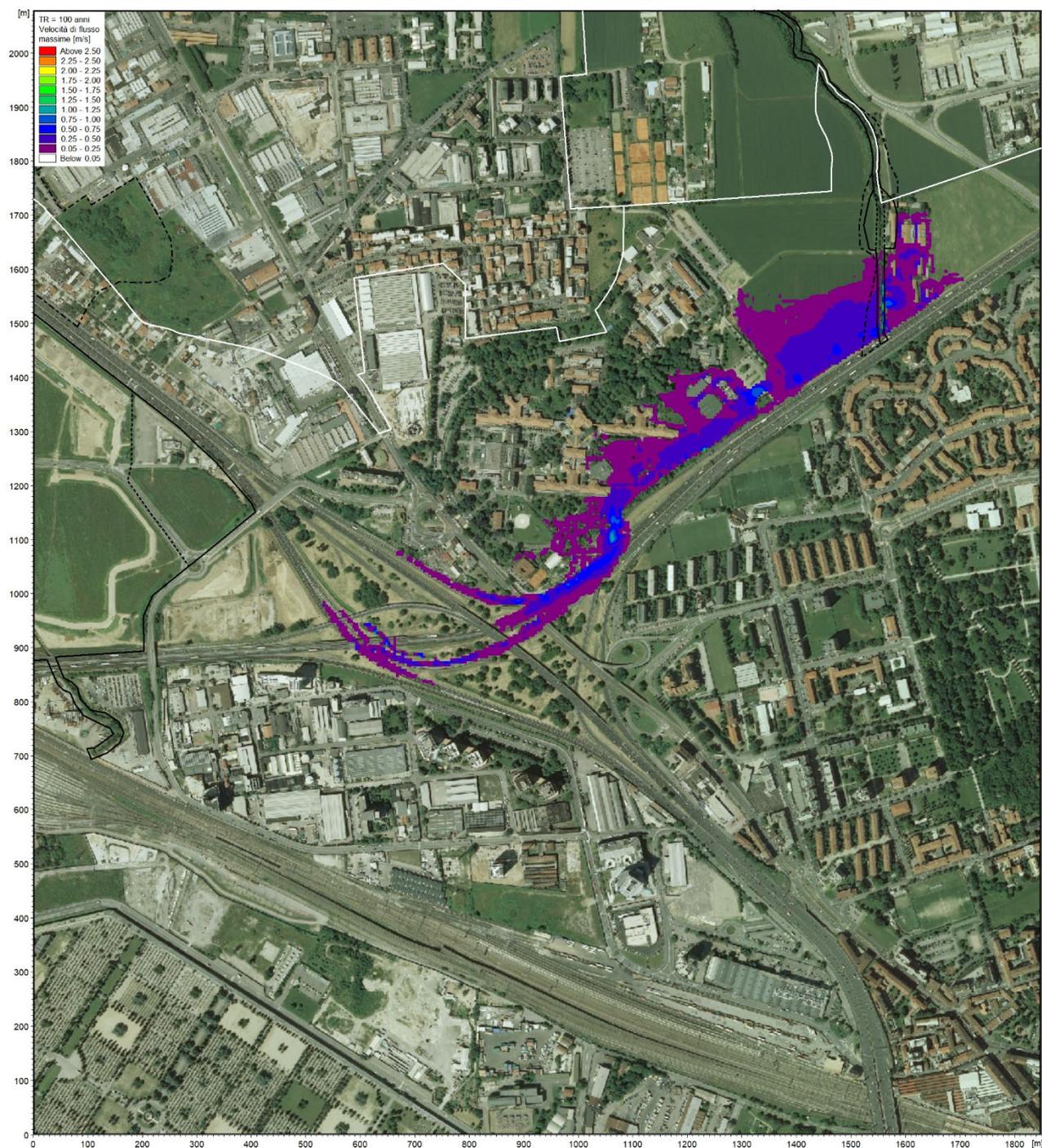


Figura 83 - Stato attuale, TR100: inviluppo delle massime velocità di deflusso.

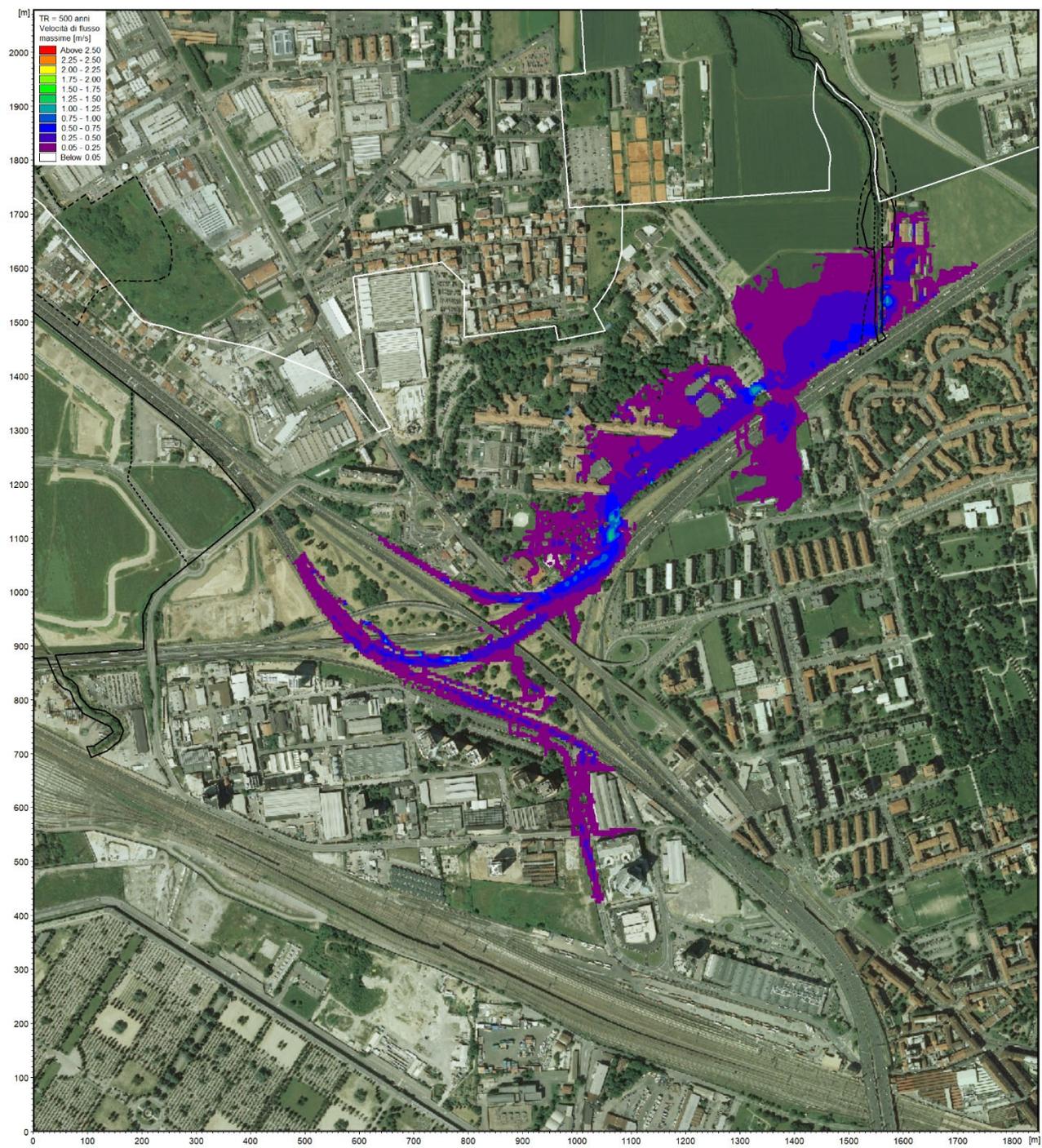


Figura 84 - Stato attuale, TR500: inviluppo delle massime velocità di deflusso.

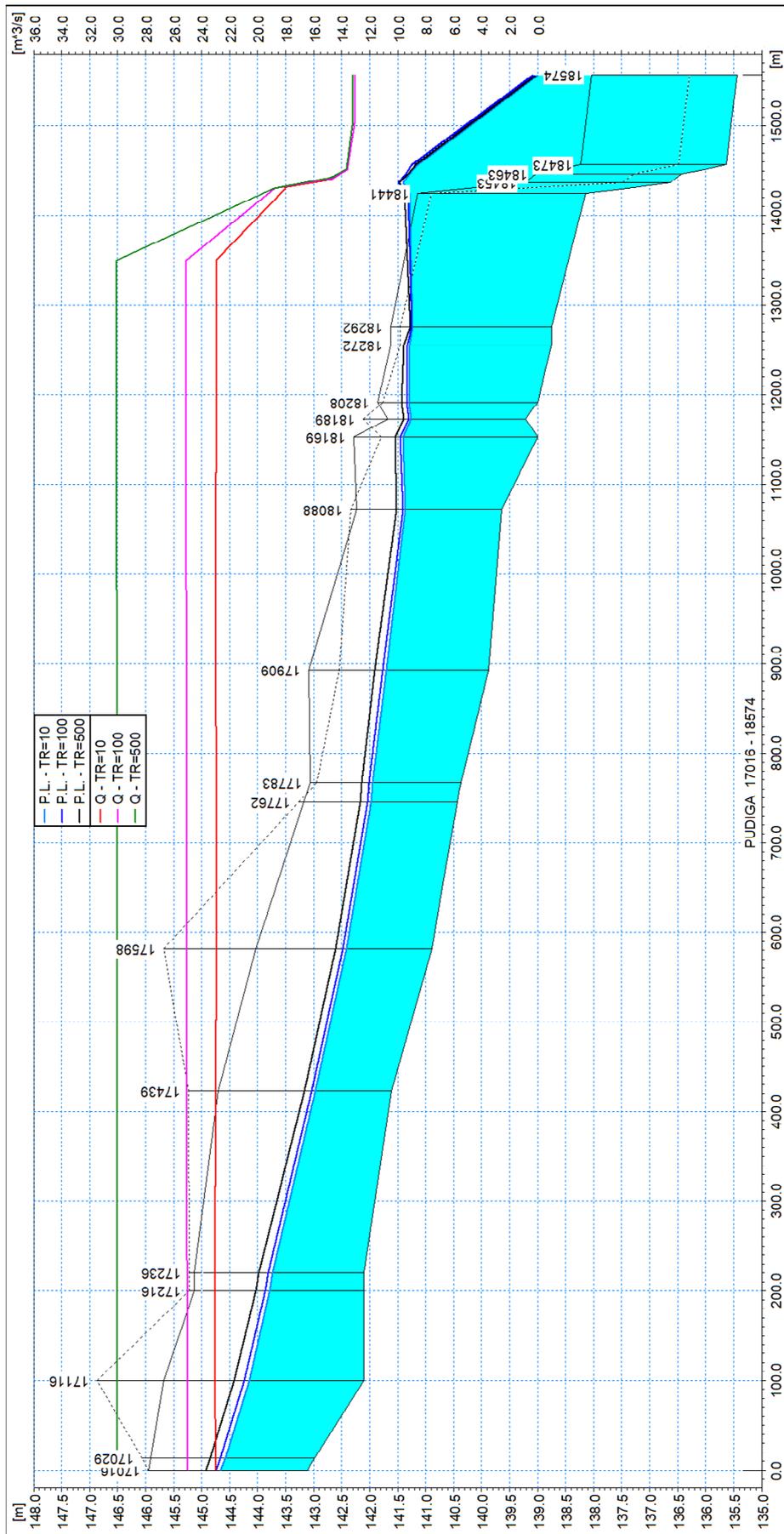


Figura 85 – Profili di corrente lungo l'alveo inciso del Pudiga allo stato attuale per assegnati TR.

