



Comune di Livorno
PIANO STRUTTURALE 2

SINDACO
Filippo Nogarin

ASSESSORE all'URBANISTICA
Alessandro Aurigi

Responsabile del Procedimento
Paolo Danti

**GARANTE DELL'INFORMAZIONE
E DELLA PARTECIPAZIONE**
Massimo Mannoni

PROGETTISTI

A.T.I. composta da
Gregotti Associati International s.r.l.- Milano
(mandataria)- Arch. Augusto Cagnardi
SINTESIS s.r.l.- Livorno- Ing. Renato Butta
MODIMAR s.r.l.- Roma- Ing. Marco Tartaglioni

CONSULENZA ASPETTI IDRAULICI

PRIMA Ingegneria STP
Ing. Pietro Chiavaccini
Ing. Maurizio Verzoni
Ing. Nicola Buchignani
Ing. Iunior Nicola Verzoni



QUADRO CONOSCITIVO IDRAULICO

RELAZIONE ILLUSTRATIVA

**IDR
R01**

foglio

unico

scala

Rev1-Gennaio 2019

INDICE

1.	INTRODUZIONE	3
1.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	3
1.2	DOCUMENTAZIONE DI SUPPORTO	3
2.	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	4
2.1	INTERVENTI IDRAULICI PREGRESSI	5
2.1.1	F. FELCIAIO E QUERCIAIO	5
2.1.2	RIO MAGGIORE.....	6
2.1.3	RIO CIGNOLO.....	7
2.1.4	TORRENTE UGIONE.....	8
3.	IDROLOGIA.....	9
3.1	PLUVIOMETRIA.....	9
3.2	AGGIORNAMENTO DELLE CURVE POST EVENTO	10
3.3	IETOGRAMMI.....	11
3.4	PERDITE IDROLOGICHE.....	11
3.5	TRASFORMAZIONE AFFLUSSI-DEFLUSSI.....	13
3.5.1	RISULTATI DEL MODELLO AFFLUSSI-DEFLUSSI PER IETOGRAMMI COSTANTI	17
3.5.2	CONFRONTO CON STUDI ESISTENTI.....	22
3.5.3	CURVA DI REGRESSIONE	23
4.	PROBLEMATICHE RISCONTRATE.....	25
5.	APPROFONDIMENTI.....	28
5.1	T. UGIONE	29
5.2	FOSSO DELLA PUZZOLENTE E FOSSO VALLELUNGA.....	37
5.1	FOSSO DELLA CIGNA E CIGNOLO	41
5.1	FOSSO FELCIAIO E QUERCIAIO	54
5.1.1	ASPETTI IDRAULICI CONNESSI AL RIO FELCIAIO.....	54
5.1.2	FOSSO FELCIAIO E QUERCIAIO	72
5.1	RIO ARDENZA	76
5.2	FOSSO DELLA BANDITELLA E BACINI DI MONTENERO	84
5.3	BOTRO DELLE PIANACCE	92
5.4	BACINI DI QUERCIANELLA	95
5.5	ALTRI CORSI D'ACQUA.....	104
5.5.1	SCOLMATORE.....	104
5.5.2	VERIFICHE DELLA CAPACITÀ	108
5.6	ANALISI IN MOTO VARIO ED ESONDAZIONI	110
5.6.1	FOSSO DELLE ACQUE CHIARE E TORRETTA	117
5.1	DRENAGGIO URBANO	118
6.	PERICOLOSITA' IDRAULICHE	121
7.	CONCLUSIONI.....	122

1. INTRODUZIONE

Il presente studio è predisposto come aggiornamento di quadro conoscitivo della pericolosità idraulica del piano strutturale del Comune di Livorno.

Lo studio è stato sviluppato secondo la presente procedura:

- Acquisizione di studi e rilievi esistenti;
- Analisi dei dati topografici ed integrazione dei rilievi esistenti;
- Analisi idrologica ed idraulica;
- Confronto con gli studi esistenti per la taratura dei modelli;
- Analisi delle aree inondabili e delle classi di pericolosità;

Si tiene conto delle informazioni e del quadro aggiornato a seguito dell'evento alluvionale del 9-10 settembre 2017 cui sono seguiti sia interventi di ripristino sui corsi d'acqua sia progetti di messa in sicurezza e studi di approfondimento che hanno fornito nuovi elementi di studio.

1.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

DIRETTIVA 2007/60/CE "Valutazione e gestione dei rischi di alluvioni"

DPGR 53/R 2011 "Regolamento di attuazione dell'articolo 62 della legge regionale 3 gennaio 2005, n.1 (Norme per il governo del territorio) in materia di indagini geologiche.

L.R. 21/2012 "Disposizioni urgenti in materia di difesa dal rischio idraulico e tutela dei corsi d'acqua.

PGRA Piano di gestione rischio Alluvioni – Distretto Appennino Settentrionale – Dicembre 2015

1.2 DOCUMENTAZIONE DI SUPPORTO

Ai fini della predisposizione dello studio, i seguenti elaborati hanno costituito documentazione di supporto:

- Indagine e progettazione per il riassetto idraulico di piccoli bacini imbriferi nell'area di Quercianella Volumi I° e II°, Geoplan, 1996;
- Studio idraulico del Querciaio-Felciaio, Prof. Samuele Cavazza, 1996;
- Progetto esecutivo per la realizzazione di n. 2 casse d'espansione sul Felciaio-Querciaio, 1997;
- Studio dei deflussi dei Rii Cigna e Cignolo in relazione alla Porta a Terra, Prof. Pier Gino Megale, 1997;
- Progetto esecutivo della cassa d'espansione in destra idraulica del Rio Cignolo, 2003
- Studio idraulico dei bacini Botro Molino Nuovo e Rio Vallecorsa, Prof. Alessandro Peruginelli, 1997;
- Studio idraulico del Botro Banditella – Loc. Montenero, Comune di Livorno - Dott. Geol. Leonardo Gonnelli, 1998;
- Studio idraulico del bacino del Rio Cigna, Prof. Stefano Pagliara, 2002;
- Progetto esecutivo per la realizzazione di n. 1 cassa d'espansione in sinistra idraulica del Rio Cigna, 2010;
- Studio idraulico del bacino del Rio Maroccone, Ing. Della Casa - Provincia di Livorno, 2003;
- Progetto esecutivo della cassa d'espansione in sinistra idraulica lungo il Torrente Ugione;
- Studio idraulico per il miglioramento dell'assetto del tratto terminale del Torrente Ugione, Prof. Stefano Pagliara, 2004;
- Carte della pericolosità del Piano di Assetto Idrogeologico, 2004;
- Interventi idraulici globali torrente Ugione ed Acqua Puzzolente – Progetto esecutivo Provincia di Livorno e Consorzio Bonifico Ufficio Fiumi e Fossi di Pisa

- Studio idraulico del bacino del Rio Maggiore ed ottimizzazione delle opere di messa in sicurezza, Prof. Stefano Pagliara, 2004-2008;
- Progetto esecutivo per la realizzazione di n. 4 casse d'espansione lungo il Rio Maggiore, 2011;
- Studio idraulico del Rio Ardenza, Prof. Stefano Pagliara, 2005;
- Progetto definitivo per la messa in sicurezza idraulica del tratto terminale dello Scolmatore d'Arno, 2011;
- Aggiornamento Studio idraulico del Rio Cigna, Prof. Stefano Pagliara 2012;
- Studio idraulico del Botro Prugnoliccia, Prof. Stefano Pagliara 2013.
- ALTO- Alluvioni in Toscana- Regione Toscana – Aggiornamento 2007
- Provincia di PISA “Adeguamento idraulico del Canale Scolmatore d’Arno”- Progetto definitivo- 2013
- Ing. Pietro Chiavaccini “Studio Idrologico idraulico a supporto del Regolamento Urbanistico del Comune di Collesalveti” 2008
- Prof. Ing. Stefano Pagliara, “Studio idrologico–idraulico finalizzato al piano convenzionato di lottizzazione in loc. Guasticce”- Agosto 2008 Comune di Collesalveti;
- Prof. Ing. Stefano Pagliara “Studio idraulico del tratto terminale del T. Ugione” –Comune di Livorno
- Ing. Daniela Giannatiempo “Studio Idrologico ed idraulico del Torrente Ugione a supporto della pianificazione di Bacino”- 2004- Tesi di Master di I Livello- Università di Firenze
- Provincia di Pisa, Dipartimento del Territorio Servizio Difesa del Suolo e Protezione Civile U.O. Opere Idrauliche e Marittime, “Progetto Preliminare – Adeguamento Idraulico e Navigabilità del Canale Scolmatore d’Arno” – Settembre 2008;
- Dati Topografici Lidar – Volo 2009- Fonte Comune di Livorno
- Ricostruzione idrologica dell'evento del 9/10 settembre 2017 nella provincia di Livorno (bacini da Ugione a Chioma compresi) - Prof. Ing. Fabio Castelli- Gen. 2018

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Lo studio copre un'estensione di circa 100 km² ed interessa in parte anche i territori del Comune di Collesalveti e di Rosignano Marittimo.

Il deflusso delle acque è assicurato da un complesso sistema di aste fluviali che è possibile schematizzare in diversi bacini e sottobacini.

In Tabella 1 sono riportati le principali caratteristiche degli stessi.

Tabella 1 Caratteristiche dei bacini

ID	S (km ²)	ID	S (km ²)
Ardenza1	0.96	Governatore1	0.19
Ardenza2	0.33	Governatore2	0.11
Ardenza3	0.28	Limoncino	0.79
Ardenza4	2.34	Malpasso1	0.33
Ardenza5	9.03	Malpasso2	0.10
Banditella	0.82	Malpasso3	0.03
Boccale	0.10	Maroccone	2.14
Calafuria1	0.33	Molino1	1.16
Calafuria2	0.47	Molino2	2.71
Calignaia	1.63	Pacchiano	0.20
Casine-Prugnoliccia	1.57	Pianacce	0.64
Chioma 1	7.94	Picchianti 2	0.92
Chioma 2	5.03	Picchianti1	1.01

Cigna1	0.45	Puzzolente	6.53
Cigna2	1.80	QU2-1	0.09
Cigna3	1.29	QU2-2	0.04
Cignolo	3.86	Quarata	5.60
Felciaio1	0.88	Querciaio	0.35
Felciaio2	0.59	Quercianella1	1.60
Felciaio3	0.87	Quercianella2	0.39
Fichi	0.23	Rio Maggiore1.1	1.08
Forconi	0.19	Rio Maggiore1.2	1.02
Forconi-Albatro	1.22	Rio Maggiore1.3	0.49
Fosso del Convento 1	0.05	Rio Maggiore2	0.30
Fosso del Convento 2	0.08	Rio Maggiore3	3.84
Fosso del Convento 3	0.03	Rio Maggiore3-1	1.44
Fosso Madonnina 1	0.23	Rio Vallelunga	2.43
Fosso Madonnina2	0.23	Rogiolo	0.47
Fosso Madonnina3	0.04	Romito	0.21
Fosso Stazione 1	0.15	Sanguigna	0.13
Fosso Stazione 2	0.05	Stringaio	0.40
Fosso Vallelunga	4.26	Ugione 1	8.89
Giorgia1	0.75	Ugione 2	1.43
Giorgia2	0.57	Vallecorsa	0.79

2.1 INTERVENTI IDRAULICI PREGRESSI

Il territorio è stato oggetto di diverse attività di manutenzione e di miglioramento ai fini della riduzione del rischio idraulico. Di seguito si illustrano le principali caratteristiche degli interventi che si sono susseguiti sui vari corsi d'acqua. Si trascurano gli interventi di manutenzione che non hanno modificato le capacità idrauliche della rete.

2.1.1 F. FELCIAIO E QUERCIAIO

L'intervento eseguito negli anni '90 è consistito nella realizzazione di due casse di laminazione.

- la prima cassa (Figura 1) è su una superficie di circa 2700 mq e con un franco di 1 m rispetto alla sommità dell'argine di contenimento ha una capacità di 4250 mc. Posta in sinistra idraulica del T. Felciaio ha uno sfioratore di circa 10 m di lunghezza ed entra in funzione per una portata di 4.25 mc/s. La laminazione determina una diminuzione della portata da 5.85 mc/s a 4.20 mc/s
- la seconda cassa (Figura 2) è su una superficie di circa 1600 mq e con un franco di 1 m rispetto alla sommità dell'argine di contenimento ha una capacità di 3850 mc. Posta in destra idraulica del T. Felciaio a valle della confluenza con il T. Querciaio ha uno sfioratore di circa 16.6 m di lunghezza ed entra in funzione per una portata di 15.9 mc/s. La laminazione determina una diminuzione della portata da 18.59 mc/s al valore limite della capacità del corso d'acqua che al tombamento di via di Popogna presenta capacità di 15.9 mc/s.



Figura 1 Cassa n.1 sul T. Felciaio



Figura 2 Cassa n.2 sul T. Felciaio

2.1.2 RIO MAGGIORE

L'intervento presso il Rio Maggiore è stato messo in atto a seguito dell'approvazione del Piano di Lottizzazione del Nuovo Centro ed ha visto una serie d'interventi tra l'attraversamento di Via dell'Uliveta ed il tombamento di Via Cattaneo consistenti in risagomature arginali e nuove casse di espansione. In particolare sono state eseguite 4 casse di cui 3 in sinistra idraulica ed una in destra idraulica come indicato in Figura 3. Il volume delle singole casse è:

- RM2: 60.000 mc
- RM3 50.000 mc
- RM3-bis:50.000 mc
- RM4: 50.000 mc

Leggere modifiche in corso d'opera sono state effettuate per la cassa 2 (non è realizzata la parte in destra idraulica) e per la cassa 4 (eseguita solo la parte in sponda sinistra). Gli effetti attesi sono una riduzione delle portate da circa 97 mc/s a circa 48.2 mc/s a valle della Cassa 2 e da circa 109.4 mc/s a 60 mc/s a valle del sistema di casse 3-3bis e 4. Globalmente secondo le indicazioni progettuali la portata si riduce da 114.8 a 67.9 mc/s,. Fondamentale per il funzionamento del sistema di casse risulta la sistemazione del ponte di via dell'Uliveta, attualmente ancora non eseguita.



Figura 3 Interventi sul Rio Maggiore

2.1.3 RIO CIGNOLO

L'intervento realizzato negli anni 2000 consiste in una cassa di espansione (Figura 4) per una superficie complessiva di circa 150000 mq capace di invasare un volume di almeno 50000 mc. Come evidenziato negli studi del Prog. Gino Megale, il funzionamento della cassa è stato ipotizzato per rendere nulla la portata a valle della stessa, in modo da non incidere sui deflussi del T. Cigna. Sussistono comunque limitazioni al funzionamento della cassa dovute all'inadeguatezza del ponte di via dei Condotti Vecchi che determina allagamenti a monte.



Figura 4 Cassa di espansione sul rio Cignolo

2.1.4 TORRENTE UGIONE

Nell'anno 2012 il Torrente Ugione è stato oggetto di un intervento di ricalibratura del corso d'acqua su progetto del Consorzio di Bonifica delle Colline Livornesi che lo ha in gestione (Figura 5). L'intervento ha visto un innalzamento delle sommità arginali per un tratto di circa 810 m, con il conseguente miglioramento della capacità di deflusso.

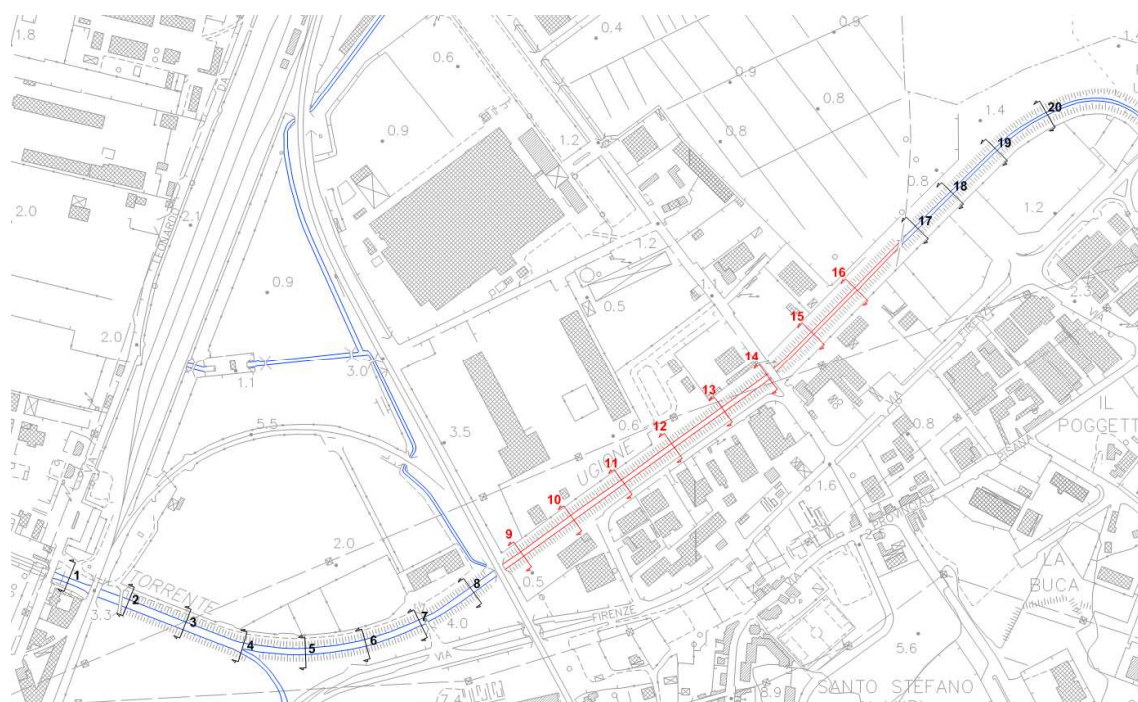


Figura 5 Interventi sul T. Ugione (fonte Consorzio di Bonifica Colline Livornesi)

3. IDROLOGIA

La base idrologica è stata assunta quella indicata dal Prof. Castelli nel report idrologico a seguito dell'evento. La metodologia adottata dal prof. Castelli prevede l'applicazione di un modello a parametri distribuiti denominato Mobidic, Il modello è stato applicato su quasi tutte le aste del reticolo ex LR 79/2012 per diversi tempi di ritorno.