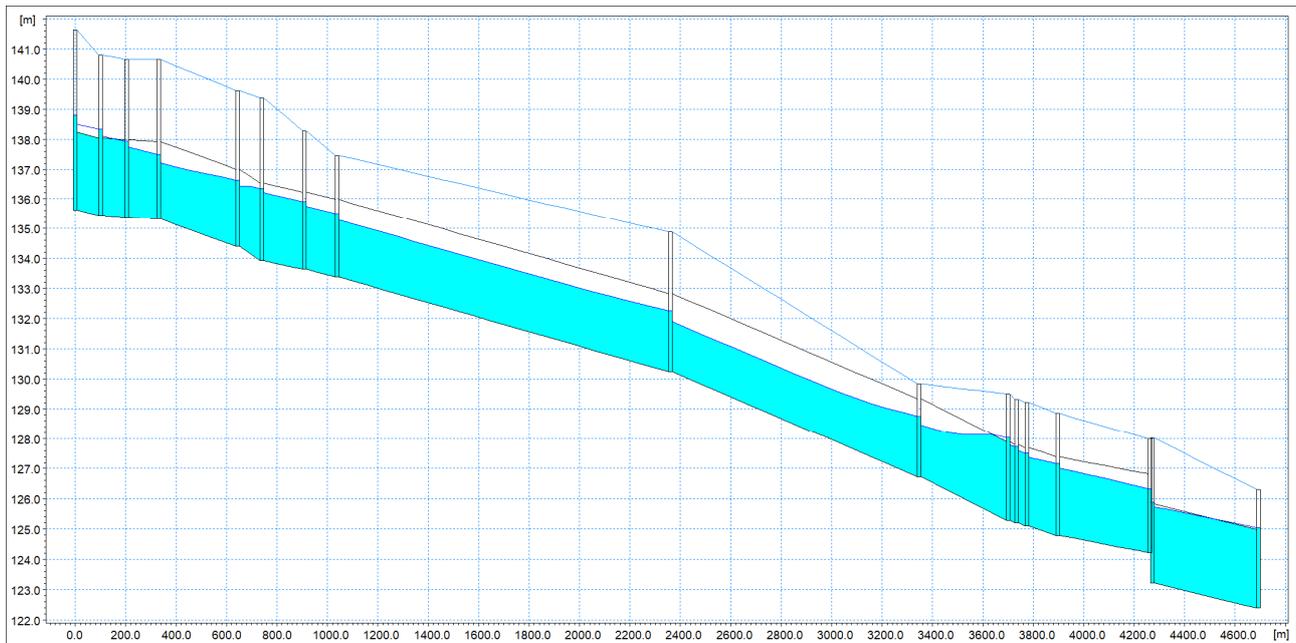


Figura 86 – Profilo longitudinale del tratto tombinato del Pudiga con andamento dei livelli piezometrici massimi per tempo di ritorno 100 anni.

5.5 Torrente Garbogera

Nella Figura 87 è riportata la distribuzione calcolata con il modello bidimensionale MIKE 21 nella situazione attuale delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena con tempo di ritorno 10 anni: le tonalità blu evidenziano le aree di esondazione con tiranti idrici minori, quelle giallo/rosso le aree con tiranti idrici maggiori e quelle verdi con tiranti idrici intermedi. Le aree interne all'alveo inciso del Garbogera non sono rappresentate perché, come detto in precedenza, il loro contributo al deflusso è stato già preso in conto nell'ambito del modello MIKE 11.

Analogamente nella Figura 88 è rappresentata la mappa involuppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna per tempo di ritorno 100 anni e nella Figura 89 quella corrispondente al tempo di ritorno 500 anni.

In tutte le figure sono inoltre riportati i confini comunali (linee bianche) e i limiti delle aree con probabilità di alluvioni elevata (linee nere tratteggiate), media (linee nere continue) e scarsa (linee nere a tratto e punto) desunte dal P.G.R.A..

Nella Figura 90 è riportata la distribuzione calcolata con il modello 2D nella situazione attuale delle massime velocità di deflusso verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena con tempo di ritorno 10 anni: le tonalità blu evidenziano le aree con velocità di deflusso basse, quelle giallo/rosso le aree con velocità maggiori.

Analogamente nella Figura 91 è rappresentata la mappa involuppo delle massime velocità di deflusso per tempo di ritorno 100 anni e nella Figura 92 quella corrispondente al tempo di ritorno 500 anni.

Nella Figura 93 è fornita la rappresentazione grafica dei profili di piena di assegnato tempo di ritorno TR, con indicazione della variabilità della portata massima defluente lungo lo sviluppo longitudinale dell'alveo inciso (modello MIKE 11). Si può osservare come al termine del tratto di alveo inciso, ovvero all'imbocco del tratto tombinato, la portata massima defluente varia poco, tra circa 3,2 e 3,3 m³/s passando dall'evento con tempo di ritorno di 10 anni a quello di 500 anni

Nella Figura 94 è rappresentato il profilo longitudinale del tratto tombinato con indicazione dei livelli piezometrici massimi raggiunti nel corso dell'evento con tempo di ritorno 100 anni (modello MIKE URBAN). Non sono stati invece riportati i livelli massimi relativi agli eventi con tempo di ritorno 10 e 500 anni perché poco discosti da quello rappresentato, a causa della scarsa differenza tra i corrispondenti valori massimi di portata defluente come sopra detto. Le condizioni di moto sono sempre a pelo libero con sufficienti franchi di sicurezza.

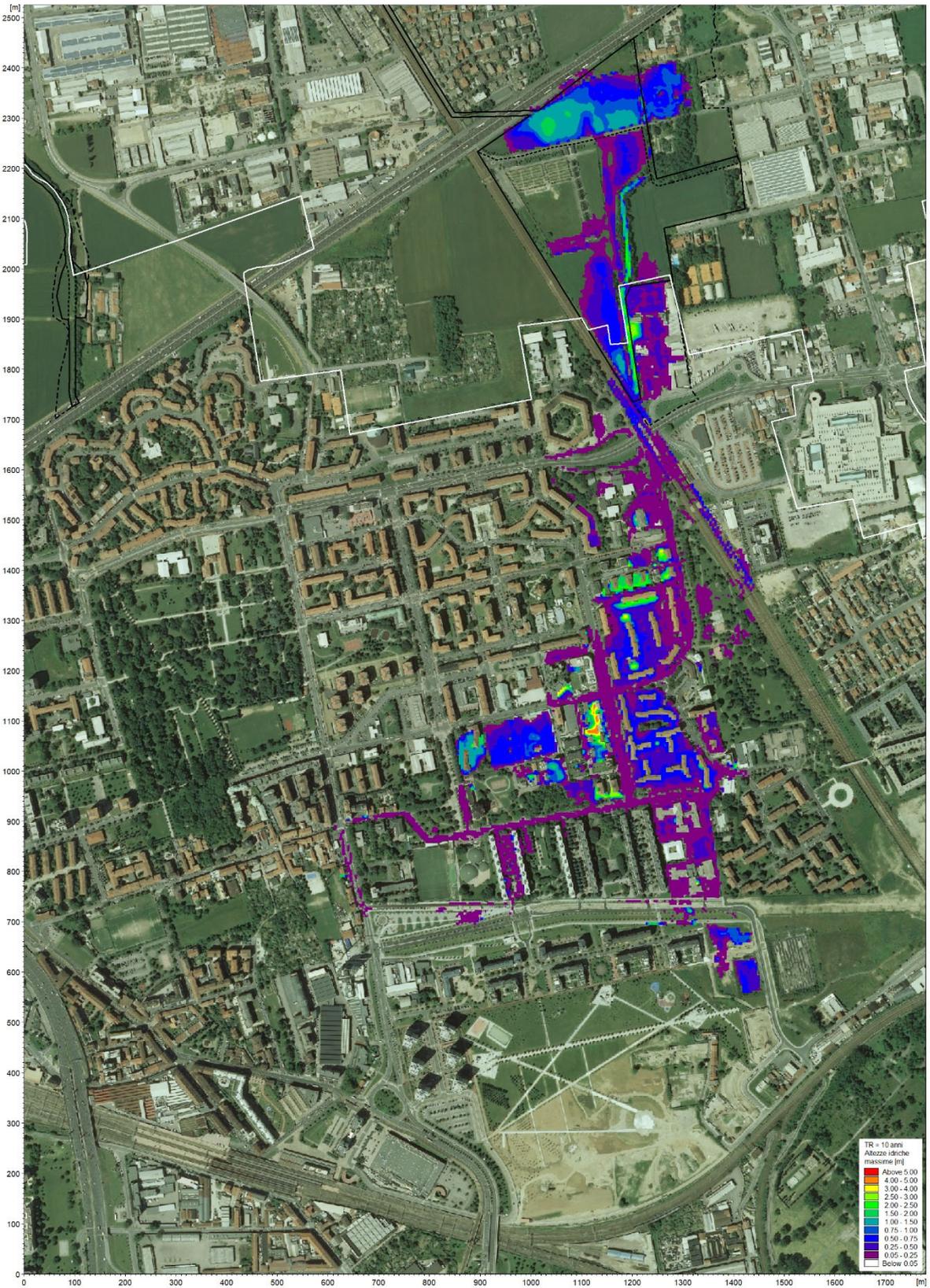


Figura 87 - Stato attuale, TR10: inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

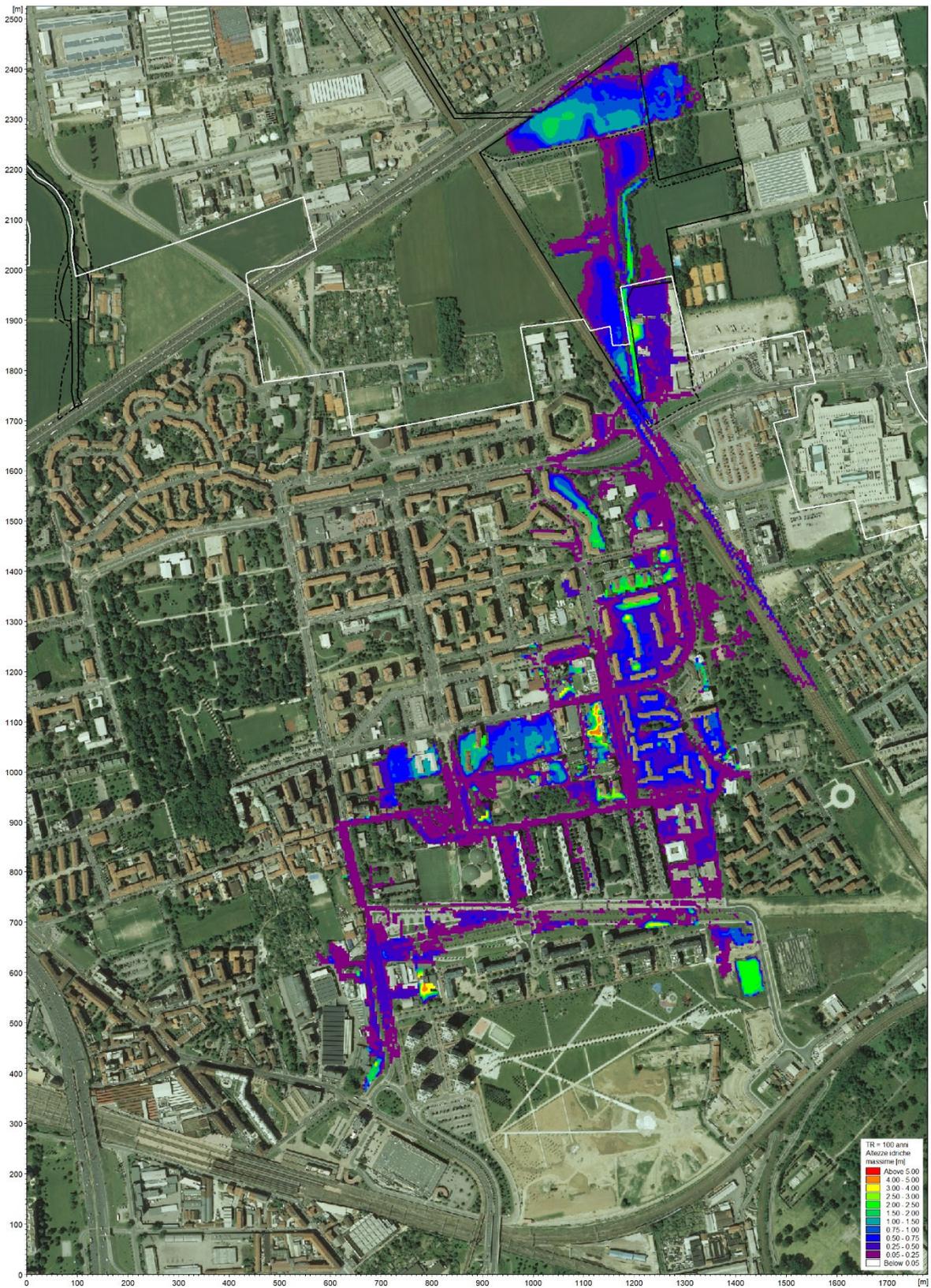


Figura 88 - Stato attuale, TR100: inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

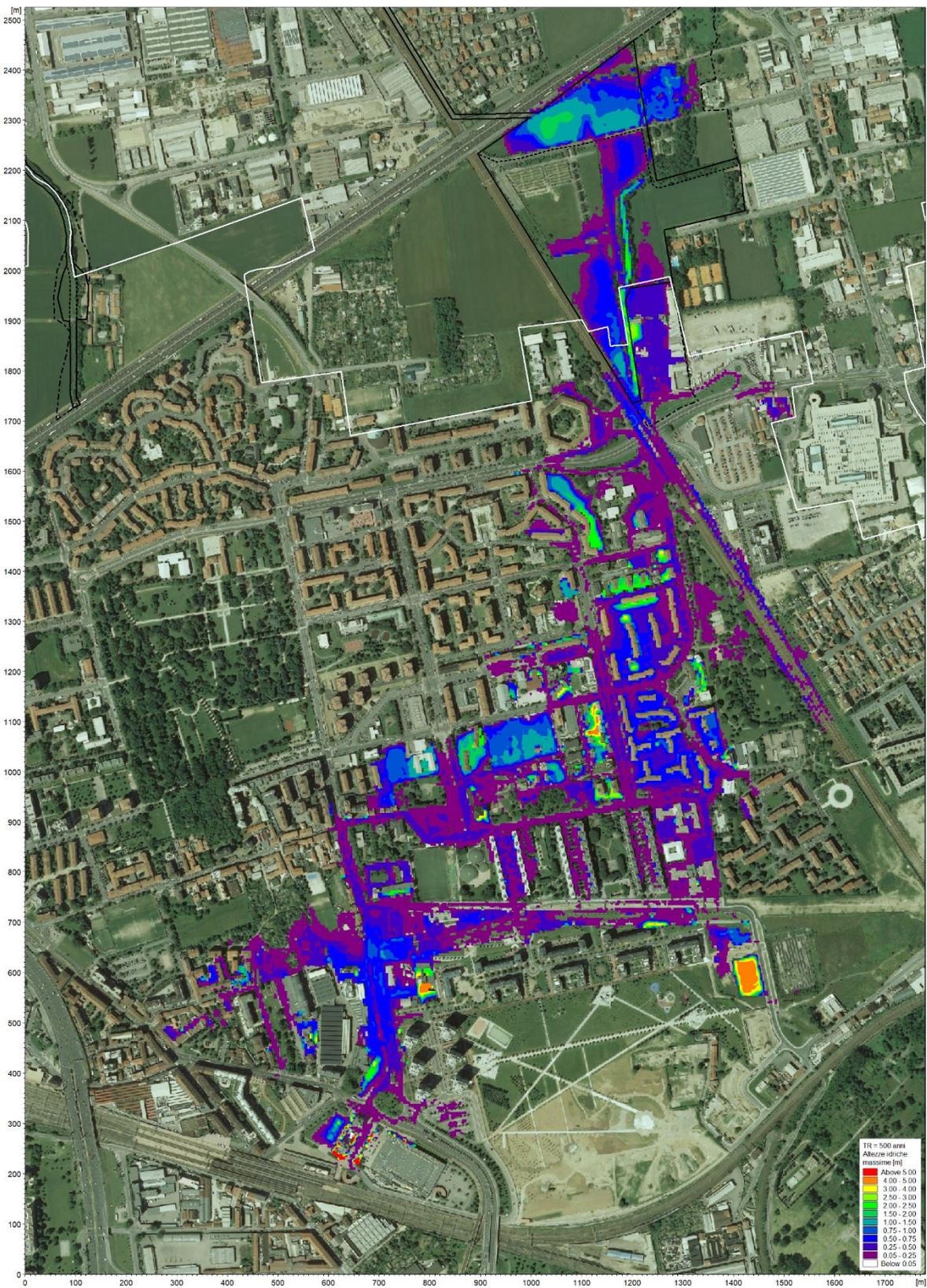


Figura 89 - Stato attuale, TR500: inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

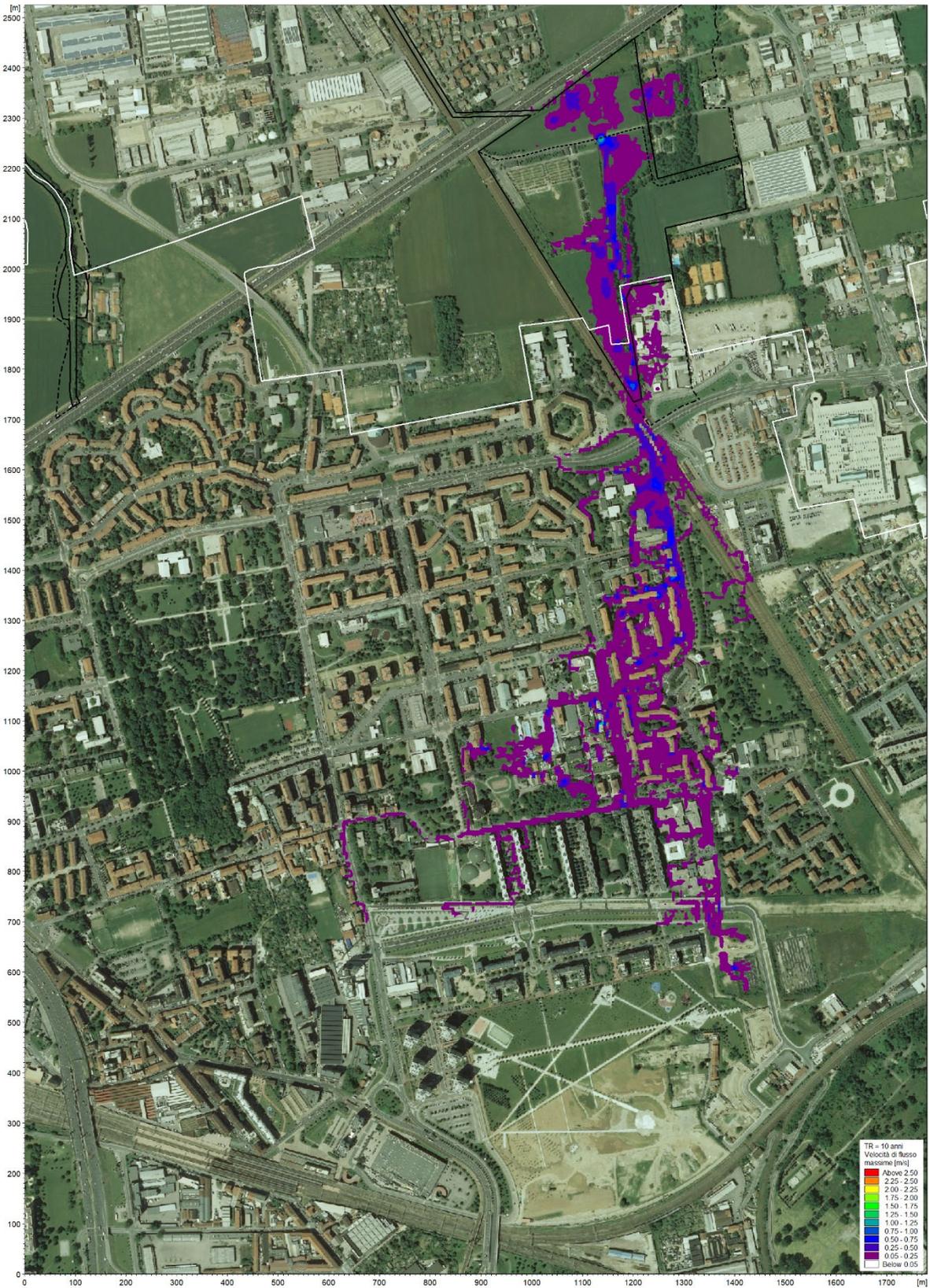


Figura 90 - Stato attuale, TR10: involucro delle massime velocità di deflusso.



Figura 91 - Stato attuale, TR100: involucro delle massime velocità di deflusso.



Figura 92 - Stato attuale, TR500: involucro delle massime velocità di deflusso.