3.1 PLUVIOMETRIA

Nel mese di aprile 2014 sono state definitivamente presentate le nuove curve di possibilità climatica regionale, derivate da un accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012, al fine di procedere ad un'implementazione e un aggiornamento del quadro conoscitivo idrologico del territorio toscano. Le nuove curve fanno riferimento un aggiornamento dell'analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme fino all'anno 2012 compreso. La metodologia prevede l'individuazione dei parametri di una legge di tipo nomomia $h=at^n$ su celle di 1x1km sull'intero territorio regionale e per diversi tempi di ritorno. Per ogni topoioto analizzato si sono individuati i parametri a ed n medi per l'area di interesse e per vari tempi di ritorno. I parametri riassuntivi per i vari topoioti analizzati sono indicati in Tabella 2.

Tabella 2 Parametri delle curve di possibilità climatica Regione Toscana 2014

STAZIONE	Tr200		Tr100		Tr30	
	a	n	a	n	a	n
Livorno	109.54	0.3166	97.982	0.2990	78.7520	0.2532
Quercianella	101.42	0.3087	90.72	0.2911	72.9150	0.2452
Valle Benedetta	99.0600	0.300	88.6090	0.2824	85.0101	0.2519
Collesalveti	84.0747	0.2843	75.9430	0.2768	60.8980	0.2587
Stagno	93.81	0.2823	84.060	0.27478	67.2741	0.2566

Tutte le curve sono definite per durate >1h. A favore di sicurezza si possono usare gli stessi parametri a ed n per durate inferiori ad 1h.

3.2 AGGIORNAMENTO DELLE CURVE POST EVENTO

Nel report idrologico del Prof. Castelli redatto a seguito dell'evento è stato eseguito un aggiornamento delle curve di possibilità climatica in modo da tenere conto anche della pluviometria accorsa la notte tra il 9 ed il 10 settembre.

Tabella 3 Parametri delle curve di possibilità climatica aggiornati a seguito dell'evento alluvionale del 2017

STAZIONE	Tr200		Tr100		Tr30	
	a	n	a	n	a	n
Livorno	109.95	0.3172	97.2217	0.3085	80.4877	0.2866
Quercianella	118.0135	0.2802	105.9390	0.2729	84.8526	0.2444
Valle Benedetta	118.41	0.2776	106.2524	0.2703	85.0101	0.2519
Collesalvetti	92.0154	0.2907	82.8332	0.2864	66.7230	0.2758
Stagno	94.7076	0.2823	85.4480	0.2874	69.2714	0.2763

Per tempi di ritorno diversi è possibile impiegare formule interpolanti (regressione di tipo logaritmica sia per a che per n del tipo $a=\alpha\ln(\text{Tr})+\beta$ ed $n=\gamma\ln(\text{Tr})+\delta$ come indicato in Tabella 4) ottenendo i risultati di Tabella 5.

Tabella 4 Coefficienti delle regressioni dei parametri a ed n della curva di possibilità climatica aggiornata a seguito dell'evento alluvionale del 2017

STAZIONE	a		n	
	α	β	γ	δ
Livorno	15.349	27.817	0.0164	0.2316
Quercianella	17.438	25.398	0.0138	0.208
Valle Benedetta	17.610	25.127	0.0137	0.2057
Collesalvetti	13.337	21.374	0.008	0.249
Stagno	13.441	23.666	0.0084	0.2481

Tabella 5 Parametri delle curve di possibilità climatica aggiornati a seguito dell'evento alluvionale del 2017 per tempi di ritorno Tr500 e Tr20 anni

STAZIONE	Tr500		Tr20	
	a	n	a	n
Livorno	123.205	0.334	73.798	0.281
Quercianella	134.048	0.294	77.772	0.249
Valle Benedetta	134.566	0.291	77.882	0.247
Collesalvetti	104.258	0.299	61.328	0.273
Stagno	107.197	0.300	63.932	0.273

Ai fini della definizione delle portate si farà riferimento alla pluviometria che tiene conto dell'evento con i dati di Tabella 3.

Per la distribuzione areale delle precipitazioni è stato impiegato il metodo dei Poligoni di Thiessen. Si trascura il fattore di distribuzione areale delle piogge che date l'estensione dei bacini sarebbe stato di poco inferiore all'unità.

3.3 IETOGRAMMI

L'andamento temporale dell'evento pluviometrico è stato schematizzato ricorrendo ad uno ietogramma sintetico, che pur non rappresentando il reale andamento dell'evento di pioggia, introduce, nelle procedure di trasformazione afflussi-deflussi, una variabilità temporale della pioggia in grado di produrre risultati tali da ritenersi cautelativi. La legge di distribuzione che si introduce rappresenta, in tal modo, lo ietogramma di "progetto" o ietogramma "sintetico". Per lo studio in questione si fa riferimento allo ietogramma ad intensità costante scelto come significativo anche nel report presentato dal Prof. Castelli.

3.4 PERDITE IDROLOGICHE

Per la determinazione delle perdite di bacino è stato utilizzato il metodo del CN del Soil Conservation Service che consente di determinare il deflusso corrispondente allo scorrimento superficiale di bacini per i quali non esistono osservazioni di deflusso.

Il metodo si basa sul concetto che il deflusso superficiale è nullo fino a che non è raggiunto un valore minimo pari alle perdite iniziali I_a . In letteratura tecnica è riconosciuta l'esistenza di una correlazione positiva fra la perdita iniziale I_a e la capacità di ritenzione potenziale S espressa dalla seguente espressione:

$$I_a = 0.2S$$

dove S è la capacità di ritenzione potenziale S cioè la quantità di acqua immagazzinabile nel bacino,

$$\text{definita come: } S = 25.4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right).$$

S dipende da CN (Runoff Curve Number), parametro determinato mediante apposite tabelle in funzione della natura del terreno, del tipo di copertura vegetale e del corrispondente grado di imbibizione.

I valori di CN sono stati mappati per l'intero territorio dalla Regione Toscana nel 2016.

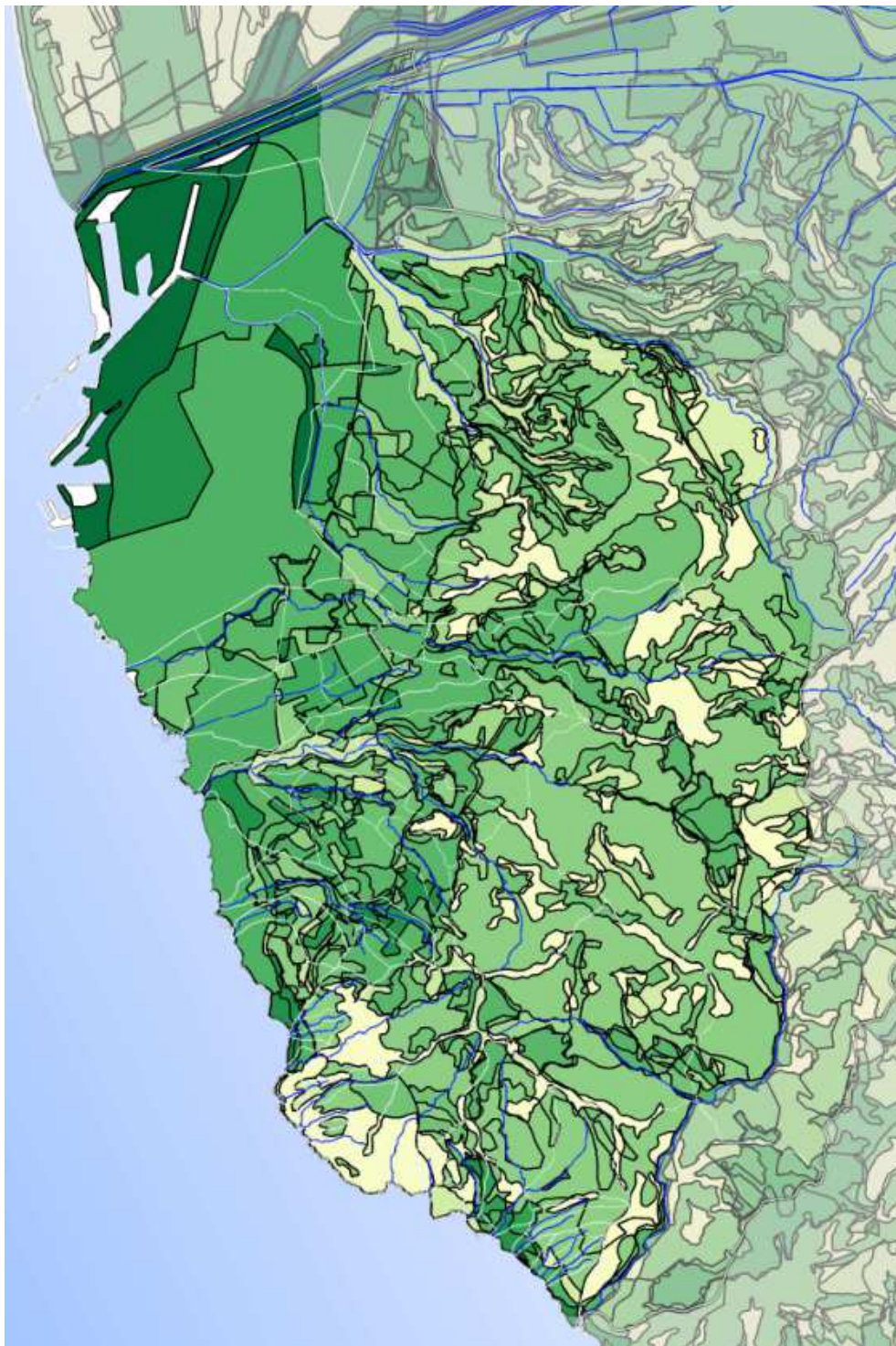


Figura 6 Parametri di CN per i bacini investigati

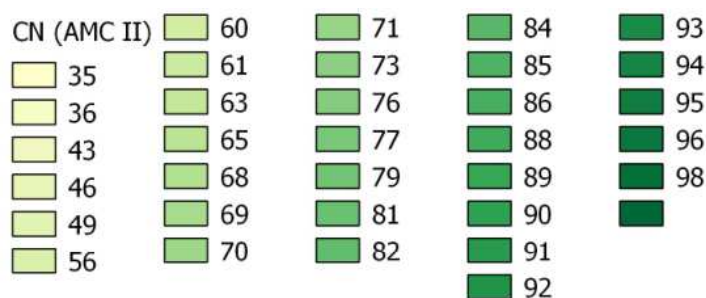


Figura 7 Legenda dei parametri di CN per i bacini investigati

Coerentemente come riportato nello studio del Prof. Castelli si fa riferimento ad una condizione AMC III applicando la formula

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.43 + 0.0057 \cdot CN_{II}}$$

3.5 TRASFORMAZIONE AFFLUSSI-DEFLUSSI

Per la metodologia di trasformazione afflussi deflussi di fa riferimento allo studio del prof. Castelli eseguito con il software Mobidic predisposto dall'Università di Firenze. Essendo un modello non gestibile, si propone anche una metodologia di calcolo facilmente riproducibile anche con software commerciali (HecHms). L'estensione dello studio ed il grado di dettaglio nella suddivisione dei bacini, nonché la diversità delle caratteristiche dei bacini esaminati (di acque alte e basse) ha suggerito l'applicazione di una metodologia che tenesse conto sia dei processi di scorrimento superficiale che del contributo degli invasi e degli immagazzinamenti. Per tale motivo si è scelto il metodo di Clark che esprime l'idrogramma di piena attraverso due parametri: il tempo di corrivazione T_c e la costante di ritardo R . I risultati saranno confrontati con quelli ottenuti dagli studi esistenti oltre che con lo studio del Prof. Castelli ed applicato ad alcuni corsi d'acqua del bacino (si rimanda all'elaborato grafico allegato).

La valutazione del tempo di corrivazione è stata effettuata mediando i valori che si ottengono dal molteplici formulazioni impiegate in letteratura:

- formula di Kerby - Hatheway:

$$T_c = \frac{1}{60} \left(\frac{0.67 \cdot \left(1000 \frac{L}{0.3048} \cdot N \right)^{0.467}}{i^{0.5}} \right)$$

- formula di Giandotti:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8H_m}$$

- formula di Ventura:

$$T_c = 0.127 \left(\frac{A}{i_B} \right)^{0.5}$$

- formula di Kirpich:

$$T_c = 0.0003257 \frac{L^{0.77}}{i_B^{0.385}}$$

- formula di Pasini:

$$T_c = 0.108 \frac{(AL)^{0.33}}{i^{0.5}}$$

- formula di Pezzoli:

$$T_c = 0.055 \frac{L}{i^{0.5}}$$

- formula di Rosso et al:

$$T_c = 0.26 \frac{L^{0.82}}{i_B^{0.2}} (1+S)^{0.13}$$

- formula di Ferro:

$$T_c = 0.675 A^{0.5}$$

- formula PIN Regione Toscana:

$$T_c = \frac{0.17}{0.6} L$$

$$T_c = \frac{0.32}{0.6} A^{0.5}$$

dove A è la superficie del Bacino in Km², L=lunghezza asta in km, i pendenza media del corso d'acqua, i_B pendenza media del bacino, N coefficiente di copertura del suolo (pari a 0.2 per suoli privi di significativa copertura vegetale come è il caso della condizione invernale) e S capacità di ritenzione potenziale (definita attraverso il Curve Number) sopra determinato.

Per il bacino del T. Ugione, il parametro Tc di riferimento è stato determinato con la formula di Kerby (anziché con la media delle varie formulazioni) in quanto i risultati ottenuti risultano maggiormente coerenti con quanto desumibili da altri studi.

Per quanto riguarda il coefficiente di immagazzinamento R si è fatto riferimento alla formula originale di Clark:

$$R = \frac{0.8 \left(\frac{L}{1.60934} \right)}{(i_B \cdot 100)^{0.5}}$$

I parametri riassuntivi dei parametri idrologici per i vari sottobacini analizzati sono riassunti in Tabella 6.

Tabella 6 Parametri riassuntivi del modello Idrologico

ID	Area	CN (III)	Tc	R
Ardenza1	0.96	93	0.80	0.16
Ardenza2	0.33	85	0.70	0.30
Ardenza3	0.28	84	0.51	0.14
Ardenza4	2.34	87	1.09	0.42
Ardenza5	9.03	82	1.46	0.73
Banditella	0.82	91	0.83	0.40
Boccale	0.10	69	0.24	0.09
Calafuria1	0.33	77	0.43	0.20
Calafuria2	0.47	78	0.36	0.11
Calignaia	1.63	80	0.71	0.36
Casine-Prugnolaccia	1.57	92	1.04	0.63
Chioma 1	7.94	82	1.55	0.95
Chioma 2	5.03	83	1.46	0.66

Cigna1	0.45	84	0.69	0.31
Cigna2	1.80	92	1.56	1.48
Cigna3	1.29	85	0.87	0.36
Cignolo	3.86	88	1.28	0.73
Felciaio1	0.88	92	0.94	0.59
Felciaio2	0.59	92	0.63	0.19
Felciaio3	0.87	93	1.11	0.64
Fichi	0.23	92	0.21	0.03
Forconi	0.19	90	0.45	0.17
Forconi-Albatro	1.22	84	0.59	0.20
Fosso del Convento 1	0.05	87	0.21	0.08
Fosso del Convento 2	0.08	86	0.17	0.04
Fosso del Convento 3	0.03	91	0.14	0.03
Fosso Madonnina 1	0.23	83	0.35	0.12
Fosso Madonnina2	0.23	86	0.27	0.07
Fosso Madonnina3	0.04	96	0.16	0.04
Fosso Stazione 1	0.15	86	0.26	0.07
Fosso Stazione 2	0.05	90	0.16	0.03
Fosso Vallelunga	4.26	85	1.58	1.68
Giorgia1	0.75	89	0.80	0.32
Giorgia2	0.57	92	0.53	0.23
Governatore1	0.19	92	0.20	0.03
Governatore2	0.11	94	0.19	0.02
Limoncino	0.79	89	0.59	0.27
Malpasso1	0.33	82	0.32	0.11
Malpasso2	0.10	82	0.22	0.07
Malpasso3	0.03	95	0.13	0.04
Maroccone	2.14	80	0.87	0.49
Molino1	1.16	86	0.93	0.49
Molino2	2.71	81	0.74	0.29
Pacchiano	0.20	62	0.26	0.08
Pianacce	0.64	90	0.56	0.15
Picchianti 2	0.92	94	1.48	0.99
Picchianti1	1.01	94	1.83	1.54
Puzzolente	6.53	85	1.56	1.74
QU2-1	0.09	85	0.21	0.05
QU2-2	0.04	91	0.13	0.02
Quarata	5.60	84	1.15	0.55
Querciaio	0.35	93	0.57	0.19
Quercianella1	1.60	84	0.68	0.29
Quercianella2	0.39	89	0.40	0.09
Rio Maggiore1.1	1.08	91	1.16	0.72
Rio Maggiore1.2	1.02	92	1.13	0.67
Rio Maggiore1.3	0.49	92	1.04	0.62
Rio Maggiore2	0.30	91	0.51	0.13
Rio Maggiore3	3.84	80	1.05	0.51

Rio Maggiore3-1	1.44	89	0.83	0.28
Rio Vallelunga	2.43	85	1.38	1.11
Rogiolo	0.47	81	0.40	0.15
Romito	0.21	60	0.19	0.04
Sanguigna	0.13	87	0.26	0.08
Stringaio	0.40	95	0.46	0.20
Ugione 1	8.89	85	1.61	1.84
Ugione 2	1.43	89	1.48	0.86
Vallecorsa	0.79	91	0.91	0.58

In Figura 8 si riporta la schematizzazione dei bacini per l'implementazione del modello idrologico. Il contributo congiunto di più bacini è assegnato a singoli nodi (junction) o ad aste fluviali in cui si innesca il meccanismo della propagazione delle piene (reach). Quest'ultimo è stato schematizzato secondo il metodo di Muskingum-Cunge per alvei assimilabili a trapezoidali.

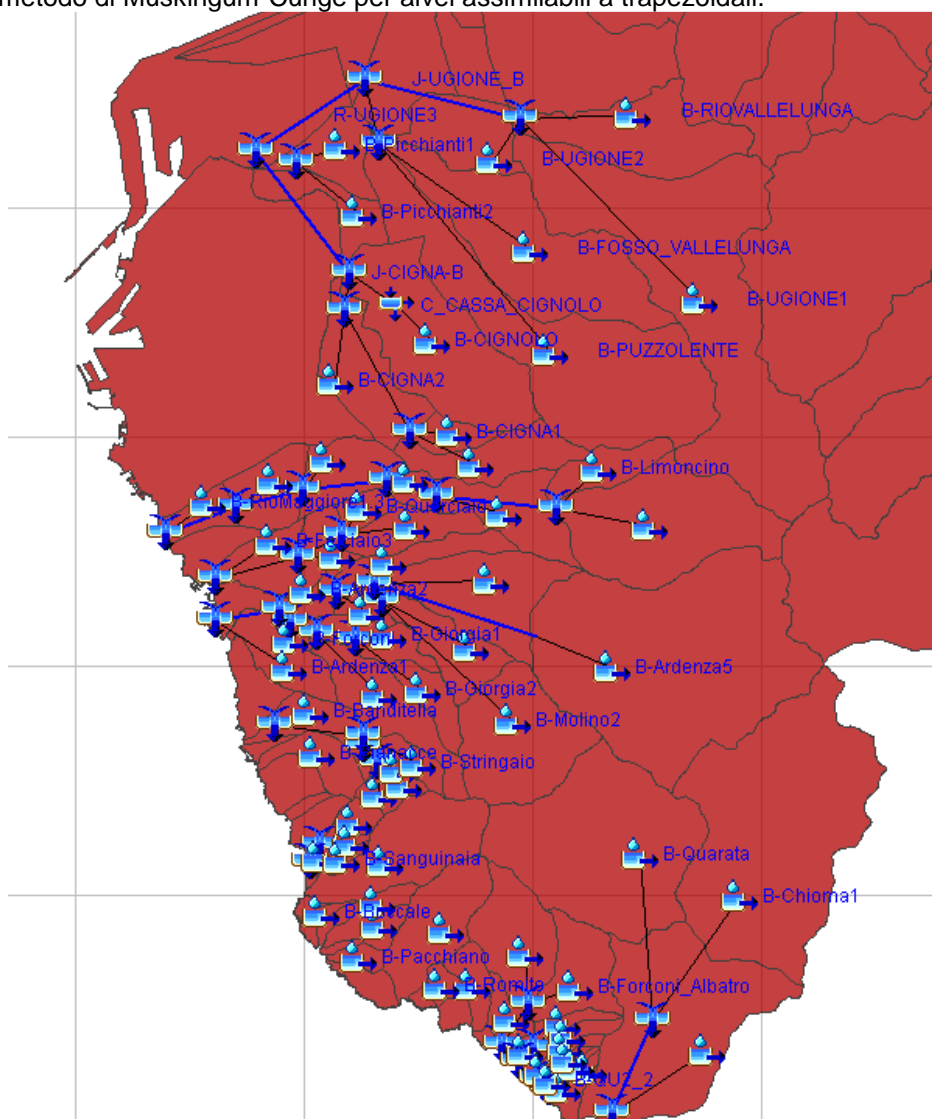


Figura 8. Elementi del modello idrologico

Le durate critiche possono essere definiti a partire dai tempi di corrivazione dei singoli sottobacini. Per i corsi d'acqua di maggiore estensione (T. Ugione, Rio Maggiore, Rio Ardenza, T. Chioma) è necessario considerare anche il tempo di percorrenza dell'asta fluviale nel tratto vallivo (orientativamente gli ultimi 3-4 km) con una velocità della corrente di circa 1.5 m/s. I risultati hanno evidenziato che il massimo delle portate si verifica per quasi la totalità dei bacini in un intervallo compreso tra 0.5e 3h (Tabella 7).

Tabella 7 Durate critiche dei bacini

BACINO	DURATA CRITICA (h)
Boccale	0.5
Calafuria1	0.5
Calafuria2	0.5
Convento	0.5
Madonnina	0.5
Malpasso	0.5
Pacchiano	0.5
QU	0.5
Rogiolo	0.5
Romito	0.5
Sanguinaia	0.5
Stazione	0.5
Pianacce	0.75
Quercianella	0.75
Banditella	1
Calignaia	1
Maroccone	1
Felciaio	1
Ardenza	2
Chioma	2
Picchianti	2
RioMaggiore	2
Ugione	3

3.5.1 RISULTATI DEL MODELLO AFFLUSSI-DEFLUSSI PER IETOGRAMMI COSTANTI

I risultati sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 8 Portate massime per diversi tempi di ritorno e per le durate critiche nell'ipotesi di ietogramma costante

ID	Durata critica	A (km ²)	Q (mc/s)	
			Tr200	Tr30
B-Ardenza1	2h	0.96	17.1	12.0
B-Ardenza2	2h	0.33	5.5	3.6
B-Ardenza3	2h	0.28	5.0	3.3
B-Ardenza4	2h	2.34	38.8	25.1
B-Ardenza5	2h	9.03	112.0	68.5
B-Banditella	1h	0.82	18.2	12.2
B-Boccale	0.5h	0.1	2.0	1.0
B-Calafuria1	0.5h	0.33	6.8	3.9
B-Calafuria2	0.5h	0.47	12.4	7.5
B-Calignaia	1h	1.63	28.8	17.4
B-Chioma1	2h	7.94	88.3	53.9
B-Chioma2	2h	5.03	65.7	40.4
B-CIGNA1	3h	0.45	6.1	4.0
B-CIGNA2	3h	1.8	20.0	13.8
B-CIGNA3	3h	1.29	17.4	11.3
B-CIGNOLO	3h	3.86	48.4	31.8
B-Felciaio1	1h	0.88	16.2	10.9
B-Felciaio2	1h	0.59	15.2	10.6
B-Felciaio3	1h	0.87	14.5	10.0
B-Fichi	1h	0.23	7.2	5.1
B-Forconi	2h	0.19	3.6	2.4
B-Forconi_Albatro	0.75h	1.22	26.8	16.3
B-FossoMadonnina1	0.5h	0.23	7.0	4.5
B-Fosso del Convento 1	0.5h	0.05	2.1	1.4
B-Fosso del Convento 2	0.5h	0.08	3.5	2.3
B-Fosso del Convento 3	0.5h	0.03	1.5	1.0
B-Fosso_Madonnina2	0.5h	0.23	8.7	5.6
B-Fosso_Madonnina3	0.5h	0.04	2.1	1.5
B-Fosso_stazione1	0.5h	0.15	5.7	3.7
B-Fosso_stazione2	0.5h	0.05	2.4	1.6
B-FOSSO_VALLELUNGA	3h	4.26	38.6	24.3
B-Giorgia1	2h	0.75	13.5	8.9
B-Giorgia2	2h	0.57	11.0	7.5
B-Governatore1	1h	0.19	6.0	4.2
B-Governatore2	1h	0.11	3.5	2.5
B-Limoncino	2h	0.79	14.7	9.8

ID	Durata critica	A (km ²)	Q (mc/s)	
B-Malpasso1	0.75h	0.33	8.8	5.3
B-Malpasso2	0.75h	0.1	3.0	1.8
B-Malpasso3	0.75h	0.03	1.2	0.8
B-Maroccone	1h	2.14	32.3	19.1
B-Molino1	2h	1.16	18.7	12.0
B-Molino2	2h	2.71	43.7	27.4
B-Pacchiano	0.5h	0.2	2.6	1.2
B-Pianacce	0.75h	0.64	18.6	12.3
B-Picchianti1	2h	1.01	10.7	7.4
B-Picchianti2	2h	0.92	12.4	8.5
B-Prugnolliccia	2h	1.57	25.9	17.3
B-PUZZOLENTE	3h	6.53	58.3	36.8
B-Quarata	2h	5.6	82.1	51.5
B-Querciaio	1h	0.35	9.3	6.5
B-Quercianella1	0.75h	1.6	30.3	18.6
B-Quercianella2	0.75h	0.39	12.5	8.1
B-QU2_1	0.5h	0.09	3.6	2.3
B-QU2_2	0.5h	0.04	1.9	1.3
B-RioMaggiore1.1	2h	1.08	15.9	10.8
B-RioMaggiore1.2	2h	1.02	15.6	10.7
B-RioMaggiore1.3	2h	0.49	7.7	5.3
B-RioMaggiore2	2h	0.3	5.7	3.9
B-RioMaggiore3	2h	3.84	53.5	32.8
B-Riomaggiore3.1	2h	1.44	26.3	17.5
B-RIOVALLELUNGA	3h	2.43	24.8	15.8
B-Rogiolo	0.75h	0.47	11.0	6.7
B-Romito	0.5h	0.21	2.9	1.1
B-Sanguinaia	0.5h	0.13	5.1	3.3
B-Stringaio	1h	0.4	12.2	8.5
B-UGIONE1	3h	8.89	77.8	48.8
B-UGIONE2	3h	1.43	16.9	11.3
B-Vallecorsa	2h	0.79	13.2	8.8
C_CASSA_CIGNOLO	3h	3.86	20.0	18.4
J-ArdenzaA	2h	15.24	198.1	121.4
J-ArdenzaB	2h	16.31	212.7	130.6
J-ArdenzaC	2h	19.72	263.4	163.5
J-ArdenzaF	2h	20.68	275.7	171.2
J-BanditellaF	1h	1.75	43.7	29.7
J-Chioma_Sbocco	2h	13.54	166.3	102.7
J-Chioma-Quarata	2h	18.57	229.6	141.3

ID	Durata critica	A (km ²)	Q (mc/s)	
J-CIGNA-A	3h	1.74	23.5	15.3
J-CIGNA-B	3h	7.4	62.5	47.0
J-CIGNA-C	3h	3.54	42.6	28.6
J-ConventoF	0.5h	0.16	7.0	4.7
J-Convento1	0.5h	0.13	5.6	3.7
J-FelciaioA	1h	1.23	23.8	16.2
J-FelciaioB	1h	1.82	39.1	26.8
J-FelciaioF	1h	2.69	50.9	34.7
J-ForconiA	2h	3.08	53.1	35.5
J-Fosso_MadonninaA	0.5h	0.46	15.0	9.3
J-Fosso_MadonninaF	0.5h	0.5	17.1	10.9
J-Fosso_StazioneF	0.5h	0.2	8.1	5.3
J-GiorgiaA	2h	1.32	24.5	16.4
J-GovernatoreA	1h	0.42	13.2	9.2
J-GovernatoreB	1h	0.53	16.8	11.7
J-MalpassoA	0.75h	0.43	11.7	7.1
J-MalpassoF	0.75h	0.46	12.9	7.9
J-MolinoF	2h	3.87	62.3	39.4
J-PicchiantiF	2h	1.93	22.8	15.6
J-PrugnollicciaA	2h	2.89	49.7	33.2
J-PUZZOLENTE_VALLE	3h	10.79	96.9	61.1
J-QuercianellaA	0.75h	2.82	55.1	34.2
J-QuercianellaF	0.75h	3.21	65.8	40.4
J-QU2F	0.5h	0.13	5.5	3.7
J-RioMaggioreA	2h	4.63	67.3	41.6
J-RioMaggioreB	2h	6.07	91.7	57.5
J-RioMaggioreC	2h	6.37	96.2	60.4
J-RioMaggioreD	2h	7.45	111.1	70.9
J-RioMaggioreE	2h	8.47	125.9	80.2
J-RioMaggioreF	2h	8.96	132.5	85.0
J-StringaioA	1h	0.93	28.9	20.2
J-UGIONE-C	3h	30.94	270.2	177.1
J-UGIONE_A	3h	12.75	118.5	75.0
J-UGIONE_B	3h	23.54	215.1	135.9
R-Ardenza1	2h	19.72	261.7	161.3
R-Ardenza2	2h	16.31	210.5	129.3
R-Ardenza3	2h	15.24	196.8	119.8
R-Ardenza4	2h	9.03	111.6	68.2
R-Chioma2	2h	13.54	165.8	101.7
R-CIGNA-A	3h	7.4	62.3	46.8

ID	Durata critica	A (km ²)	Q (mc/s)	
R-RioMaggiore1.1	2h	6.37	95.1	60.2
R-RioMaggiore1.2	2h	7.45	110.3	69.6
R-Riomaggiore1.3	2h	8.47	124.8	80.0
R-RioMaggiore2	2h	6.07	91.0	57.3
R-RioMaggiore3.1	2h	4.63	66.3	41.3
R-UGIONE2	3h	12.75	118.2	74.8
R-UGIONE3	3h	23.54	213.7	135.0

3.5.2 CONFRONTO CON STUDI ESISTENTI

Al fine di verificare la validità dello schema idrologico adottato si effettua un confronto con i risultati di studi esistenti.

Tabella 9 Portate massime per i bacini con durata critica 6 h

BACINO	Q (m3/s)									FONTE
	PRESENTE STUDIO		PROF Castelli		ALTRI STUDI					
	Tr 200	Tr 30	Tr200	Tr30	Tr 200	Tr 100	Tr 30	Tr25	Tr 20	
Ardenza (sbocco)	275.7	171.2	282	190	274.34					ING. PAGLIARA
					287.00					
Prugnoliccia	25.9	17.3	16.9	12.0	18.40					ING. PAGLIARA
Botro del Molino	62.3	29.4		38.3	89	80				ING. PERUGINELLI
			56		68.57					ING. PAGLIARA
Fosso Vallercorsa	13.2	8.8		7.0	24.70					ING. PERUGINELLI
			9.6		18.21					ING. PAGLIARA
F. Fichi (con Fosso del Governatore)	16.8	11.78	7.5	5.4		21.92				DOTT. GONNELLI
F. Banditella	43.7	29.7	23.2	16.7		31.1		24.8		DOTT. GONNELLI
B. Stringaio (P.zza Carrozze)	12.2	8.5	6.8	5.0		14.0		11.2 4		DOTT. GONNELLI
F. Querciaio	9.3	6.5	3	2.1		7.79				ING. CAVAZZA
F. Felciaio (tombamento via di Popogna)	39.1	26.8	15.6	10.9		26.46				ING. CAVAZZA
Rio Maggiore (Ponte Via Uliveta)	96.2	60.4	95.7	69.6	97.89	86.36			59.94	ING. PAGLIARA
Rio Maggiore (via Cattaneo)	125.9	80.2	101.4	70.4	109.43	96.68			67.39	ING. PAGLIARA
Rio Maggiore (sbocco)	132.5	85.00	101.3	70.0	114.8	101.31			70.58	ING. PAGLIARA
Fosso Cigna (ponte Via Uliveta)	23.5	15.3	20.6	13.9	33.1	29.6			21	ING. PAGLIARA
Fosso Cigna (porta a Terra)	42.6	28.6	27.8	18.2	60.7	53.7			37.8	ING. PAGLIARA
Fosso Cigna (immissione Ugione)	62.5	47	61.06	40.8	112	99.3			70.1	ING. PAGLIARA
Fosso Cignolo (ponte di Via Condotti vecchi)	20	18.4	27.5	18.4	55.1	49			34.7	ING. PAGLIARA
					38.6					Ing. MEGALE
Fosso Puzzolente	58.36	36.8	83.8	56.6	74.35					ING. GIANNATIEMPO/ ING. PAGLIARA
					94.92	79.16			50.96	ALTO

Fosso Vallelunga	38.6	24.3	42.6	24.5	51.86					ING. GIANNATIEM PO/ ING. PAGLIARA
UGIONE PONTE AURELIA	215.1	135.9	265.1	171.7	233.36					ING. PAGLIARA
					228.20		-		-	CONSORZIO BONIFICA
UGIONE- RIO_VALLELUNGA (PONTE VIA AIACCIA)	118.5	75.0	137.3	91.3	117.30		60.00		53.80	BACINO TOSCANA COSTA
					97.64				54.32	ALTO
					187.06					CONSORZIO BONIFICA
UGIONE SBOCCO	270.2	177.1	328.6	214.6	271.11					ING. GIANNATIEM PO/ ING. PAGLIARA
					265.69				148.85	ALTO
MAROCCONE	32.3	19.1	36.7	25.4	47.9					PROVINCIA LIVORNO
ROGIOLO (RG.1)	11.0	6.70			11.41		7.94		7.09	GEOPLAN
BOTRO QUERCIANELLA (AURELIA)	55.1	34.2			47.46		32.69 29.11			GEOPLAN
FOSSO MADONNINA (FINALE)	15.0	9.3			11.56		8.02		7.16	GEOPLAN
FOSSO MADONNINA (AFF. SX)	8.7	5.6			5.02		3.51		3.14	GEOPLAN
FOSSO DELLA STAZIONE	8.1	5.3			4.88		3.40		3.04	GEOPLAN
FOSSO DEL CONVENTO	7	4.7			4.93		3.44		3.08	GEOPLAN
FOSSO DELLA CHIOMA (JQF2)	5.5	3.7			2.65		1.86		1.66	GEOPLAN
T. CHIOMA	229.6	141.3	275.7	184.6	145.01	122.51			80.98	ALTO

I valori di portata sono mediamente più elevati per lo studio in esame rispetto agli studi passati e coerenti quelli del prof. Castelli ad eccezione del T. Chioma e del Bacino del T. Ugione per i quali risultano inferiori.

Nel proseguo della trattazione si farà riferimento per i tratti disponibili ai valori determinati nello studio del Prof. Castelli.

3.5.3 CURVA DI REGRESSIONE

L'applicazione di un metodo di trasformazione afflussi-deflussi omogeneo per tutto il territorio consente di superare le differenze tra studi di diversa origine e di individuare una curva di regressione utile ad individuare le portate anche per bacini o sottobacini non considerati nell'analisi. La curva di regressione è stata definita per le sezioni di chiusura per le quali vi è corrispondenza tra durata critica e portata.