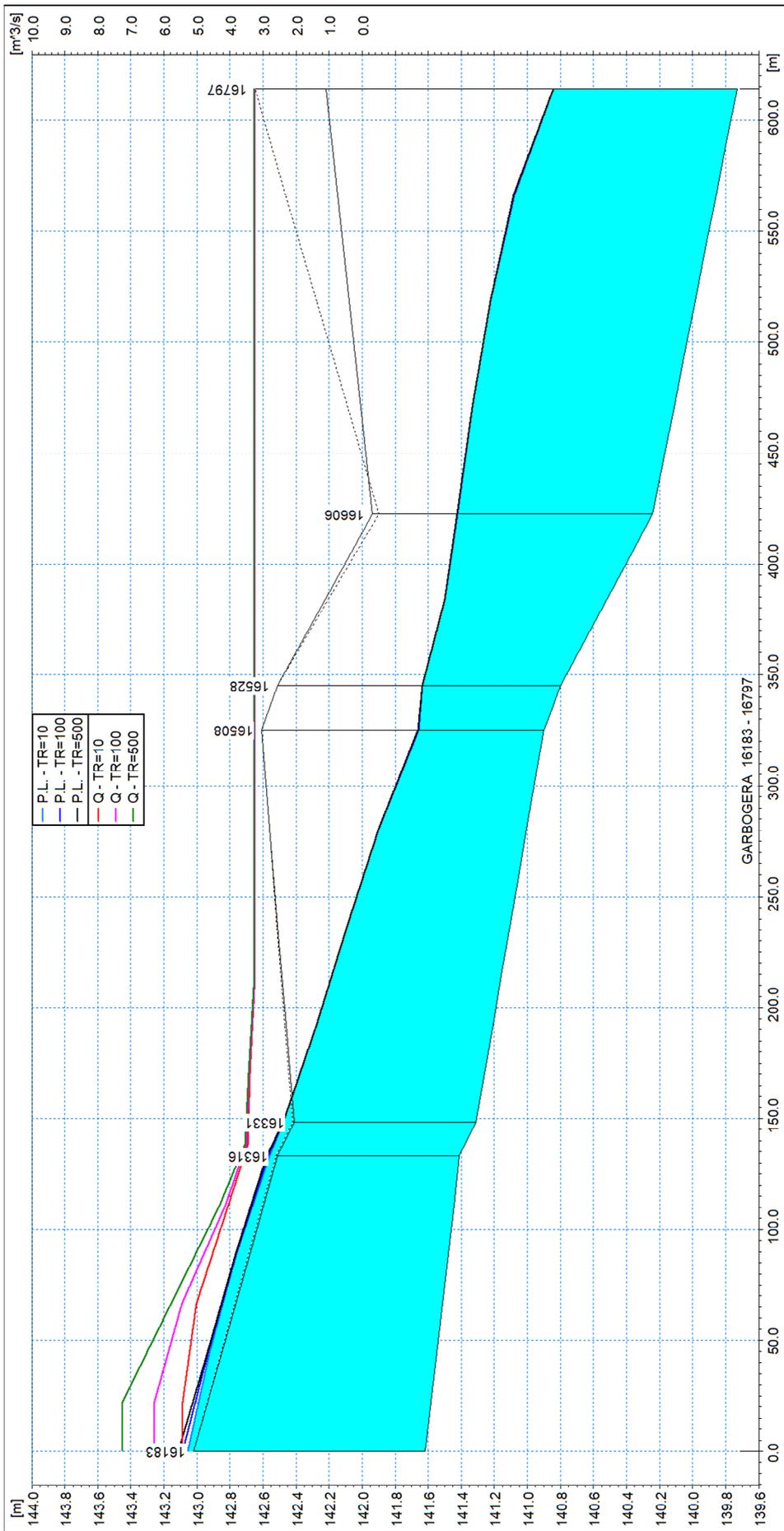


Figura 93 – Profili di corrente lungo l'alveo inciso del Garbogera allo stato attuale per assegnati TR.

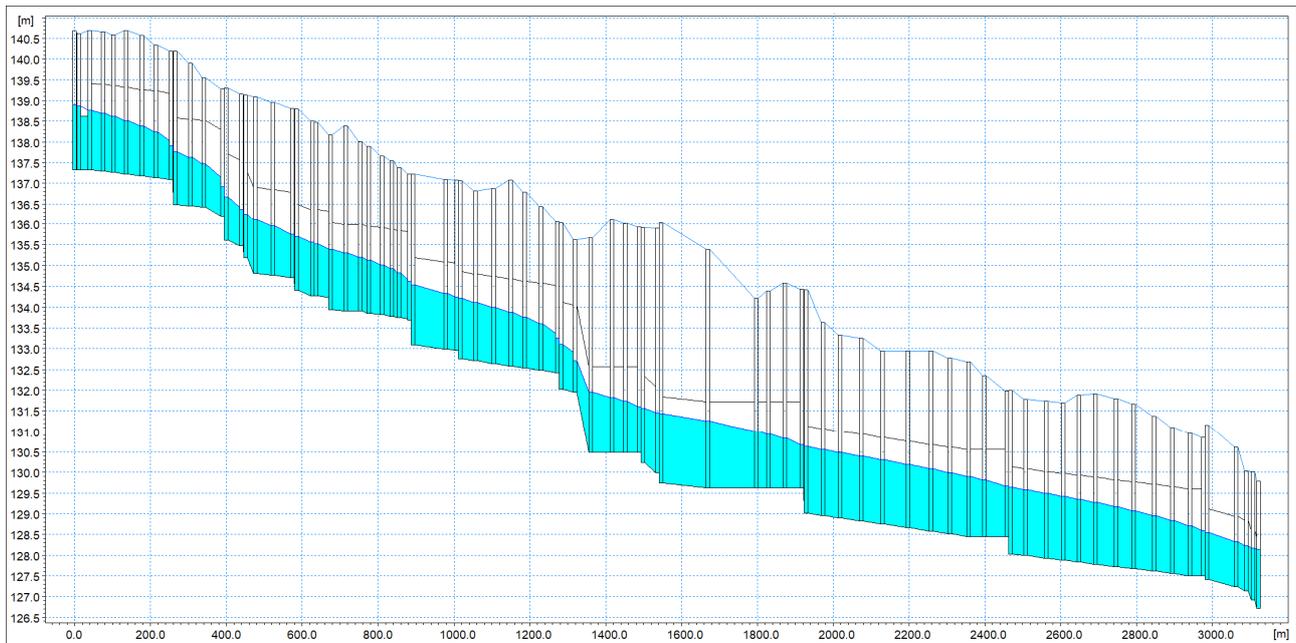


Figura 94 – Profilo longitudinale del tratto tombinato del Garbogera con andamento dei livelli piezometrici massimi per tempo di ritorno 100 anni.

5.6 Cartografia di sintesi dei risultati

I risultati delle simulazioni condotte sono stati sintetizzati nella “*Carta delle aree esondabili e della pericolosità*” in scala 1:10.000, estesa al solo territorio di competenza del Comune di Milano, costituita complessivamente da 4 tavole (elaborati n° 3430-04-02100, 3430-04-02200, 3430-04-02300, 3430-04-02400).

Sulle tavole sono indicati i limiti delle aree a diversa pericolosità:

- **Elevata** – corrispondente alla perimetrazione delle aree allagate dall’evento di piena di riferimento con tempo di ritorno 10 anni;
- **Media** – corrispondente alla perimetrazione delle aree allagate dall’evento di piena di riferimento con tempo di ritorno 100 anni (200 anni per il fiume Lambro);
- **Moderata** – corrispondente alla perimetrazione delle aree allagate dall’evento di piena di riferimento con tempo di ritorno 500 anni.

All’interno delle aree a pericolosità elevata, le celle del modello 2D caratterizzate da massime altezze idriche calcolate per tempo di ritorno 10 anni sono state suddivise in 3 classi:

- h1** - valori compresi tra 0,05 e 0,30 m;
- h2** - valori compresi tra 0,30 e 0,70 m;
- h3** - valori superiori a 0,70 m.

Le celle del modello con valori delle altezze idriche massime calcolate inferiori a 0,05 m non sono state prese in considerazione perché non significative.

All’interno delle aree comprese tra il limite di pericolosità elevata e il limite di pericolosità media sono rappresentate le celle del modello 2D caratterizzate da massime altezze idriche calcolate per tempo di ritorno 100 anni (200 anni per il Lambro) di classe h1, h2 e h3. All’interno delle aree comprese tra il limite di pericolosità media e il limite di pericolosità moderata sono rappresentate infine le celle del modello 2D caratterizzate da massime altezze idriche calcolate per tempo di ritorno 500 anni di classe h1, h2 e h3.

Per confronto, sulle tavole sono state riportate, per tutti i corsi d’acqua considerati, anche i limiti di pericolosità del P.G.R.A. e per il solo fiume Lambro i limiti delle Fasce Fluviali del P.A.

ALLEGATO 1

Descrizione del codice di calcolo MIKE 11 – HD

1. PREMESSA

Il programma MIKE 11 è stato realizzato dal DHI (Danish Hydraulic Institute) a partire dal programma SYSTEM 11 che dal 1972, anno della sua messa a punto, ad oggi, è stato usato in un grande numero di applicazioni in tutto il mondo con ottimi risultati e riconoscimenti.

MIKE 11 è un programma generale per la simulazione del flusso idrico a pelo libero in estuari, fiumi, sistemi di irrigazione e simili corpi idrici. MIKE 11 simula il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. E' possibile tenere conto di:

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

L'adozione del programma di simulazione DHI\MIKE 11, consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

2. DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche: Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.

Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle, cioè simulare i fenomeni di rigurgito.

Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

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

3. EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE 11 mediante il terzo tipo di formulazione risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

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

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

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

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

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

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

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

dove:

A = area della sezione bagnata (m²);

C = coefficiente di attrito di Chezy (m^{1/2}s⁻¹);

g = accelerazione di gravità (m s⁻²);

h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);

Q = portata (m³/s);

R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale addotta (m²/s).

4. SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

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

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

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

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

5. APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

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

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

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

6. DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. In MIKE 11 la descrizione di ogni struttura viene effettuata in un segmento di corso d'acqua.

Tipi di strutture simulate

Tipo 1. Stramazzo a larga soglia

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

Tipo 2. Relazione Q-h

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

Tipo 3. Tombino

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

Tipo 4. Relazione Q-t

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

Tipo 5. Relazione $Q = A(Z_{j1}) \cdot Z_{j2}$

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

Tipo 6. Strutture mobili

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

7. RESISTENZA D'ATTRITO

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler.

Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

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

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

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

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

8. CONDIZIONI INIZIALI

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

9. METODO DI SOLUZIONE

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

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

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

10. CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne, attrito indotto dal vento. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

11. DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

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

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

1) Criterio di Courant

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

dove:

Cr = numero di Courant;
d = altezza d'acqua media;
V = velocità media della corrente;
g = accelerazione di gravità;
Dt, Dx = passi di calcolo.

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

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

2) Criterio della velocità.

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

$$V * Dt < Dx$$

dove V è velocità media della corrente.

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

Il modello DHI/MIKE 11 genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la distanza tra due sezioni sia maggiore di Dx, vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro Dx o meno. In osservanza ai sovraccitati criteri è possibile definire unicamente intervalli di valori per Dx e Dt e non valori univoci per ogni simulazione.