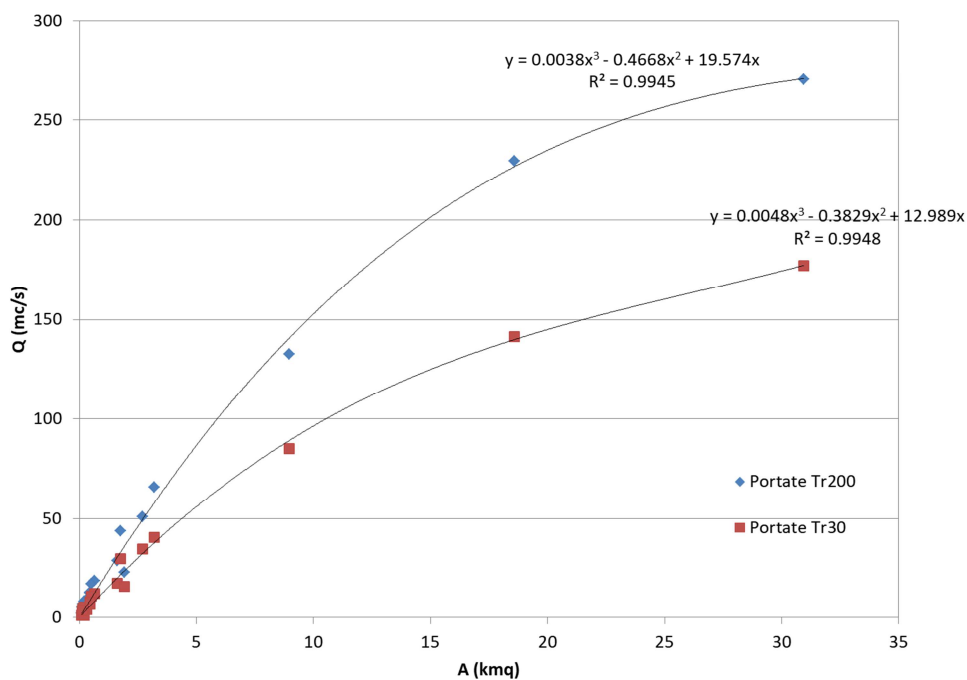


Figura 9 Curva interpolante delle portate in funzione dell'area del bacino sotteso

Le curve per i vari tempi di ritorno, in funzione dell'area A del bacino in km^2 , sono ben rappresentate da una equazione polinomiale:

$$Q_{200} = 0.0038A^3 - 0.4668A^2 + 19.574A$$

$$Q_{30} = 0.0048A^3 - 0.3829A^2 + 12.989A$$

4. PROBLEMATICHE RISCONTRATE

Gli studi messi a disposizione dall'Amministrazione sono sviluppati in maniera coerente con le esigenze di normativa dell'epoca: quelli antecedenti agli anni 2000 presentano valutazioni di capacità idraulica del corso d'acqua relative a situazioni limitate e puntuali, con proposte di risoluzione ed analisi riferibili a modelli monodimensionali ed in moto permanente. In particolare a questa tipologia sono riconducibili gli studi di sistemazione del Rio Querciaio-Felciaio 1996 per la sistemazione idraulica dell'area della Scopaiia ed il progetto di sistemazione del Rio Cignolo del Prof. Megale.

A partire dagli anni 2000, anche sulla messa a regime delle Autorità di Bacino impegnate nella predisposizione dei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) ed alla più chiara definizione delle modalità di esecuzione degli studi da parte dei Enti interessati, si assiste ad una migliore individuazione degli effetti sul territorio riguardanti le tematiche idro-morfologiche e le problematiche reali che vi insistono. Gli studi prodotti in questa "seconda fase" pertanto considerano anche l'andamento delle esondazioni sul terreno, definite attraverso l'impiego di modellazioni bidimensionali. Tali modellazioni sono riferite in gran parte ad eventi con tempi di ritorno di 200 anni in quanto finalizzate ad una completa messa in sicurezza dei corsi d'acqua.

Nel 2005 con il D.C.R.T. n. 13 del 2005 viene approvato il Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) del Bacino Toscana Costa che per competenza costituisce il riferimento delle condizioni di pericolosità idrauliche del Comune. Nelle cartografie di PAI oltre la perimetrazione di ambiti caratterizzati da diverse classi di pericolosità con conseguenti limitazioni agli interventi sul territorio, sono indicate anche le Aree Strategiche per la Sicurezza Idraulica (ASIP) che rappresentano aree destinate ad interventi di messa in sicurezza (in prevalenza casse di laminazione delle piene) e pertanto sottoposte a vincoli edificatori (Figura 10).

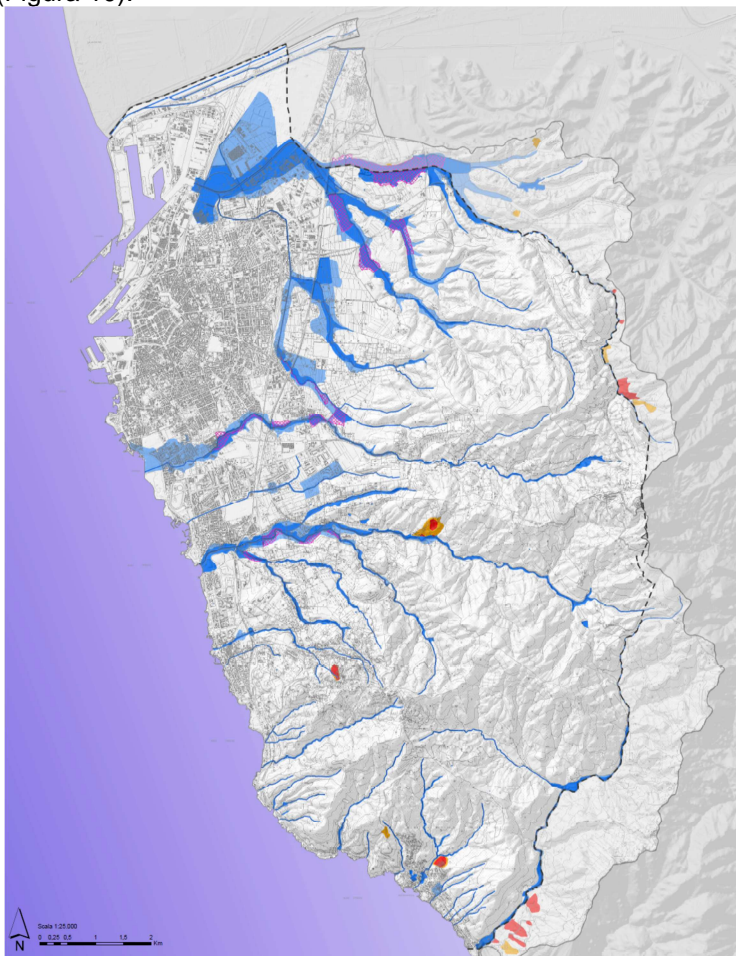


Figura 10 Piano Assetto Idrogeologico (Autorità di Bacino Toscana Costa)

Nel frattempo in virtù anche delle esigenze di messa in sicurezza idraulica delle aree abitate esistenti e di nuove urbanizzazioni (UTOE Nuovo Centro e Borgo di Magrignano) sono stati resi esecutivi i progetti di sistemazione del Rio Maggiore (con la previsione di 4 casse di espansione) e del Rio Cigna (con la previsione di 1 cassa di espansione ed una zona di espansione del deflusso a valle del ponte di Via dell'Uliveta). Tali progetti hanno visto la realizzazione ed il completamento dei soli interventi pertinenti il Rio Maggiore mentre risultano iniziati, ma non ancora completati, quelli previsti lungo il Rio Cigna.

Altri approfondimenti sono stati effettuati per specifici ambiti, in particolare per il Rio Ardenza ed il Rio Cigna in prossimità della Stazione FF.SS. Si tratta comunque di studi parziali riferiti alle sole esondazioni con tempo di ritorno duecentennale e che non definiscono carte per eventi inferiori. Si fa notare inoltre che si tratta di studi non validati dall'Autorità di Bacino (A.d.B.) per carenze e mancanze sia analitiche che procedurali.

Per quanto riguarda il territorio a nord, le problematiche sono relative al Torrente Ugione ed ai suoi affluenti (Fosso Vallenga e Rio della Puzzolente). In questo caso l'attenuazione del rischio e la messa in sicurezza sono previste attraverso la realizzazione di un sistema di casse di espansione in aree per lo più coincidenti con le ASIP del PAI. I relativi progetti, di competenza prima della Provincia di Livorno ed ora passati alla Regione Toscana, sono a diversi stati di definizione, e di questi quelli appaltabili sono fermi per problemi legati a finanziamenti ed espropri.

Allo stato attuale il quadro che emerge è pertanto così riassumibile:

- il Rio Maggiore è stato oggetto di interventi di messa in sicurezza (Figura 11) dal ponte di Via dell'Uliveta fino al tratto tombato a valle di Via Cattaneo);



Figura 11 Sistema delle casse di espansione sul Rio Maggiore

- la messa in sicurezza del Rio Cigna nell'area di Borgo di Magrignano è in fase di completamento e gli effetti sulla riduzione del rischio idraulico devono essere rivalutati in maniera specifica (Figura 12);



Figura 12 Cassa di espansione del Rio Cigna in fase di realizzazione

- gli studi idraulici del territorio urbano riguardano solo il Rio Ardenza, il Rio Cigna ed il Botro Prugnoliccia e sono riferiti solo ad eventi con $Tr=200$ anni;
- gli altri corsi d'acqua presentano solo valutazioni sulle capacità di deflusso e su problematiche locali e non consentono di definire l'estensione delle esondazioni.

Si è pertanto proceduto all'esecuzione di nuove analisi delle esondazioni, in particolare sulle aree di più rilevanti dal punto di vista urbanistico e ritenute più critiche. In particolare (procedendo da nord a sud):

- T. Ugione
- Fosso della Puzzolente e Fosso Vallelunga
- Rio Cigna e T. Cignolo
- Fossi Querciaio e Felciaio
- Rio Ardenza
- Rio Banditella comprensivi dei bacini di Montenero (Fosso dei Fichi, del Governatore e botro Stringaio)
- Bacini di Quercianella
- T. Chioma

L'assetto morfologico del territorio è stato determinato con il dato Lidar con cui sono state definite anche le sezioni per le modellazioni idrauliche (modellazioni 1D/2D). Dove disponibili sezioni topografiche da rilievi sono stati adottati questi ultimi. IN particolare per il Rio Ardenza si è fatto riferimento ai rilievi eseguiti subito dopo l'evento alluvionale. Per quanto riguarda i manufatti di attraversamento, dove non disponibili e sulla base delle indicazioni di criticità del PAI si è ipotizzato un restringimento localizzato con riduzione di sezione pari al 15 % di quella immediatamente a monte (ottenuta da dato lidar).

Il Rio Maggiore è in corso di studio da parte della Regione Toscana e pertanto, in attesa dei risultati definitivi, che dovranno verificare il corretto funzionamento del sistema delle casse e l'eventuale pericolosità residua si fa riferimento alla pericolosità del vigente PGRA.

5. APPROFONDIMENTI

Le modellazioni sono state eseguite mediante il software TufLOW® tra i prodotti leader per le analisi idrauliche. Il modello simula propagazioni in campo puramente bidimensionale o in un dominio 1D/2D, in cui i canali sono analizzati nel dominio 1D e nell'evenienza in cui il livello liquido raggiunga la sommità si innesca la propagazione bidimensionale sul territorio circostante. L'interfaccia 1D-2D è di tipo bidirezionale, cioè consente la propagazione da e verso il canale, ovviamente in base alle condizioni topografiche. La costruzione del modello digitale del terreno è realizzata mediante l'utilizzo di punti georeferenziati di coordinate x,y,z frutto dell'acquisizione Lidar. Nel modello sono inseriti gli edifici e la rete delle infrastrutture (strade e ferrovia). La definizione dei coefficienti di scabrezza è stata fatta distinguendo il moto nei canali e quello nella piana alluvionale. Nel primo caso si sono considerati valori compresi tra $n=0.03$ e $n=0.045$ a seconda del grado di manutenzione. Nel secondo si è fatto riferimenti a valori di letteratura associati ai codici di uso del suolo del Land Corine Cover (vedere C.J. van Der Sande et al, A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment", International Journal of applied earth observation and geoinformation, 2003, Lopes et al Flooding assessment under sea level rise scenarios: Ria de Aveiro case, Journal of coastal research, 2013), riassunti in Tabella 10.

USO DEL SUOLO	Codice CORINE	Manning n
Tessuto Urbano continuo	111	0.14
Tessuto Urbano discontinuo	112	0.09
Aree industriali o commerciali	121	0.14
Reti stradali e ferroviarie e spazi accessori	122	0.07
Aree portuali	123	0.07
Aeroporti	124	0.06
Aree estrattive	131	0.12
Discariche	132	0.04
Cantieri	133	0.06
Aree verdi urbane	141	0.02
Aree ricreative e sportive	142	0.04
Seminativi in aree non irrigue	211	0.08
Seminativi in aree irrigue	212	0.08
Risaie	213	0.04
Vigneti	221	0.12
Frutteti e frutti minori	222	0.12
Oliveti	223	0.12
Prati Stabili	231	0.1
Colture temporanee associate a colture permanenti	241	0.08
Sistemi colturali e particellari complessi	242	0.10
Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti	243	0.09
Boschi di latifoglie	311	0.1
Boschi di conifere	312	0.1
Boschi misti	313	0.13
Aree a pascolo naturale e praterie	321	0.11
Brughiere e cespuglieti	322	0.06

Aree a vegetazione sclerofilla	323	0.1
Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione	324	0.1
Spiagge, dune e sabbie	331	0.07
Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti	332	0.07
Aree con vegetazione rada	333	0.09
Aree percorse da incendi	334	0.07
Paludi interne	411	0.10
Saline	422	0.04
Corsi d'acqua, canali e idrovie	511	0.03
Bacini d'acqua	521	0.03

Tabella 10 Coefficienti di scabrezza impiegati nel modello bidimensionale

Le analisi vengono effettuate per scenari di portata con $Tr=30$ anni, $Tr=200$ anni e per la l'evento del settembre 2017 ricostruito dal Prof. Castelli che viene considerato alla stregua della portata con $Tr=500$ anni.

5.1 T. Ugione

I dati a disposizione hanno consentito di effettuare alcuni approfondimenti mirati a valutare l'estensione delle esondazioni. Relativamente al T. Ugione cui sono connesse gran parte delle problematiche dell'area industriale a Nord. L'analisi ha visto sia una valutazione in moto permanente di tipo monodimensionale sia in moto vario bidimensionale.

La prima è stata eseguita utilizzando il codice di calcolo HEC-RAS che è in grado di fornire i profili liquidi dei corsi d'acqua, oggetto della simulazione, basandosi su di un'analisi a moto permanente. La procedura di calcolo si basa sulla soluzione dell'equazione dell'energia con le perdite di carico valutate mediante l'equazione di Manning (assunto per lo studio in esame pari a $n=0.03$, corrispondente a canali in terra in non buone condizioni di manutenzione).

La seconda è stata eseguita con il software TuFlow®. La base topografica è risultata quella Lidar fornita dall'Amministrazione Comunale.

5.1.1.1 Torrente Ugione- analisi in moto permanente

Le verifiche idrauliche monodimensionali (Figura 13) effettuate lungo il corso d'acqua mostrano che gli argini del torrente sono in grado di contenere, seppure con franchi limitati, portate con tempi di ritorno di 20-30 anni fino all'inizio dell'abitato di Stagno, mentre immediatamente a valle della confluenza con il Fosso della Puzzolente si verificano insufficienze diffuse per tutte le portate investigate. La situazione diventa critica essenzialmente per rigurgito indotto da una successione di attraversamenti di sezione inadeguata che comporta innalzamenti del profilo liquido ben oltre le sommità arginali (per esempio attraversamento lungo la via Aurelia -Figura 14).