ALLEGATO 2

Descrizione del codice di calcolo MIKE URBAN CS

1. PREMESSA

MIKE URBAN Collection System è il codice di calcolo monodimensionale per le reti di drenaggio. Con MIKE URBAN CS è possibile utilizzare quale motore di calcolo per la simulazione idrodinamica delle correnti non stazionarie nelle reti fognarie, a pelo libero o in pressione, sia SWMM che MOUSE, quest'ultimo sviluppato dal DHI.

MIKE URBAN CS è composto da 5 moduli attivabili all'interno del menù del Model Manager:

- CS-Pipeflow – Modulo idrodinamico
- CS-Rainfall-Runoff – Modulo idrologico
- CS-Control – Modulo di controllo in tempo reale
- CS-Pollution Transport – Modulo per il calcolo del trasporto solido e di inquinanti
- CS-Biological Processes – Modulo per i processi biologici
- CS-Pipeflow, permette la modellazione di un'ampia gamma di strutture idrauliche, incrementi di pressione, particolari strutture idrauliche definite dall'utente, regole operative complesse, ecc. oltre ad avere a disposizione un'ampia gamma di ulteriori strumenti e moduli per l'idrologia, la qualità delle acque ed il tempo reale.

2. MODELLO MATEMATICO ED EQUAZIONI

Il modello di calcolo idrodinamico risolve le equazioni complete di De St.Venant attraverso la rete di drenaggio (a maglia chiusa o ramificata), permettendo la modellazione degli effetti di rigurgito, inversioni di flusso, sovrappressioni nei tombini, deflusso a pelo libero ed in pressione, condizioni al contorno variabili nel tempo (ad esempio effetti di marea), bacini di accumulo.

Il motore di calcolo MOUSE è stato progettato per simulare qualsiasi tipologia di rete e tubazioni con sezione di qualsiasi forma. Qualsiasi struttura può essere rappresentata, comprese pompe, luci sottobattenti, sifoni ecc..

2.1 Equazioni di De Saint Venant

Il calcolo delle correnti in moto vario viene effettuato risolvendo le equazioni di continuità e di quantità di moto, basate sulle seguenti assunzioni:

- fluido incomprimibile e omogeneo;
- pendenza del fondo modesta;
- direzione prevalente del moto monodimensionale;
- pressioni idrostatiche lungo la verticale.

Le equazioni del moto assumono la forma generale seguente:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA I_f = gA I_0 \quad (3.2)$$

dove:

Q = portata, [m³/s];

A = area, [m²];

y = altezza d'acqua, [m];

g = accelerazione di gravità, [m/s²];

x = progressiva lungo la direzione di moto, [m];

t = tempo, [s];

α = coefficiente di distribuzione delle velocità;

I₀ = pendenza di fondo;

I_f = pendenza della linea dell'energia.

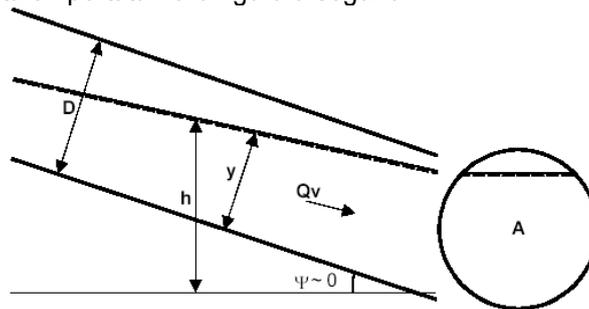
2.2 Implementazioni delle equazioni del moto in MOUSE

Le equazioni di De Saint Venant possono essere scritte nel seguente modo:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(I_0 - I_f) \quad (3.4)$$

La schematizzazione ipotizzata è riportata nella figura a seguire:



Schema della sezione di una condotta.

Il coefficiente di distribuzione delle velocità tiene conto della distribuzione non uniforme della velocità in una determinata sezione e può essere espresso con la formula:

$$\alpha = \frac{A}{Q^2} \int v^2 dA \quad (3.5)$$

Assumendo che la pendenza del fondo sia piccola, essa può essere espressa come funzione dell'altezza d'acqua e del gradiente della superficie libera come:

$$I_0 \approx \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.6)$$

In questo modo è possibile utilizzare l'altezza h del pelo libero rispetto ad una quota di riferimento, come variabile dipendente al posto dell'altezza d'acqua y . L'equazione del momento può quindi assumere la forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA I_f \quad (3.7)$$

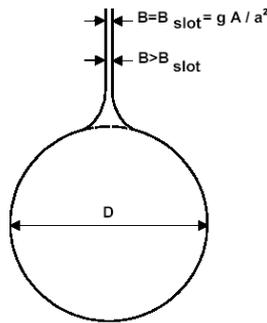
mentre la pressione e le forze di gravità possono essere espresse in un unico termine

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.8)$$

Le equazioni descritte sono valide per correnti a pelo libero ma possono essere generalizzate ed estese anche in caso di moto in pressione come descritto successivamente.

2.3 Schematizzazione delle correnti in pressione

Nel momento in cui la portata raggiunge il valore limite di capacità della tubazione si instaura un moto in pressione e le assunzioni di base delle equazioni di Saint Venant non sono più valide. Tuttavia è possibile generalizzare tali equazioni, rendendole valide anche per il moto in pressione. Ciò è reso possibile introducendo uno "slot" fittizio in corrispondenza della sommità della condotta, come rappresentato nella figura seguente, che permette di estendere la sezione di calcolo della tubazione rendendo valide le equazioni di De Saint Venant.



Schematizzazione del moto in pressione.

2.4 Condizioni di moto simulate

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

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

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

2.5 Simulazione delle correnti veloci con l'approccio dell'onda dinamica

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

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

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

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

2.6 Condizioni iniziali

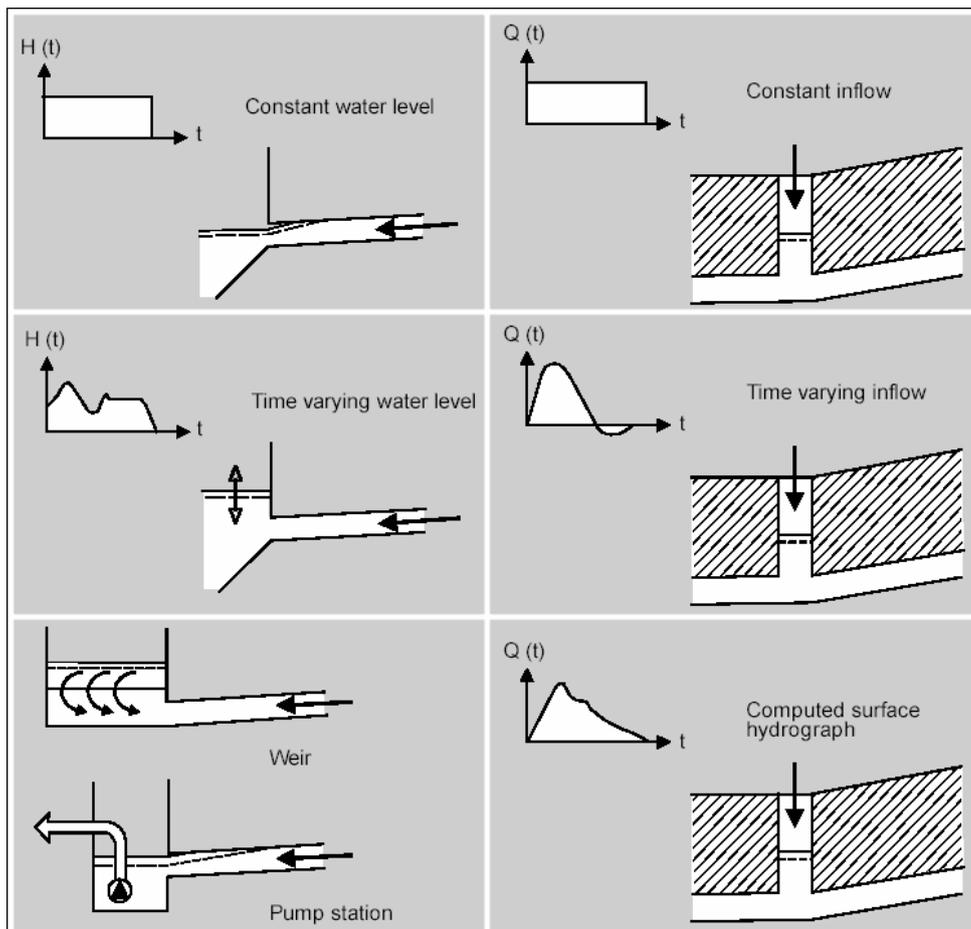
È possibile scegliere due diverse opzioni per definire le condizioni iniziali:

- Standard: viene definita automaticamente dal modello un'altezza d'acqua iniziale pari allo 0,5% dell'altezza della tubazione e comunque inferiore a 0,005 m e la rispettiva portata viene calcolata utilizzando la formulazione di Manning;
- Hotstart: è possibile utilizzare i risultati di una simulazione precedente come condizioni iniziali.

2.7 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno necessarie alla risoluzione delle equazioni differenziali possono essere definite come costanti o come variabili nel tempo e si suddividono in due gruppi principali:

1. Condizioni al contorno esterne, che descrivono l'interazione tra la rete simulata e il mondo esterno;
2. Condizioni al contorno interne, che descrivono l'interazione tra diversi elementi della rete.



Esempi di condizioni al contorno applicabili.

Tra le condizioni al contorno esterne possono essere specificate le seguenti:

- In corrispondenza di pozzetti e strutture:
 - portata costante in ingresso o uscita $Q = \text{cost.}$, [m^3/s];
 - idrogramma di portata in ingresso o uscita $Q = Q(t)$, [m^3/s];
 - portata in uscita attraverso uno stramazzo $Q = Q(H)$, [m^3/s];
 - portata in uscita attraverso una pompa $Q = Q(H)$, [m^3/s].
- In corrispondenza degli sbocchi:
 - livello costante $H = \text{cost.}$, [m];
 - idrogramma di livello $H = H(t)$, [m];
 - scala di deflusso $Q = Q(H)$, [m^3/s].

Tra le condizioni al contorno interne possono essere specificate le seguenti:

- In corrispondenza di pozzetti e strutture:
 - scala di deflusso di uno stramazzo (weir) $Q = Q(H)$, [m^3/s];
 - caratteristiche della pompa (pump) $Q = Q(H)$, [m^3/s] o $Q = Q(\Delta H)$, [m^3/s].

Alcune delle condizioni al contorno descritte sono riportate nella figura a seguire.

2.8 Resistenze per attrito e perdite di carico

2.8.1 Resistenze per attrito lungo i collettori

MIKE URBAN CS consente di utilizzare 2 diverse formulazioni per il calcolo della resistenza d'attrito.

Formula di Strickler

Secondo la formula di Strickler, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$I_f = \frac{gQ|Q|}{M^2 AR^{4/3}}$$

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

Formula di Colebrook-White per tubi circolari

Secondo tale formulazione, il fattore di resistenza viene calcolato iterativamente in funzione dell'equazione:

$$\sqrt{\frac{2}{f_{cw}}} = cw_1 + cw_2 \cdot \ln\left(\frac{cw_3}{Re} \sqrt{\frac{2}{f_{cw}}} + cw_4 \cdot \frac{k}{R}\right) \quad (7.9)$$

dove:

- k = scabrezza equivalente [m];
- R = raggio idraulico;
- Re = numero di Reynolds;
- cw1, cw2, cw3, cw4 = costanti empiriche il cui valore di default è 6.4, -2.45, 3.3, 1.0.

Infine si ha

$$I_f = f_{cw} \cdot \frac{Q^2}{2gA^2R} \Rightarrow f = \frac{f_{cw}}{2gA^2R} \quad (7.10)$$

Coefficiente di scabrezza variabile

All'interno di MOUSE è inoltre possibile specificare una variazione del coefficiente di scabrezza in funzione dell'altezza raggiunta dall'acqua all'interno della tubazione. Questa funzione è particolarmente utile nel caso di tubazioni vecchie in cui effettivamente il protrarsi nel tempo dei fenomeni di deposito e/o erosione può incidere sulle caratteristiche del rivestimento della condotta.

Le diverse scabrezze sono calcolate mediante la seguente formula:

$$M_{act} = M_{bott} + (M_{top} - M_{bott}) \cdot \left(\frac{y}{D}\right)^{exp} \quad (7.8)$$

Dove:

- M_{act} = scabrezza di Strickler calcolata;
- M_{bott}, M_{top} = scabrezza definita dall'utente sul fondo e in sommità tubazione;
- exp = esponente definito di default;
- y/D = altezza d'acqua relativa al diametro del tubo.

2.8.2 Perdite di carico in ingresso ai pozzetti

L'altezza d'acqua nel pozzetto e nel tubo afferente è considerata la stessa; ne consegue che le perdite di carico vengono calcolate in funzione del termine cinetico relativo al condotto (i) e al pozzetto (m):

$$\Delta E_i = \frac{v_i^2 - v_m^2}{2g}$$

Nel caso di deflusso libero dal condotto al pozzetto, quando quindi l'altezza d'acqua nel pozzetto è inferiore all'altezza d'acqua nel collettore in ingresso, l'altezza d'acqua nel collettore è assunta pari all'altezza di moto critico, e a seconda del tipo di sezione sono utilizzate formulazioni differenti; ad esempio per condotte circolari viene utilizzata la seguente:

$$y_{c(i)} = \sqrt{0.32 \frac{Q_i}{\sqrt{D_i}}}$$

Analogamente, quando nel collettore si instaura una corrente supercritica, il livello d'acqua a valle della confluenza è assunto pari all'altezza d'acqua presente nel collettore.

2.8.3 Perdite di carico in uscita dai pozzetti

La perdita di carico è considerata proporzionale al termine cinetico:

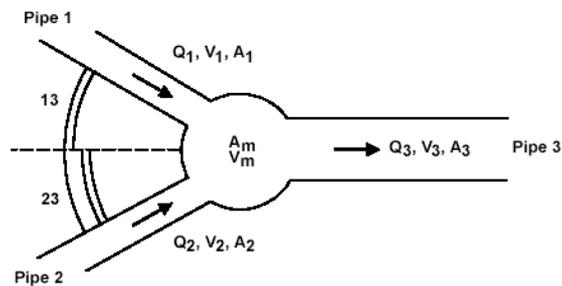
$$\Delta E_j = \sum_k \zeta_{jk} \cdot \frac{V_j^2}{2g}$$

il termine ζ_{jk} varia in funzione della tipologia geometrica del nodo come descritto nel seguito.

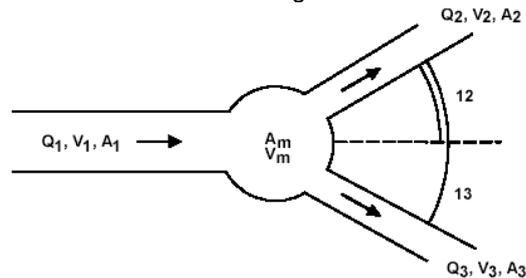
Variatione della direzione del moto

Indicando con i il collettore in ingresso al nodo e con j quello in uscita si ottiene:

$$\zeta_{dir(j)} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_j} \cdot \frac{\theta_{ij}^2}{90^{\circ 2}}$$



Pozzetto con 2 tubi in ingresso e 1 in uscita.

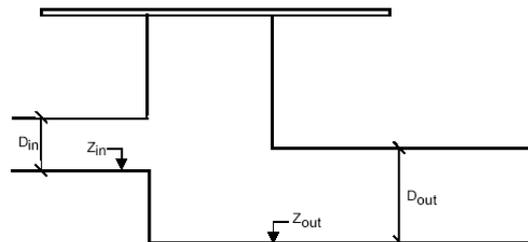


Pozzetto con 1 tubo in ingresso e 2 in uscita.

Variatione in quota

Nel caso in cui vi sia una differenza in quota tra il collettore in ingresso e quello in uscita come rappresentato in figura, le perdite di carico sono calcolate mediante la seguente:

$$\zeta_{level(j)} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_j} \cdot \frac{(Z_j - Z_i) \cdot (Z_j + D_j - Z_i - D_i)}{D_i \cdot D_j}$$



Differenza di quota tra collettore in ingresso e uscita dal pozzetto.

Contrazione

Il flusso di portata che esce da un pozzetto ed entra in un collettore subisce una contrazione che determina delle perdite di carico in funzione della forma del pozzetto e del collettore, calcolate dal modello mediante la seguente espressione:

$$\zeta_{contr(j)} = K_m \cdot \left(1 - \frac{A_j}{A_m \cdot \frac{Q_j}{\sum_{i=1}^n Q_i}} \right)$$

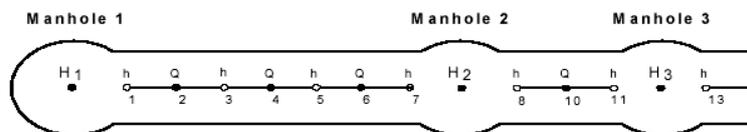
dove K_m e A_m rappresentano il coefficiente di forma e l'area del pozzetto.

2.9 Metodo di soluzione

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Lo schema di calcolo utilizza una soluzione numerica implicita alle differenze finite delle equazioni di De St.Venant.

Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h , rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).

La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente: il numero minimo di punti di calcolo per ogni condotta è 3, con un punto h a ciascuna estremità del tubo.



Rappresentazione della griglia di calcolo.

L'algoritmo numerico usa un passo di calcolo auto-adattante, che fornisce una soluzione efficiente e accurata sia nelle reti ramificate sia in quelle a maglia chiusa.

Possono essere simulate condizioni sia di corrente lenta, sia di corrente veloce, grazie allo schema computazionale che si adatta alle condizioni locali di deflusso. Infine sono simulati con precisione gli effetti di rigurgito e le sovrappressioni.

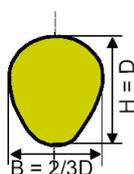
3. SCHEMATIZZAZIONE DELLA RETE

Gli elementi che possono essere utilizzati in MOUSE per schematizzare la rete sono rappresentati da tre tipologie principali:

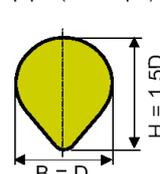
1. Links

- Tubi – standard o con sezione definita dall'utente.
- Canali aperti – sezione definita dall'utente.

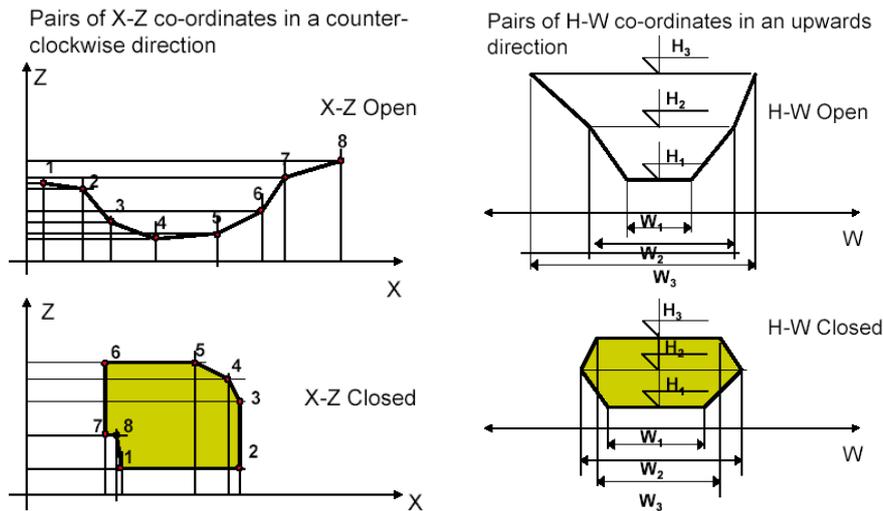
Egg-shaped pipe



Danish egg-shaped pipe (0 -shape)



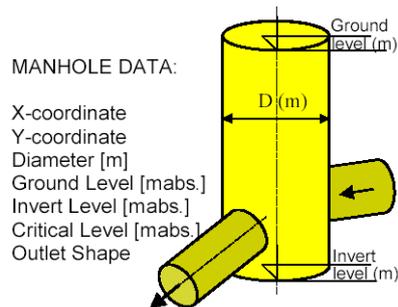
Sezioni tipo di forma ovoidale schematizzabili nel modello.



Esempi di sezioni schematizzabili in funzione dei dati direttamente inseriti dall'utente.

2. Nodes

- pozzetti,
- bacini,
- bacini di accumulo,
- scarichi e restituzioni.



Schematizzazione dei pozzetti.

3. Funzioni, per la descrizione di alcuni componenti della rete come ad esempio:

- scaricatori di piena,
- luci sotto-battenti,
- pompe,
- valvole unidirezionali,
- stramazzi.

4. MODELLAZIONE DEL DEFLUSSO SUPERFICIALE

I modelli di simulazione del deflusso superficiale (Surface RunOff) disponibili sono 4:

- **Modello A**, metodo afflussi-deflussi basato sulle relazioni area/tempo di corrivazione;
- **Modello B**, basato sul modello dell'onda cinematica (serbatoio non lineare);
- **Modello C**, basato sul modello a serbatoio lineare;
- **UHM**, basato sul metodo dell'Idrogramma Unitario.