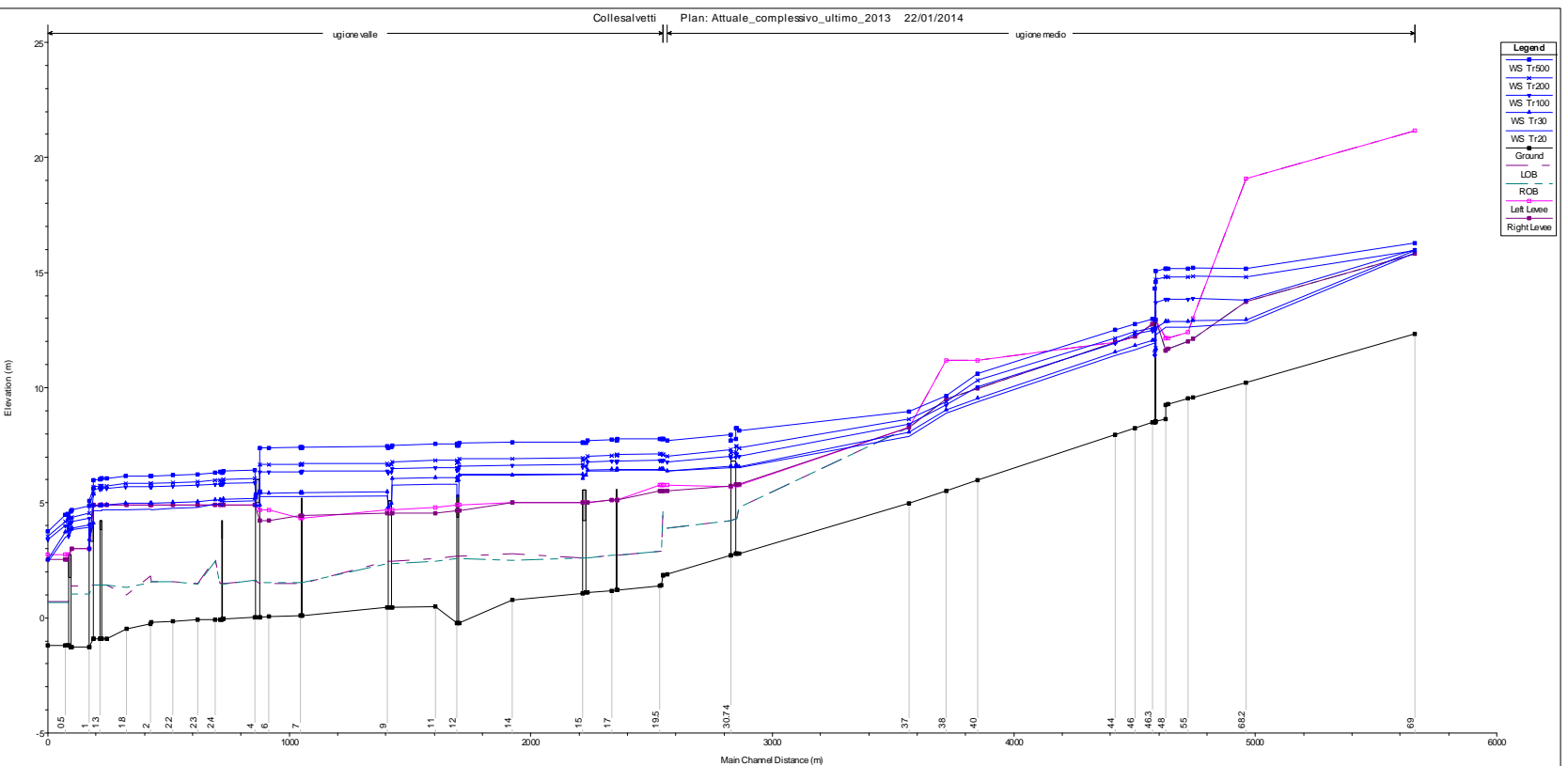


Figura 13 Profilo liquido del torrente Ugione

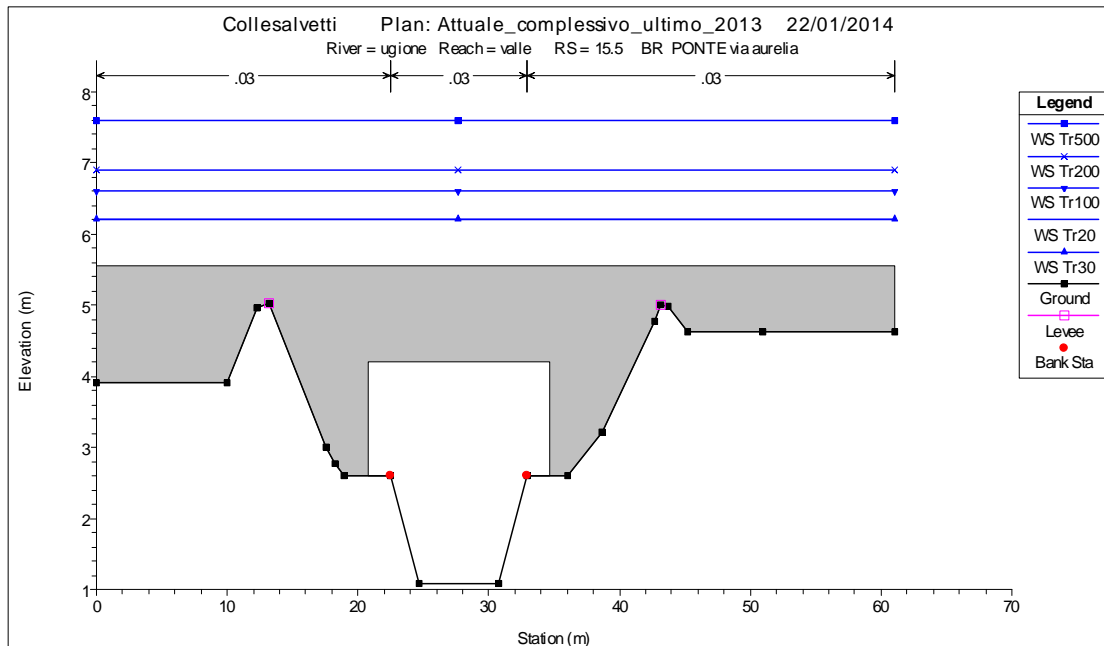


Figura 14 Sezione T. Ugione al ponte dell'Aurelia

Da notare che nella parte iniziale del tratto investigato si verifica la tendenza, specialmente per le portate più elevate, al sormonto arginale sia in destra che in sinistra idraulica. Analoga condizione si verifica lungo il Fosso della Puzzolente prima dell'immissione nel T. Ugione. Recenti studi mirati alla sistemazione idraulica del T. Ugione e del Fosso delle Puzzolente (Provincia di Livorno, 2005) hanno evidenziato che la presenza di numerosi attraversamenti nel tratto terminale del Fosso della Puzzolente determina una laminazione delle portate con allagamenti diffusi sul territorio circostante, riducendo il valore della portata al colmo ad una massimo di 30 mc/s. Entrambi i fattori pertanto conducono ad un beneficio sulle capacità di deflusso dei tratti a valle e possono essere considerati per analizzare lo stato attuale relativamente a tempi di ritorno non elevati.

5.1.1.2 Torrente Ugione- analisi bidimensionale

La costruzione del modello digitale del terreno è realizzata mediante l'utilizzo di punti georeferenziati di coordinate x,y,z frutto dell'acquisizione Lidar. Come coefficiente di scabrezza del canale è stato assunto un valore $n=0.03$.

Le modellazioni sono state eseguite su una griglia di estensione 5.5x3.5 km con celle di dimensione 5x5m (Figura 14 Figura 16 e Figura 17).

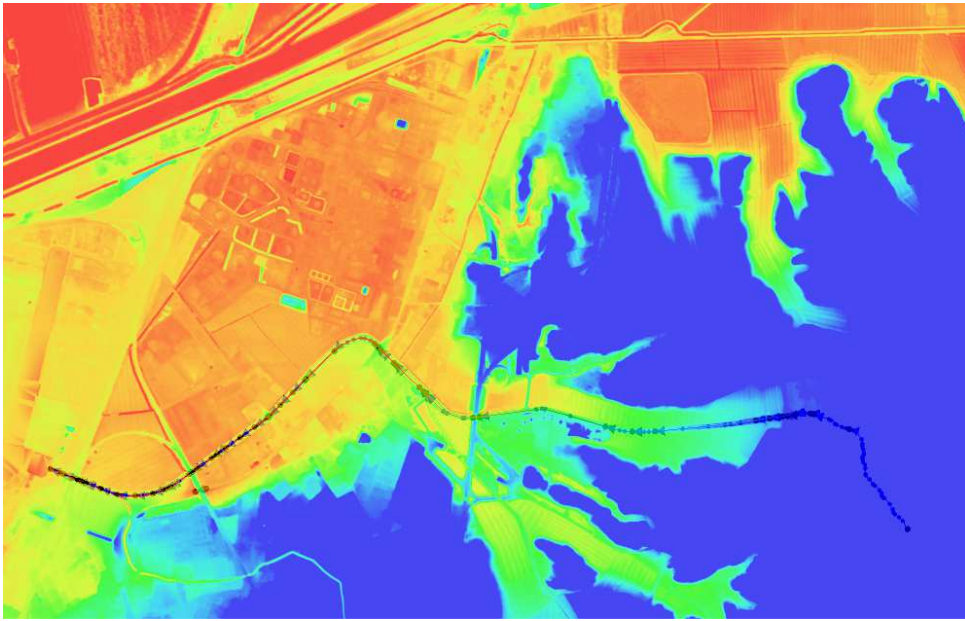


Figura 15 Griglia di calcolo per il T. Ugione

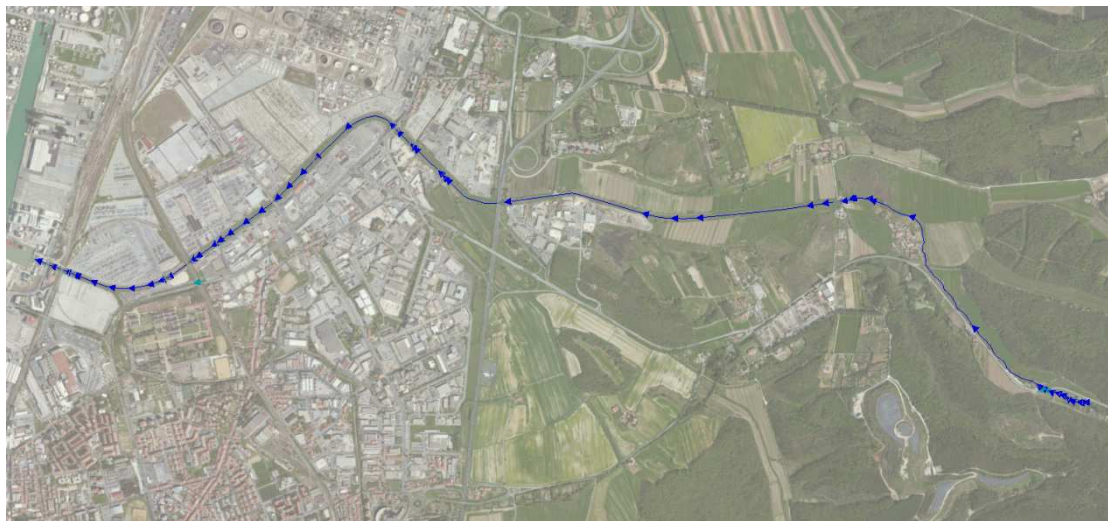


Figura 16 Tratto del T. Ugione investigato



Figura 17 Sezioni T. Ugione

Le sezioni analizzate sono state prese dagli studi esistenti. Le condizioni al contorno fanno riferimento alla seguente figura con i codici dello studio del Prof Castelli:

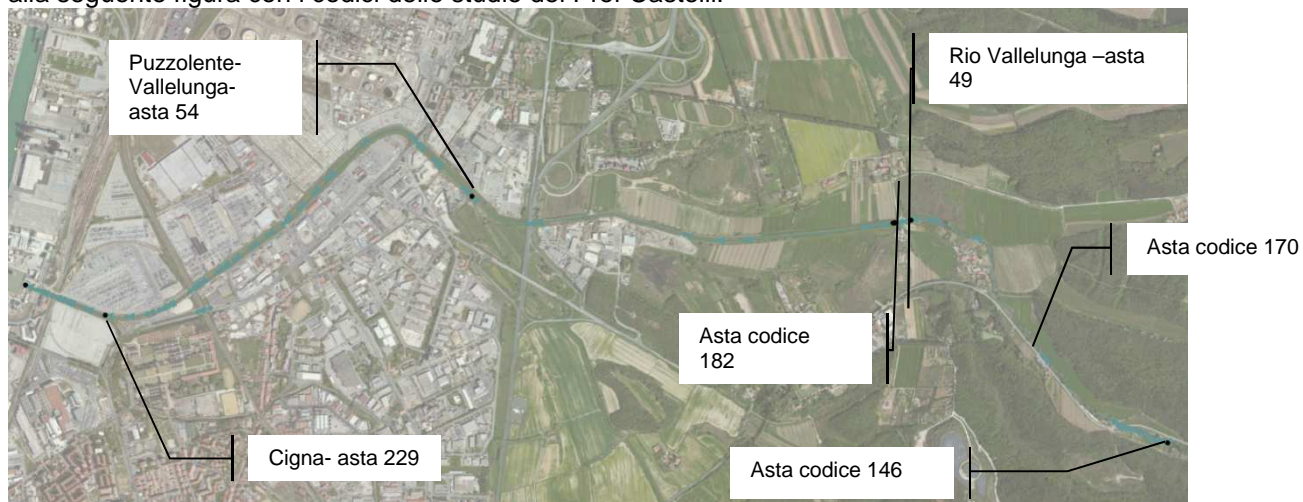


Figura 18 Condizioni del modello

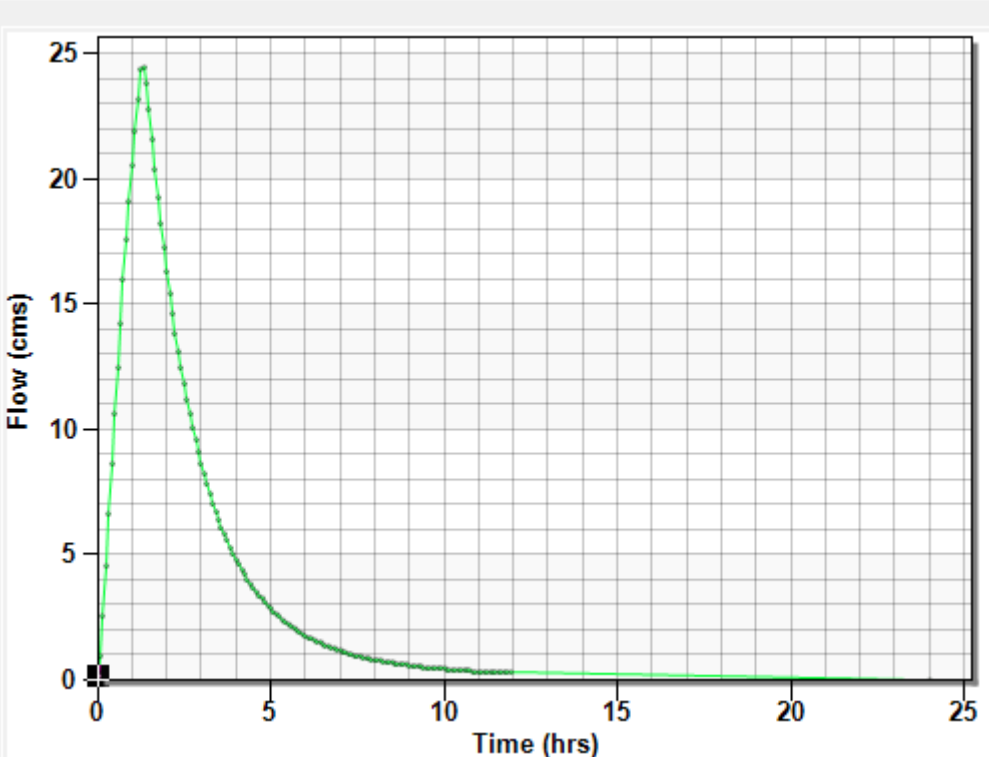


Figura 19 Idrogramma Rio Vallelunga asta 59 - Tr200

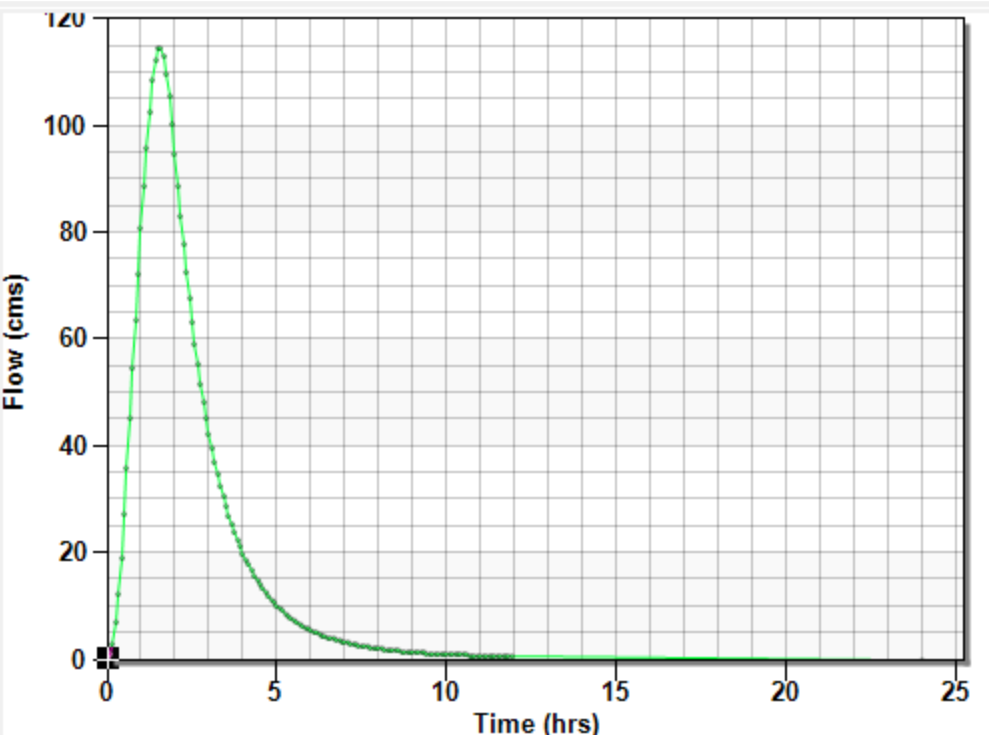


Figura 20 Idrogramma Tr200 anni - Asta codice 146- T. Ugione

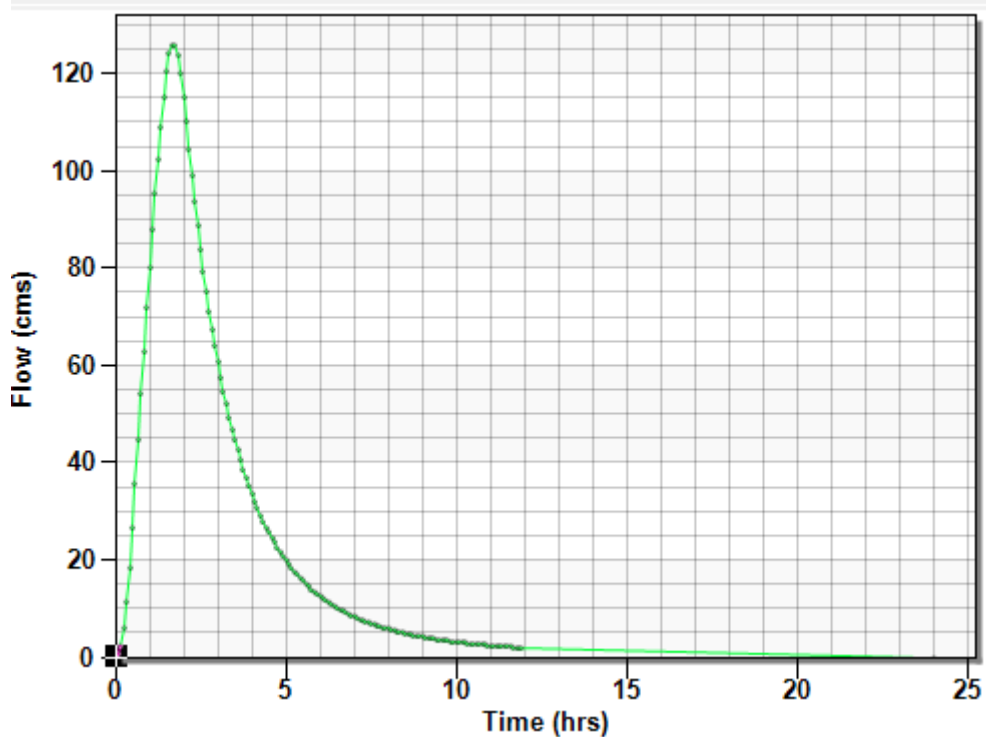


Figura 21 Idrogramma sezione terminale Fosso della Puzzolente –asta 55–Tr200

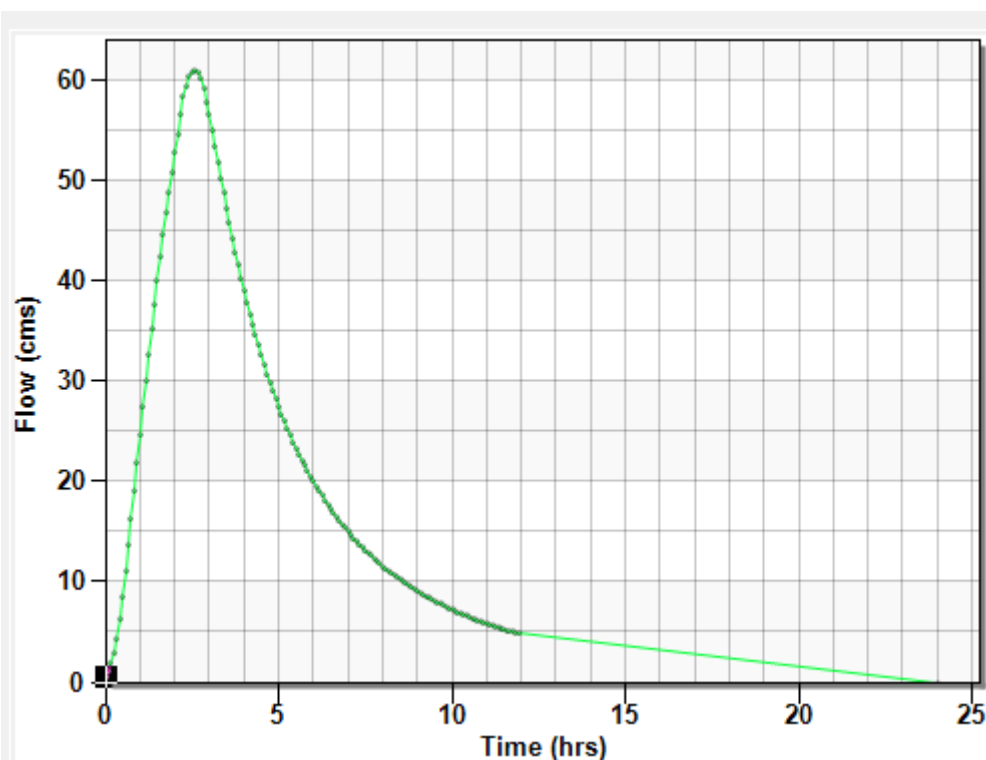


Figura 22 Idrogramma sezione terminale Cigna asta 229 –Tr200

L'andamento delle esondazioni è ripotato nelle immagini che seguono. Si nota come le aree a valle della via Aiaccia (nella quale sono previste le casse di espansioni) funzionino già nello stato attuale come aree di laminazione. Rimangono problemi residui in prossimità del ponte della via Aurelia che danno origine ad allagamenti sia in destra che sinistra idraulica.



Figura 23 Aree esondate Tr=200 anni

Le analisi hanno evidenziato analoghe criticità per Tr=30 anni principalmente nel tratto a valle della confluenza con il fosso della Puzzolente.



Figura 24 Aree esondate Tr=30 anni

Più estese le aree allagate per l'evento (considerata ai fini della pericolosità come Tr=500 anni) sebbene non si aggiungano altre problematiche.

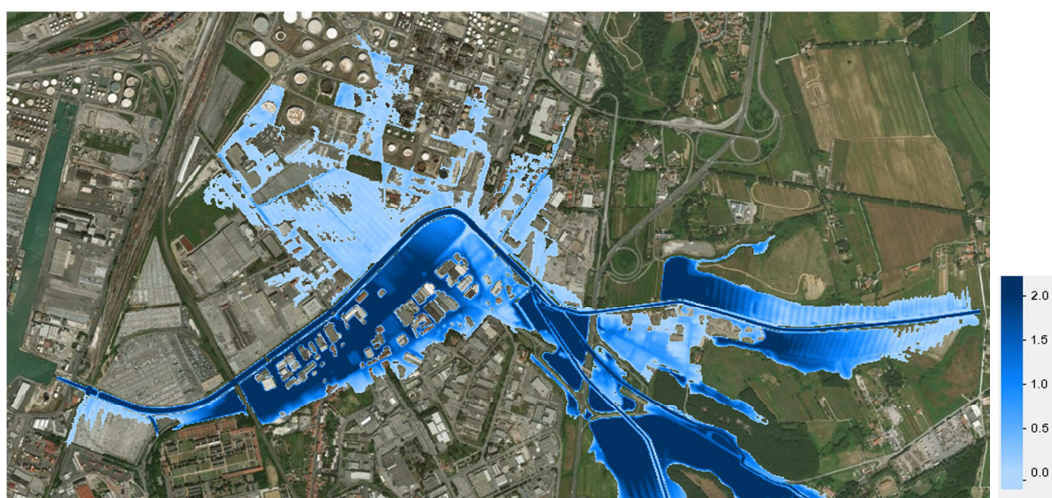


Figura 25 Aree esondate Tr=500 anni

5.2 Fosso della Puzzolente e Fosso Vallelunga

In questo caso si è applicata la modellazione su una griglia di 5.9x4.8km che riprende lo schema impiegato per l'analisi del T. Ugione indicata in precedenza. In questo caso il contributo è mirato a valutare le aree esondabili del F. della Puzzolente e del F. della Vallelunga considerando le mutue interazioni sui livelli alla confluenza. Lo schema massimizza le esondazioni per questi due corsi d'acqua mentre quelle del T. Ugione saranno ridotte rispetto allo schema precedente in quanto minore il contributo proveniente dal Fosso della Puzzolente.

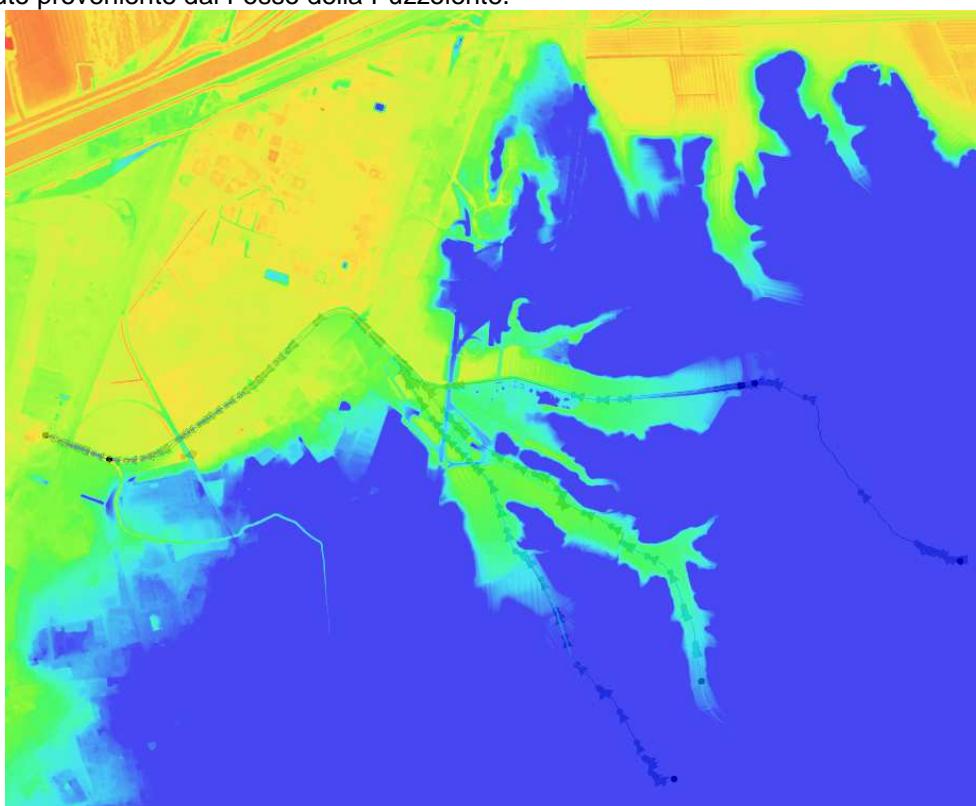


Figura 26 Griglia di calcolo Fosso Vallelunga e Fosso della Puzzolente



Figura 27 Idrografia del modello

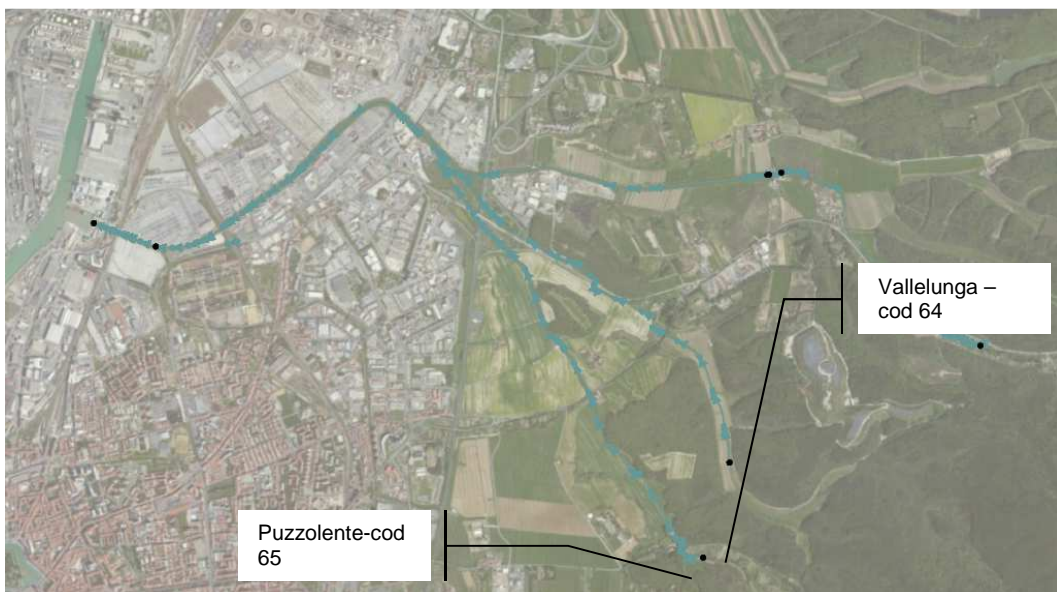


Figura 28 Condizioni al contorno

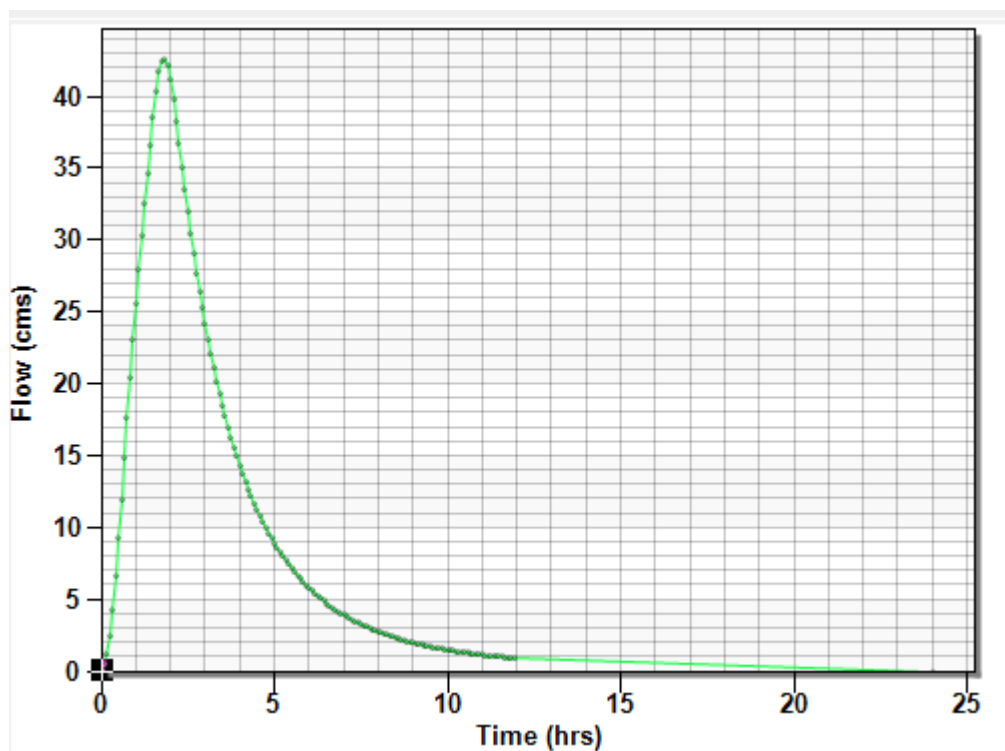


Figura 29 Idrogrammi di piena Vallelunga –codice 64- Tr200

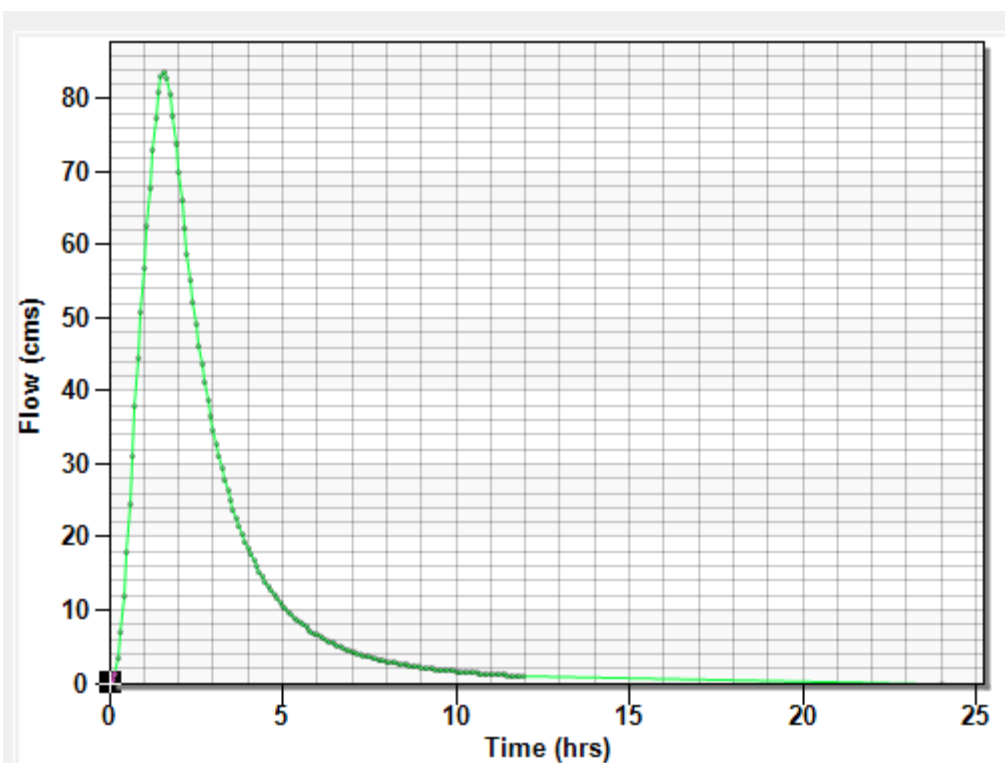


Figura 30 Idrogrammi di piena Puzzolente- asta codice 65- Tr200

I risultati hanno evidenziato criticità diffuse per i diversi tempi di ritorno analizzati con tiranti idrici nella piana alluvionale che superano i 2 m di altezza. In ogni caso si tratta di allagamenti abbastanza contenuti dall'andamento topografico del terreno.

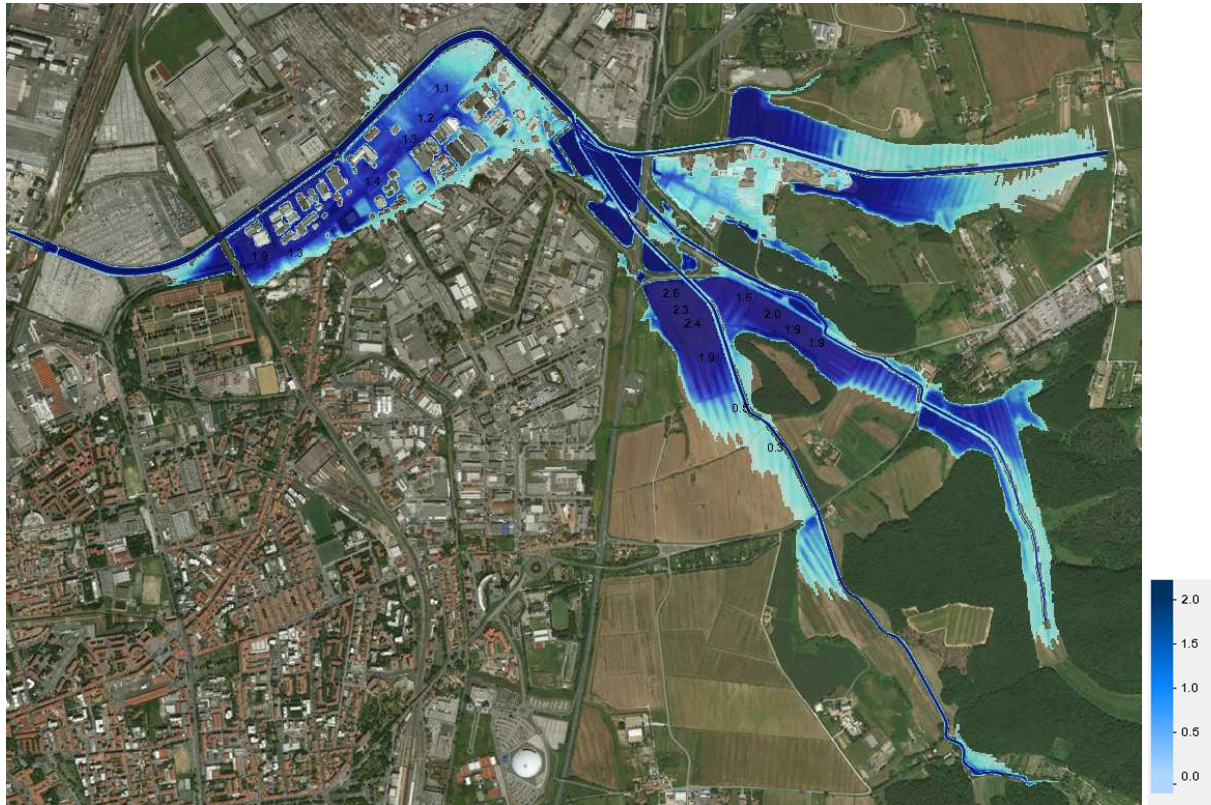


Figura 31 Esondazioni Tr=200 anni



Figura 32 Esondazioni Tr=30 anni



Figura 33 Esondazioni per l'evento del 9-10 sett 2017 ricostruito (equivalente Tr=500 anni)

5.1 Fosso della Cigna e Cignolo

L'analisi del fosso della Cigna e del Cignolo è stata eseguita con modellazioni 1D/2D. Nel tratto del Cigna dall'inizio del tratto modellato fino alla confluenza del T. Cignolo (in prossimità di Porta a Terra) sono state impiegate le sezioni derivate dallo studio Pagliara. Nel restante tratto si sono utilizzate le

sezioni Lidar. I manufatti non rilevati sono stati considerati come restringimenti di sezione del 15%. La griglia di calcolo ha una dimensione di 4.15x5 km con celle di dimensione 5x5m.

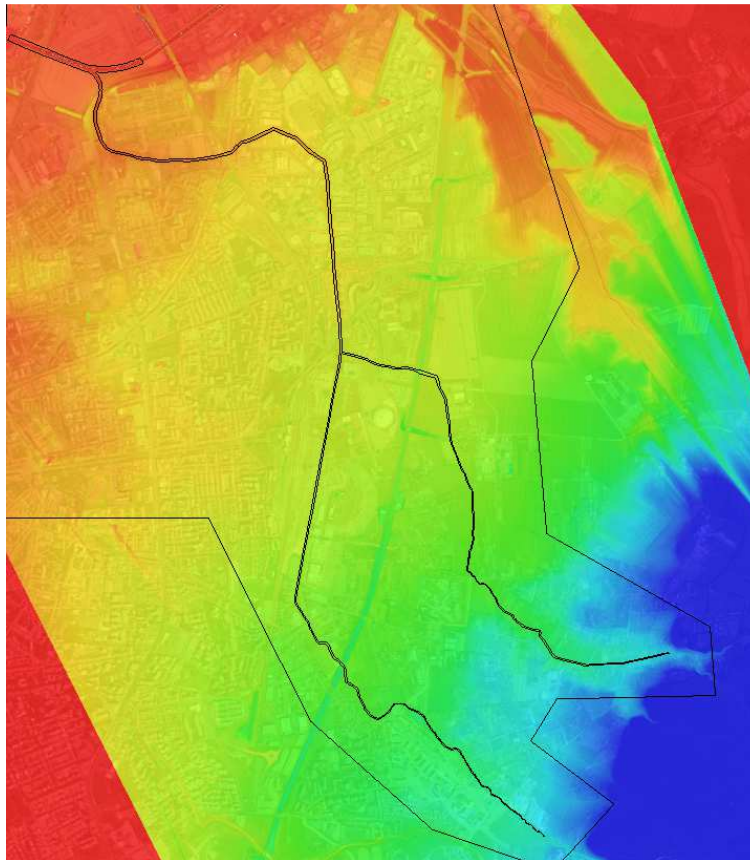


Figura 34 Griglia di calcolo

Il torrente Cignolo è stato considerato a contributo nullo a valle della cassa di espansione realizzata nel 2000. Sul T. Cigna si è fatto riferimento allo stato attuale con le modifiche morfologiche dovute alle lavorazioni in corso i cui effetti non sono comunque stati considerati. Lo schema delle condizioni al contorno è indicato in Figura 35.

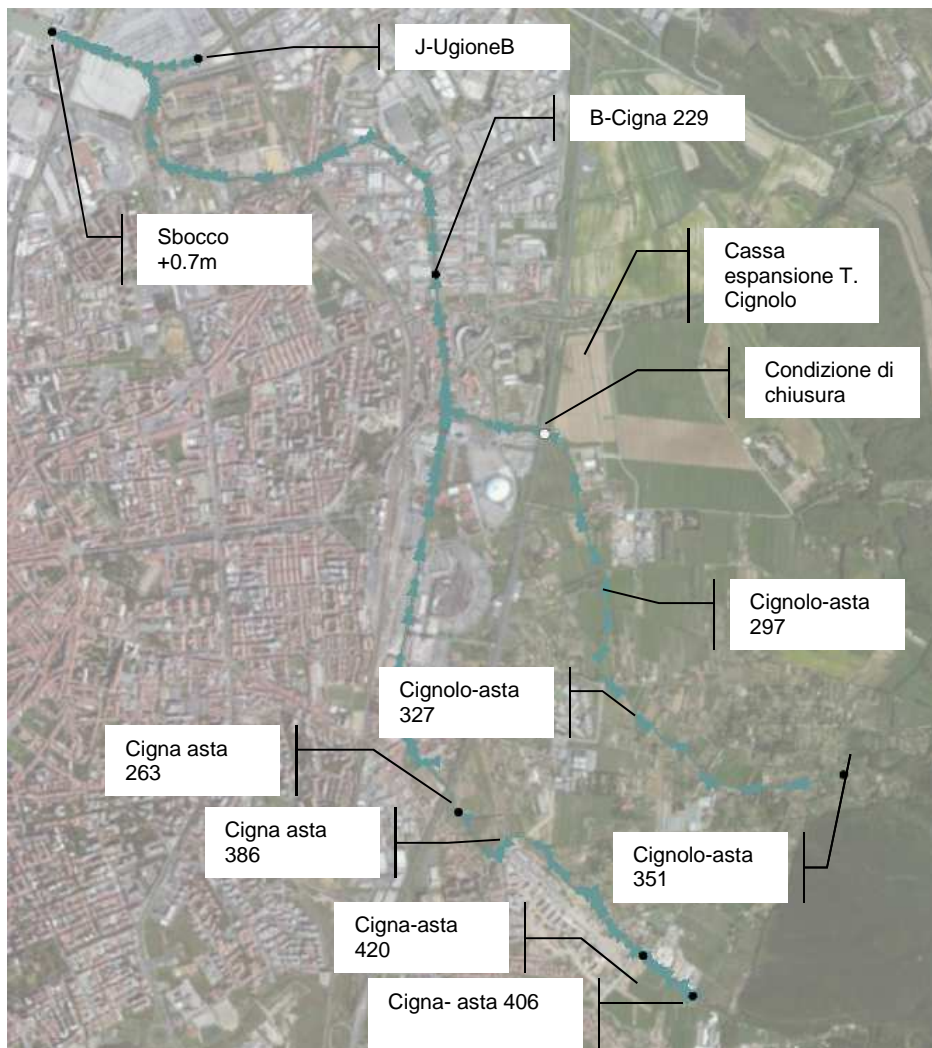


Figura 35 Schema delle condizioni al contorno T. Cigna e T. Cignolo

Le portate sono riportate di seguito.

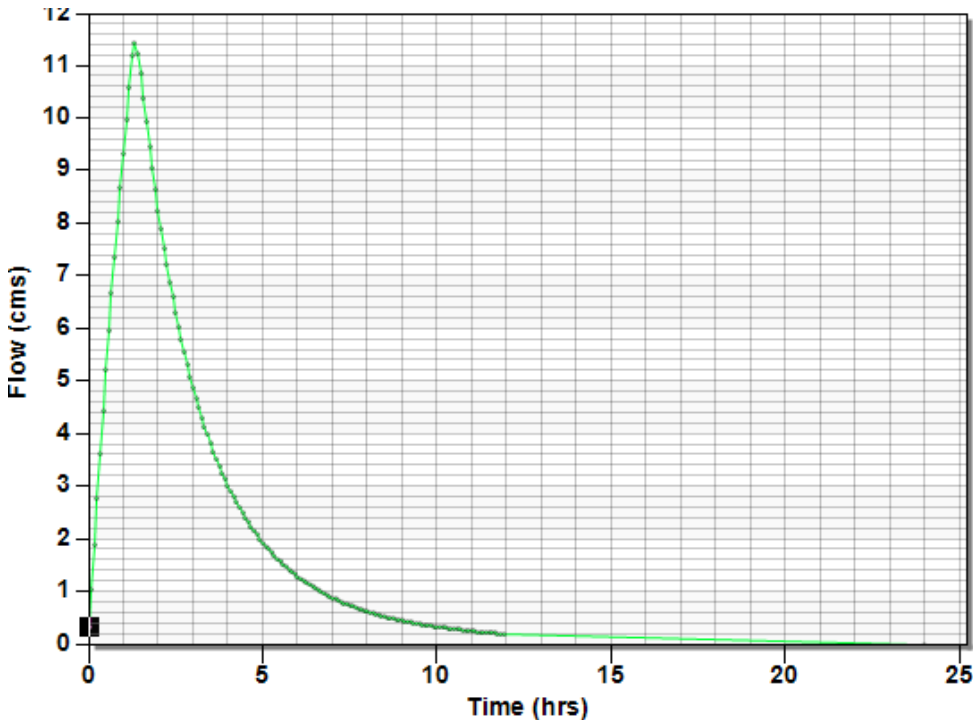


Figura 36 Idrogrammi di piena Cignolo –asta 351- Tr200

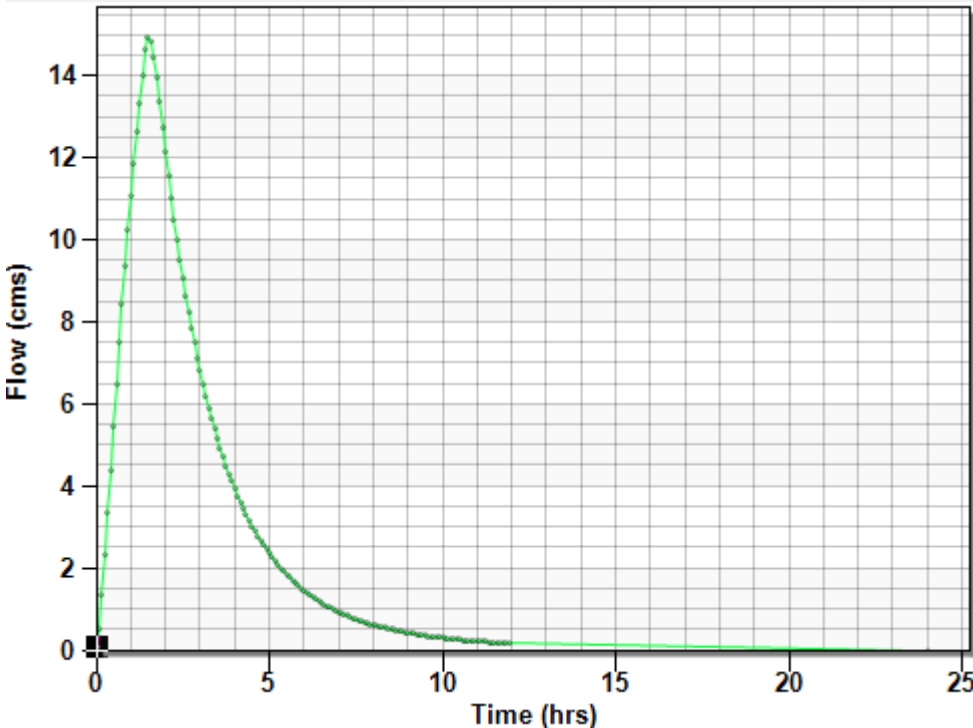


Figura 37 Idrogrammi di piena Cigna asta 406 Tr200

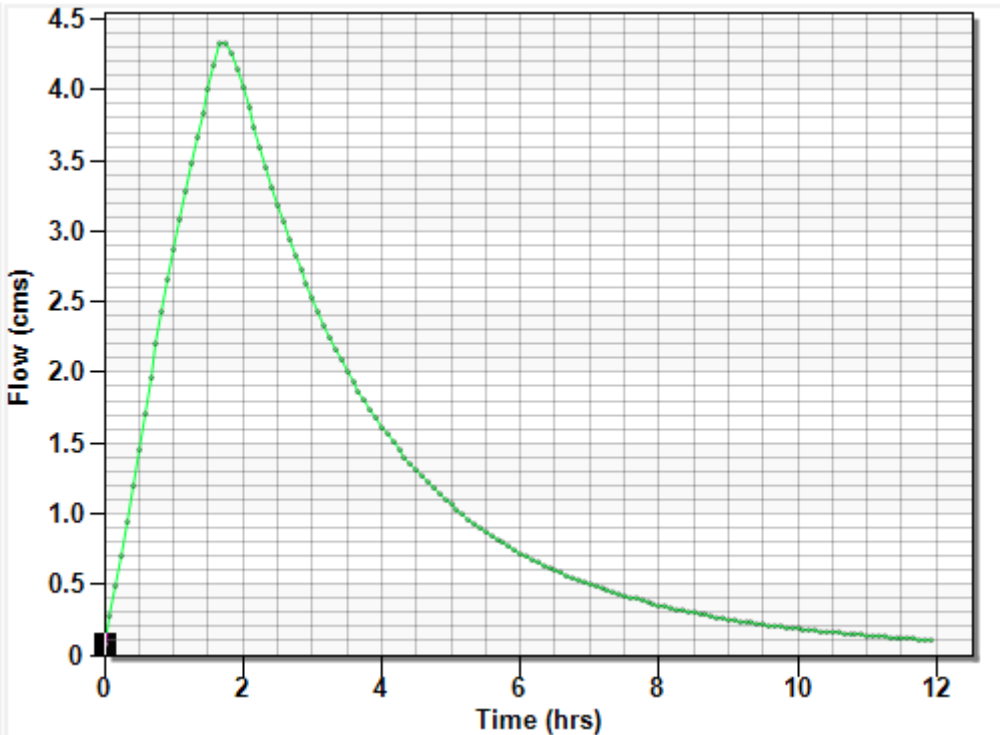


Figura 38 Idrogrammi di piena asta 420- Tr200

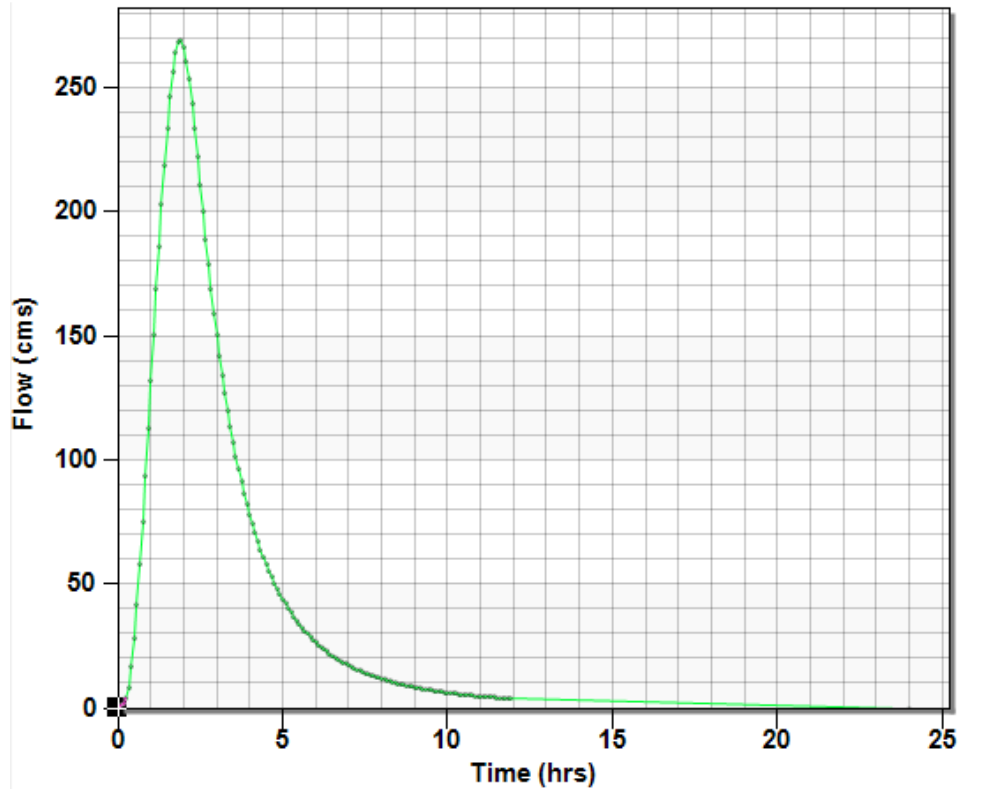


Figura 39 Idrogrammi di piena Ugione 141- Tr200

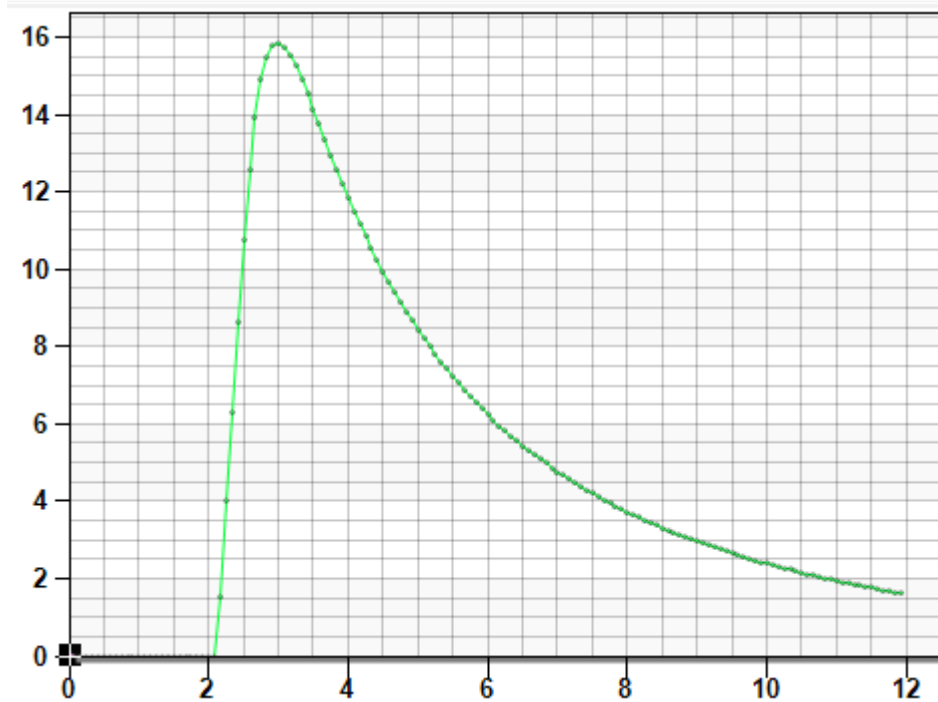


Figura 40 Idrogrammi di Cigna asta 299-Tr200

I coefficienti di scabrezza assunti sono $n=0.03$ nei canali in terra, $n=0.022$ per quelli cementati con vegetazione e 0.015 per i tratti completamente rivestiti in cls.