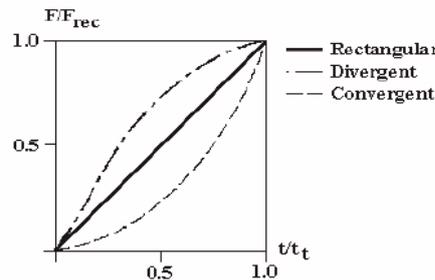
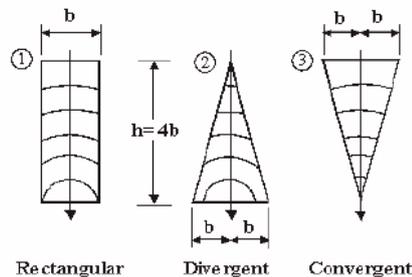
Alle opzioni precedentemente descritte (tranne che per il modello UHM) può essere accoppiato il sistema RDI (Rainfall Dependent Infiltration). **RDI** schematizza il ciclo idrologico con le equazioni di continuità che legano una serie di 4 serbatoi, ognuno rappresentante una fase del ciclo idrologico: atmosfera (formazione-fusione della neve, perdite per evapotraspirazione), superficie (accumulo nelle depressioni superficiali e scorrimento superficiale), zona radicale (infiltrazione, non saturo) e falda (accumulo e rilascio dalla falda). Il bilancio

idrologico dinamico simulato consente di valutare in continuo gli apporti quantitativi in ingresso alla rete e al tempo stesso permette di operare in continuo (quindi non solo su singoli eventi) nella simulazione dei processi di apporto di sostanze inquinanti dalla superficie del bacino alla rete fognaria. Le analisi idrauliche e quelle relative ai carichi inquinanti in rete, spesso basate su eventi pluviometrici molto intensi, possono essere trasformate in un processo continuo che copre sia il periodo di pioggia sia il tempo secco. Questo permette di simulare in maniera realistica il contenuto di carichi inquinanti nelle acque avviate alla depurazione e in quelle sfiorate dagli scaricatori di piena.

4.1 Modello A

Lo scorrimento superficiale e quindi il contributo dei singoli bacini è definito in funzione delle perdite iniziali, dell'area del bacino e delle perdite idrologiche continuative. La forma dell'idrogramma contribuente è determinato dal tempo di corrivazione e dalla relazione tempo-area definita (T-A curve).

Sono già predefinite all'interno del modello 3 relazioni tempo-area rispettivamente per bacini rettangolari (TA Curve 1), divergenti (TA Curve 2) e convergenti (TA Curve 3), come raffigurato nella figura seguente.



Schema delle 3 curve T-A disponibili

Il processo di scorrimento superficiale è discretizzato nel tempo in funzione del passo di simulazione Δt ; la superficie del bacino contribuente è discretizzata infatti in una serie di celle concentriche, centrate sulla rispettiva sezione di chiusura. Definendo il tempo di corrivazione come t_c , il numero di celle di discretizzazione è pari a:

$$n = \frac{t_c}{\Delta t}$$

L'area totale contribuente è pari all'area del bacino moltiplicata per il coefficiente di impermeabilità definito dall'utente.

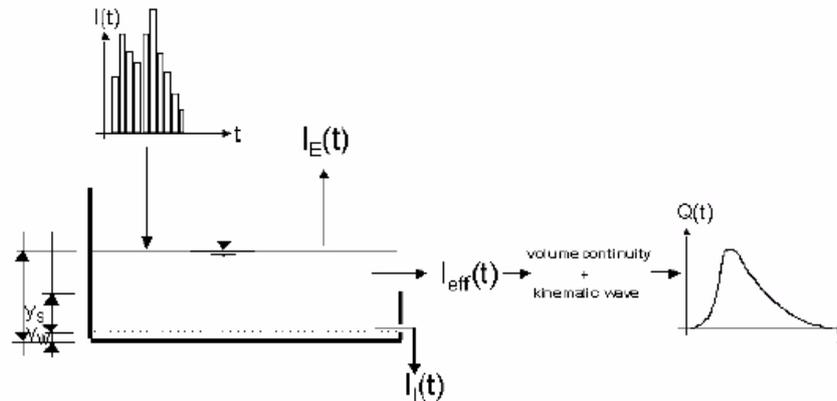
4.2 Modello B

Il codice di calcolo utilizza il modello dell'onda cinematica schematizzando il deflusso superficiale come una portata all'interno di un canale utilizzando l'equazione cinematica del moto. La forma dell'idrogramma dei deflussi superficiali è quindi funzione della scabrezza, pendenza e lunghezza del bacino.

Il modello accoppia all'equazione cinematica l'equazione di continuità dei volumi in base allo schema riportato nella figura seguente.

Nel computo delle perdite vengono considerate evapotraspirazione $I_E(t)$, umidità del suolo $I_W(t)$, infiltrazione $I_I(t)$ ed accumulo superficiale $I_S(t)$, così che le piogge efficaci sono pari a:

$$I_{eff}(t) = I(t) - I_E(t) - I_W(t) - I_I(t) - I_S(t)$$



Schema del funzionamento del modello idrologico B

La precipitazione $I(t)$ è assunta uniformemente distribuita sui singoli bacini, oppure può essere assegnata variabile nel tempo.

Le singole perdite sono espresse dalle seguenti espressioni:

$$I_E(t) = \begin{cases} I_{PE}(t) & \text{for } (I(t) \geq I_{PE}(t)) \quad \text{OR} \quad (y(t) > 0) \\ I(t) & \text{for } (I(t) < I_{PE}(t)) \quad \text{AND} \quad (y(t) = 0) \end{cases}$$

dove $I_{PE}(t)$ e $y(t)$ rappresentano rispettivamente l'evapotraspirazione potenziale e l'altezza della lama d'acqua sul bacino.

$$I_W(t) = \begin{cases} I(t) - I_E(t) & \text{for } y(t) < y_w \\ 0 & \text{for } (I(t) \leq I_E(t)) \quad \text{OR} \quad (y(t) \geq y_w) \end{cases}$$

dove y_w è l'altezza di "umettamento".

$$I_I(t) = \begin{cases} I_H(t) & \text{for } (y(t) \geq y_w) \quad \text{AND} \quad (I(t) - I_E(t) - I_W(t) \geq I_H(t)) \\ I(t) - I_E(t) - I_W(t) & \text{for } (I(t) - I_E(t) - I_W(t) < I_H(t)) \\ 0 & \text{for } y(t) < y_w \end{cases}$$

dove $I_H(t)$ capacità di infiltrazione calcolata con l'equazione di Horton nella sua forma

$$I_H(t) = I_{Imin} + (I_{Imax} - I_{Imin}) \cdot e^{-K_a \cdot t}$$

dove:

I_{MAX} = capacità massima di infiltrazione dopo un lungo periodo di tempo asciutto;

I_{MIN} = minima capacità di infiltrazione (a saturazione);

K_a = fattore di tempo, caratteristica del tipo di suolo.

L'equazione è implementata nel modello mediante l'espressione

$$I_{I_{CUM}}(t_p) = \int_0^{t_p} I_H dt = I_{Imin} \cdot t_p + \frac{I_{Imax} - I_{Imin}}{K_a} \cdot (1 - e^{-K_a t_p})$$

Nel periodo asciutto che segue l'evento di pioggia, la capacità di infiltrazione viene gradualmente riportata al suo valore iniziale utilizzando la forma inversa dell'equazione di Horton:

$$I_H(t) = I_{IT} + (I_{Imax} - I_{IT}) \cdot e^{-1/K_h t}$$

dove:

I_{IT} = capacità di infiltrazione tra la fine dell'evento di pioggia e l'inizio del periodo di tempo asciutto;

t = istante di inizio del tempo asciutto;

K_h = fattore di tempo in periodi asciutti, caratteristica del tipo di suolo.

Per finire la perdita per accumulo superficiale è espressa nella forma:

$$I_S(t) = \begin{cases} I(t) - I_E(t) - I_W(t) - I_I(t) & \text{for } y(t) \leq (y_w + y_s) \\ 0 & \text{for } y(t) > (y_w + y_s) \end{cases}$$

con y_s e $y(t)$ rispettivamente altezza di accumulo superficiale (piccoli invasi) e altezza della lama d'acqua cumulata al tempo t .

4.2.1 Calcolo dello scorrimento superficiale

Lo scorrimento superficiale ha inizio nel momento in cui l'intensità di precipitazione effettiva è maggiore di zero, ed è descritto dalla equazione cinematica del moto nella forma:

$$Q(t) = M \cdot B \cdot I^{1/2} \cdot y_R(t)^{5/3}$$

dove:

M = coefficiente di Strickler;

B = larghezza di scorrimento;

I = pendenza motrice;

$y_R(t)$ = altezza di scorrimento al tempo t , definita in base all'equazione di continuità di seguito riportata, con A , area del bacino contribuyente.

$$I_{eff}(t) \cdot A - Q(t) = \frac{dy_R}{dt} \cdot A$$

4.2.2 Definizione della tipologia di copertura del suolo

È possibile considerare 5 differenti tipologie di copertura del suolo: ogni singolo bacino viene suddiviso dal modello in 5 sotto-bacini, ognuno con un'area contribuyente pari alla percentuale definita dalla tipologia di uso suolo.

Il modello considera ogni singolo sotto-bacino nel calcolo delle perdite, ed i singoli contributi vengono sommati tra loro per definire il contributo totale del bacino.

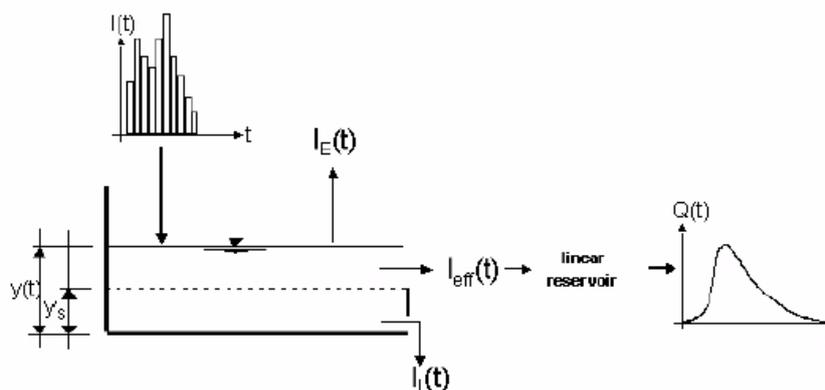
Le tipologie si suddividono in:

- aree impermeabili: pianeggianti o pendenti;
- aree permeabili: a bassa, media o alta capacità di infiltrazione.

4.3 **Modello C**

Il modello C determina l'idrogramma di portata contribuyente per ciascun bacino utilizzando il metodo dei serbatoi lineari, considerando cioè lo scorrimento superficiale direttamente proporzionale all'altezza d'acqua sul bacino. Nel modello sono implementate le due versioni del metodo utilizzate in Olanda (C1) e Francia (C2). La schematizzazione dei processi idraulici e idrologici è riportata nella figura seguente.

Inizialmente viene calcolata l'intensità di precipitazione effettiva che determina lo scorrimento superficiale, quindi vengono applicate l'equazione di continuità e l'equazione dei serbatoi lineari.



Schema del funzionamento del modello idrologico C

Le equazioni per il calcolo delle perdite sono le stesse riportate nel paragrafo relativo al modello idrologico B, ad eccezione delle perdite relative allo stato di umidità del suolo che non sono prese in considerazione nel modello C.

4.3.1 Calcolo dello scorrimento superficiale

Lo scorrimento superficiale ha inizio nel momento in cui l'intensità di precipitazione effettiva è maggiore di zero, ed è descritto dalla equazione dei serbatoi lineari nella forma:

$$Q(t) = C \cdot y_R(t)$$

dove C rappresenta la costante dell'equazione dei serbatoi, differente a seconda del metodo scelto (C1 o C2). $y_R(t)$, altezza di scorrimento al tempo t, è definita in base all'equazione di continuità di seguito riportata, con A, area del bacino contribuyente.

$$I_{eff}(t) \cdot A - Q(t) = \frac{dy_R}{dt} \cdot A$$

4.4 **Modello UHM**

Il modello UHM utilizza l'Idrogramma Unitario per definire il contributo dei singoli bacini. Le perdite per infiltrazione sono in questo caso considerate costanti, proporzionali alla precipitazione (metodo razionale), definite in funzione del Curve Number del metodo SCS (U.S. Soil Conservation Service) od infine definite mediante il metodo SCS generalizzato.

4.4.1 Metodo Razionale

L'eccesso di precipitazione che determina lo scorrimento superficiale è definito dalla formula:

$$P_{excess} = a \cdot A_f \cdot P$$

dove:

- a = coefficiente di deflusso;
- A_f = fattore di correzione dell'area del bacino;
- P = intensità di pioggia (mm/h).

4.4.2 Perdite iniziali e perdite costanti

L'utente può definire una perdita idrologica iniziale, superata la quale il modello inizia a generare scorrimento superficiale, dove la pioggia eccedente che determina tale deflusso è definita da:

$$P_{excess} = \begin{cases} 0; & \text{for } P_{sum} < I_a + I_c \cdot dt \\ A_f \cdot P \cdot I_c; & \text{for } P_{sum} > I_a \end{cases}$$

in cui:

P_{sum} = precipitazione cumulata dall'inizio dell'evento di pioggia (mm);

I_a = perdita iniziale definita dall'utente (mm);

I_c = coefficiente di perdita costante definito dall'utente (mm/h);

A_f = fattore di ragguglio areale;

P = intensità di pioggia (mm/h);

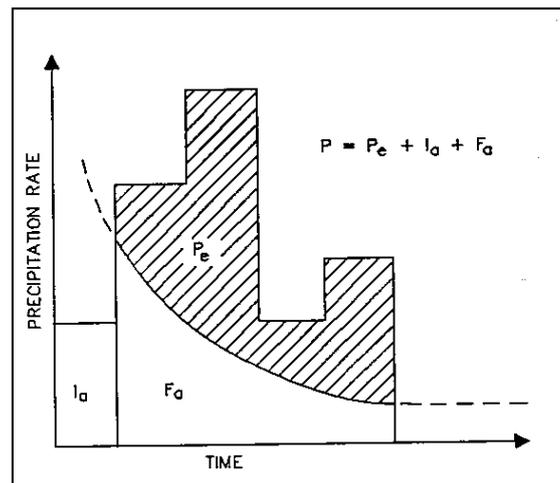
dt = passo temporale di integrazione.

4.4.3 Metodo SCS

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

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

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



Variabili del metodo SCS

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

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

Per il principio di continuità è:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Combinando le precedenti equazioni si ottiene:

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

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

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

$$I_a = 0.2 \cdot S$$

Ne deriva l'equazione base utilizzata nel modello UHM:

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

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

$$S = ((1000 / CN) - 10) \cdot 25.4$$

Il valore del parametro CN (Curve Number) dipende dal tipo di suolo, dall'uso del suolo e dalle condizioni precedenti di imbibizione del suolo all'inizio dell'evento di pioggia.

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

4.4.4 Metodo SCS generalizzato

Successivamente al metodo SCS precedentemente descritto è stato sviluppato un modello di perdita che non utilizza il concetto del grado di saturazione antecedente, bensì un'altezza d'acqua infiltrata.

Il metodo SCS generalizzato risulta simile a quello classico, differendo su alcuni aspetti specifici.

L'eccesso di precipitazione è sempre calcolato sulla base dell'equazione:

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

ma la perdita iniziale I_a è inserita direttamente come parametro in input al modello.

La ritenzione massima potenziale S [mm] è invece calcolata in base alla seguente espressione:

$$S = ((1000 / CN) - 10) \cdot 25.4$$

Il parametro CN è fornito in input al modello e risulta costante durante la simulazione al pari del metodo SCS classico.

4.4.5 Il metodo dell'idrogramma unitario

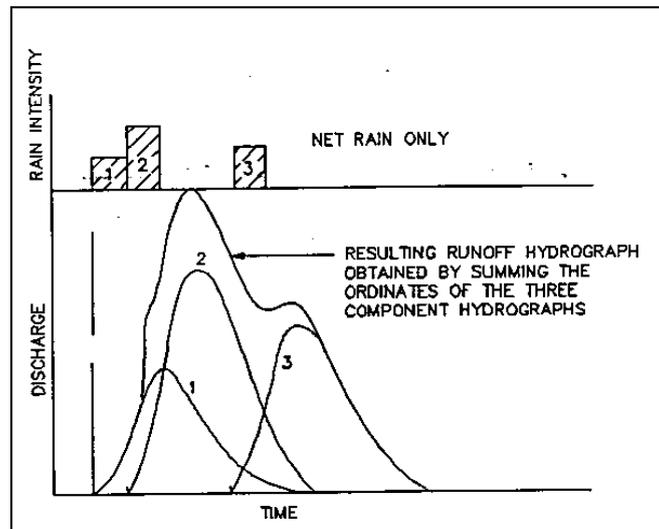
Il metodo dell'idrogramma unitario è un semplice modello lineare che può essere usato per derivare l'idrogramma risultante da un qualsiasi quantitativo di pioggia netta.

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

Le seguenti ipotesi sono alla base del metodo:

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

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



Principio di sovrapposizione degli idrogrammi di portata

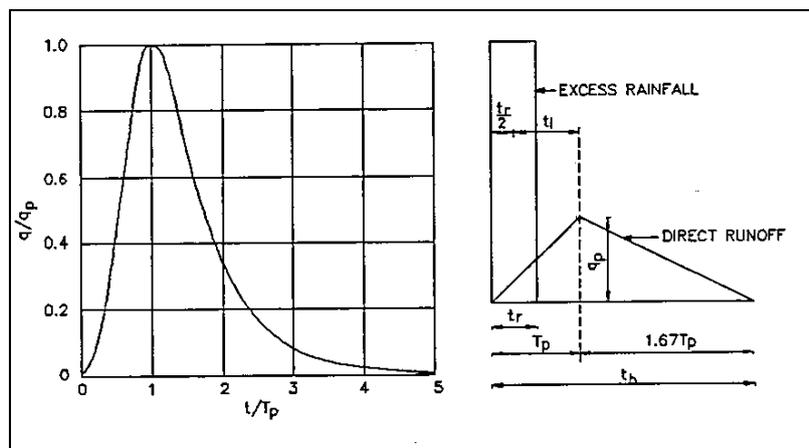
4.4.6 Gli idrogrammi unitari SCS

Un idrogramma unitario è caratterizzato dalla durata della pioggia unitaria (t_r) e dal "lag time" (t_l) definito come la differenza di tempo fra il centro dell'evento unitario di pioggia e il picco di portata. Il tempo di picco (T_p), cioè il tempo dall'inizio dell'evento fino al momento in cui si verifica il picco di portata, può essere calcolato come:

$$T_p = t_r/2 + t_l$$

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

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



Idrogrammi sintetici del Soil Conservation Service

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

$$t_l = (L \cdot 3.28 \cdot 10^3)^{0.8} \cdot (1000/CN - 9)^{0.7} / (1900 \cdot Y^{0.5})$$

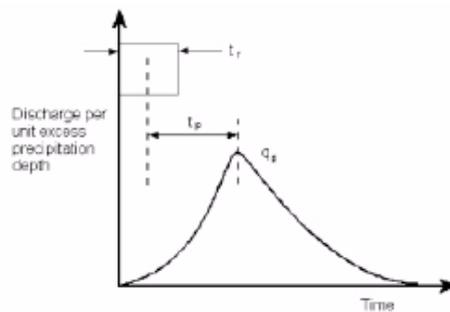
dove:

- t_l = lag time (ore);
- L = lunghezza del bacino [km];
- CN = SCS curve number;
- Y = pendenza media del bacino (%).

Un idrogramma unitario derivato dalle curve area-tempo è considerato specifico del bacino. Di conseguenza non si può specificare un lag time arbitrario se si utilizza tale metodo. Il programma utilizza semplicemente il lag time implicitamente dato dalle curve area-tempo. Il metodo area-tempo implementato nel modulo UHM descrive una pura traslazione dello ietogramma di pioggia netta attraverso la rete di drenaggio superficiale, descritta usando il tempo di percorrenza del canale di flusso. L'idrogramma in uscita ignora quindi gli effetti di immagazzinamento nel bacino.

4.4.7 L'idrogramma Snyder

Il metodo di Snyder, sviluppato sulla base di un'analisi di bacini di dimensioni variabili tra 30 e 30.000 Km², consente di definire i parametri dell'idrogramma unitario in base alle caratteristiche del bacino scolante.



Idrogramma unitario di Snyder

Per l'idrogramma unitario standard, il tempo di lag T_p , in ore, è definito in base alla durata della precipitazione t_r , anch'essa in ore secondo la formula seguente:

$$t_p = 5.5 t_r$$

Per un bacino specifico, il tempo di lag può invece essere calcolato in base alle caratteristiche della superficie scolante come segue:

$$t_p = C_1 C_t (L L_c)^{0.3}$$

dove:

- C_1 = costante pari a 0,75;
- C_t = coefficiente funzione del bacino;
- L = distanza massima lungo il reticolo principale dal limite del bacino alla chiusura, in Km;
- L_c = distanza lungo il reticolo principale dal baricentro del bacino alla chiusura, in Km.

La portata al picco per unità di area drenata è definita come segue:

$$q_p = \frac{C_2 C_p}{t_p}$$

dove:

- q_p = portata specifica al colmo [m³/s/Km²];
- C_2 = costante, pari a 2,75;
- C_p = coefficiente di picco;
- t_p = tempo di lag [ore].

ALLEGATO 3

Descrizione del codice di calcolo MIKE 21 – HD

Il codice di calcolo MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile approssimare il comportamento con l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei: il numero "21" che contraddistingue il codice sta proprio ad indicare la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

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

Equazione di conservazione della massa:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

nelle quali:

- h(x,y,t) = profondità dell'acqua;
- ζ (x,y,t) = quota del pelo libero;
- p,q(x,y,t) = portate unitarie nelle direzioni x e y;
- C(x,y) = coefficiente di scabrezza di Chezy;
- g = accelerazione di gravità;
- f(V) = fattore d'attrito del vento;
- V,Vx,Vy(x,y,t) = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;
- Ω (x,y) = parametro di Coriolis;
- pa (x,y,t) = pressione atmosferica;
- ρw = densità dell'acqua;
- x,y = coordinate spaziali;
- t = tempo;
- τxx, τxy, τyy = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

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

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

1. dipendente dal flusso locale:

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

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Comune di
Milano