L'andamento delle esondazioni evidenzia diverse criticità. Rimangono minime insufficienze al ponte di via dell'Uliveta, mentre non sussistono problemi nel tratto di fronte a Borgo di Magrignano. Altre problematiche invece permangono nel tratto di porta a Terra in particolare lungo il ponte di via dei Condotti Vecchi.

Lungo il torrente Cignolo invece si hanno insufficienze in tutto il tratto iniziale, dove la sezione risulta poco definita ed il deflusso richiede l'occupazione delle aree limitrofe. Alcuni attraversamenti creano poi l'allagamento delle esondazioni fino ad occupare tutta la piana dei Condotti Vecchi. Nonostante le perdite a monte la cassa di espansione viene interessata da volumi di laminazione che per gli eventi estremi però superano la capacità portando il deflusso ad espandersi verso nord.

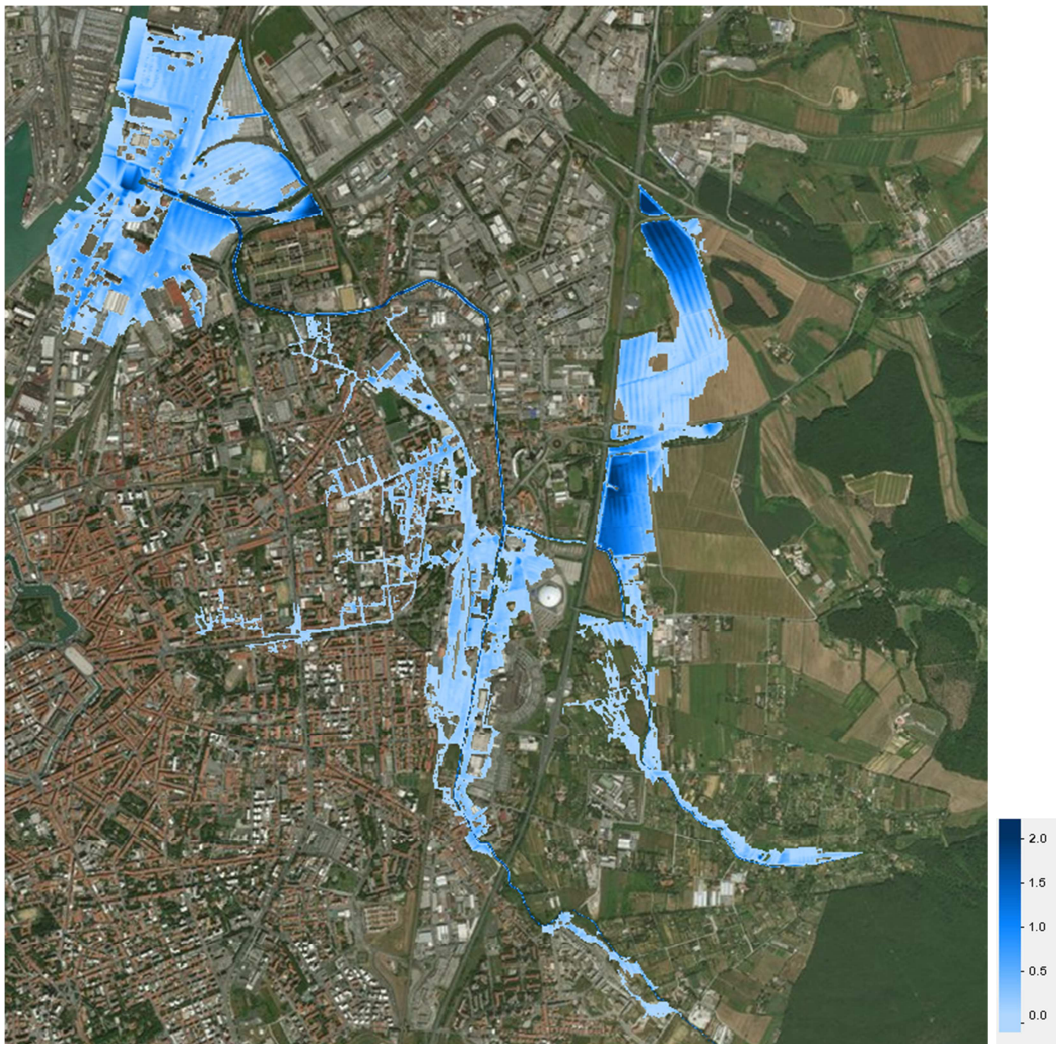


Figura 41 Tiranti idrici massimi per $T_r=200$ anni

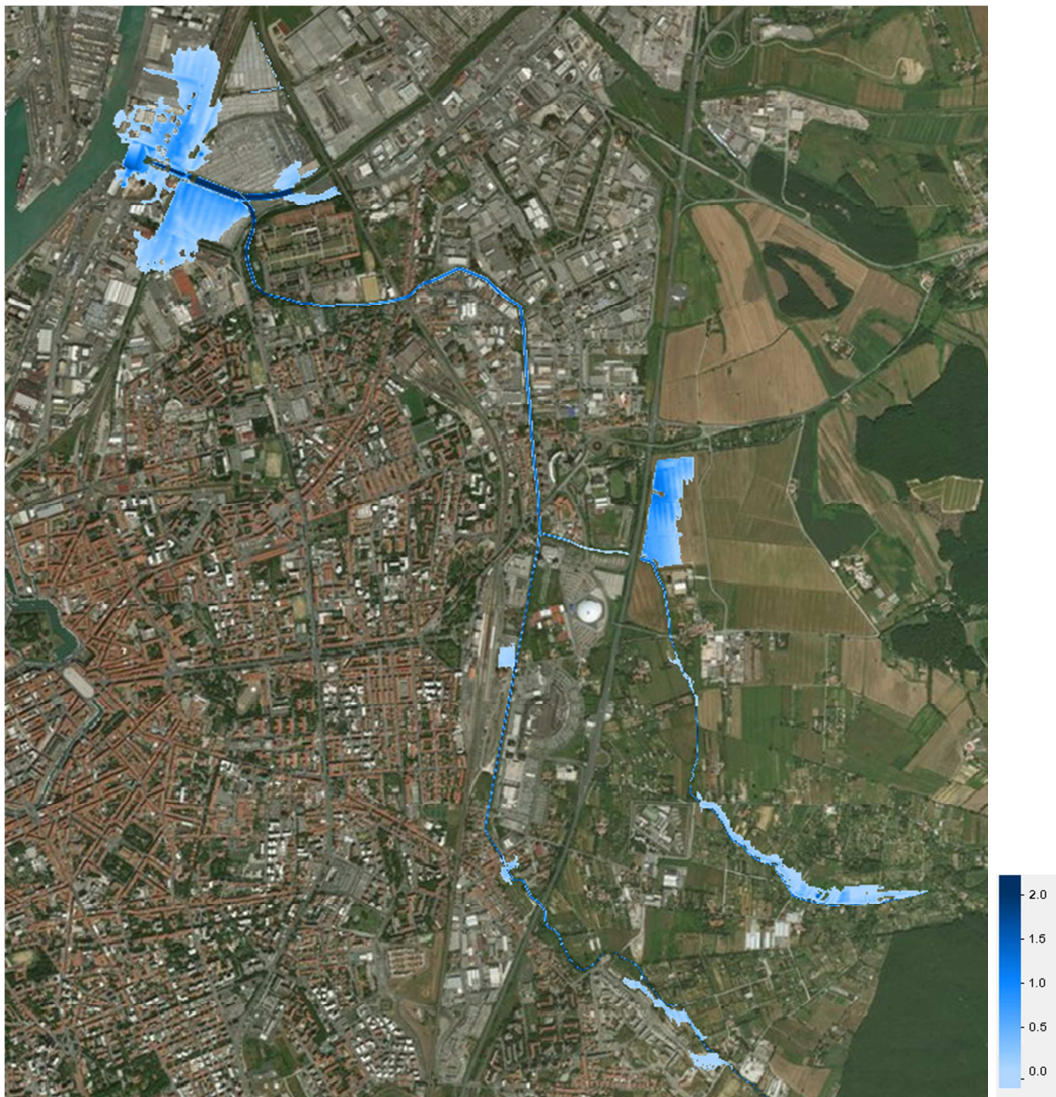


Figura 42 Andamento per $T_r=200$ anni a $T=1:40h$ dall'inizio



Figura 43 Andamento per $T_r=200$ anni a $T=2:30h$ dall'inizio

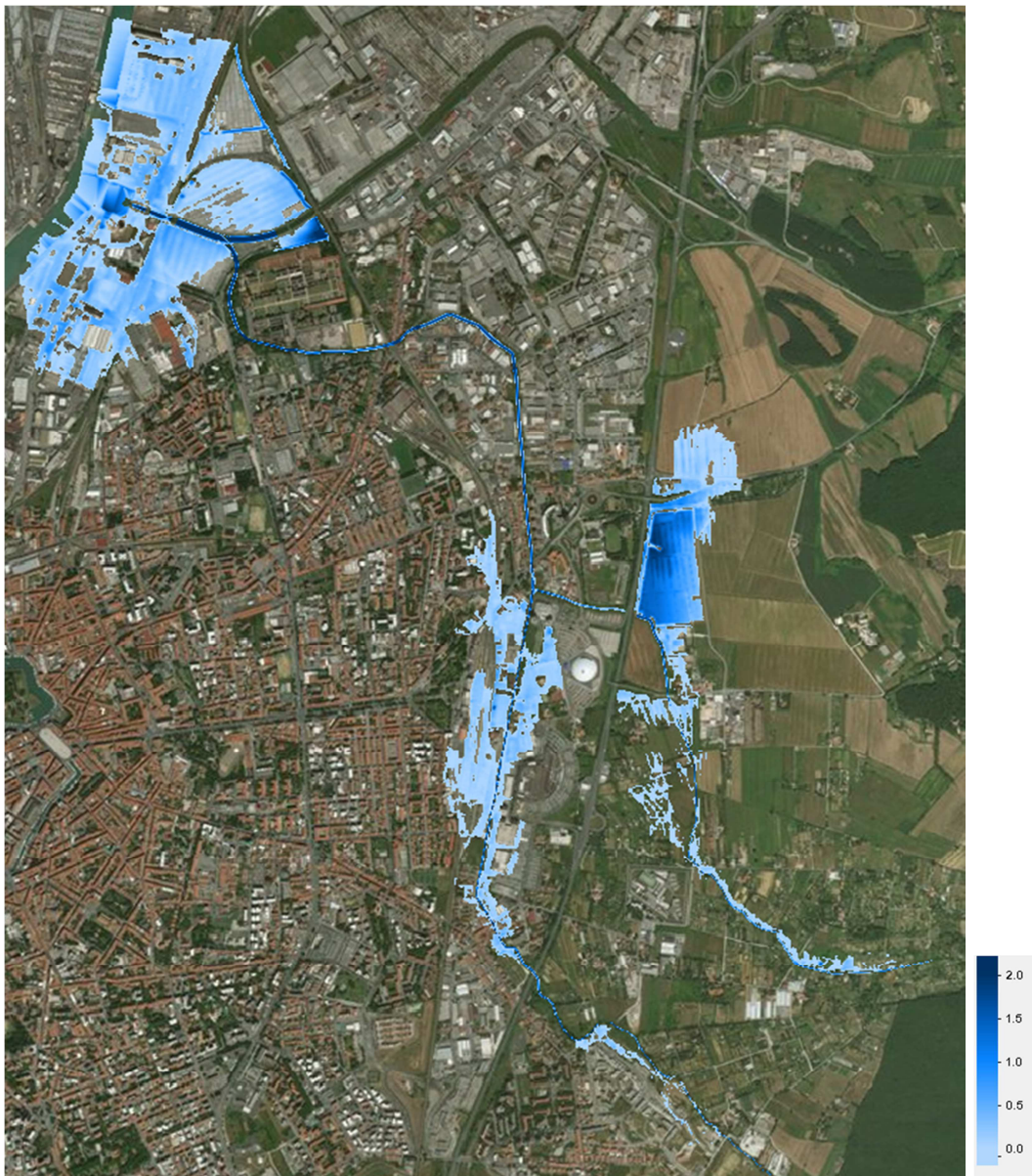


Figura 44 Andamento per $T_r=200$ anni a $T=3:00h$ dall'inizio

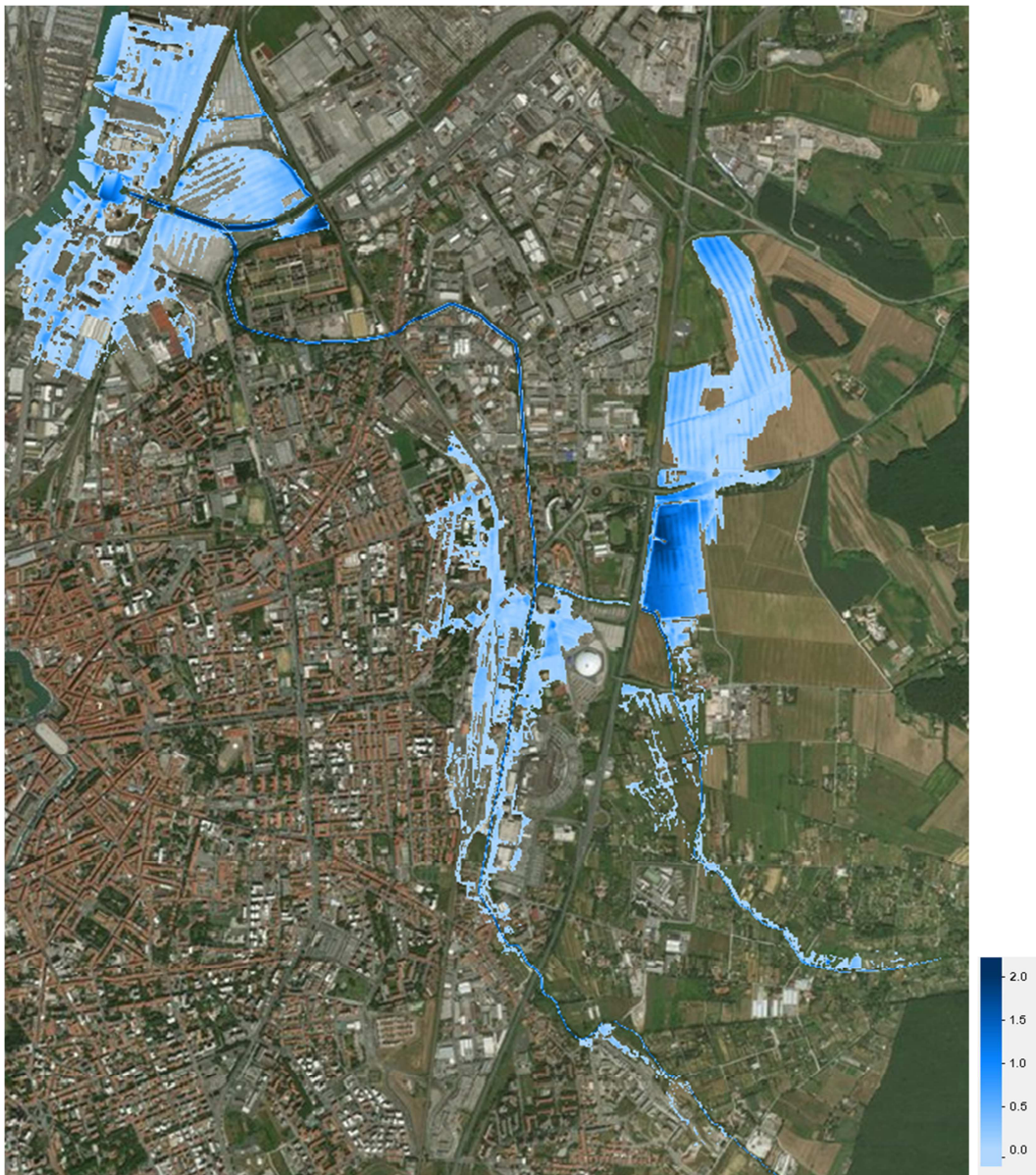


Figura 45 Andamento per $Tr=200$ anni a $T=4:00h$ dall'inizio

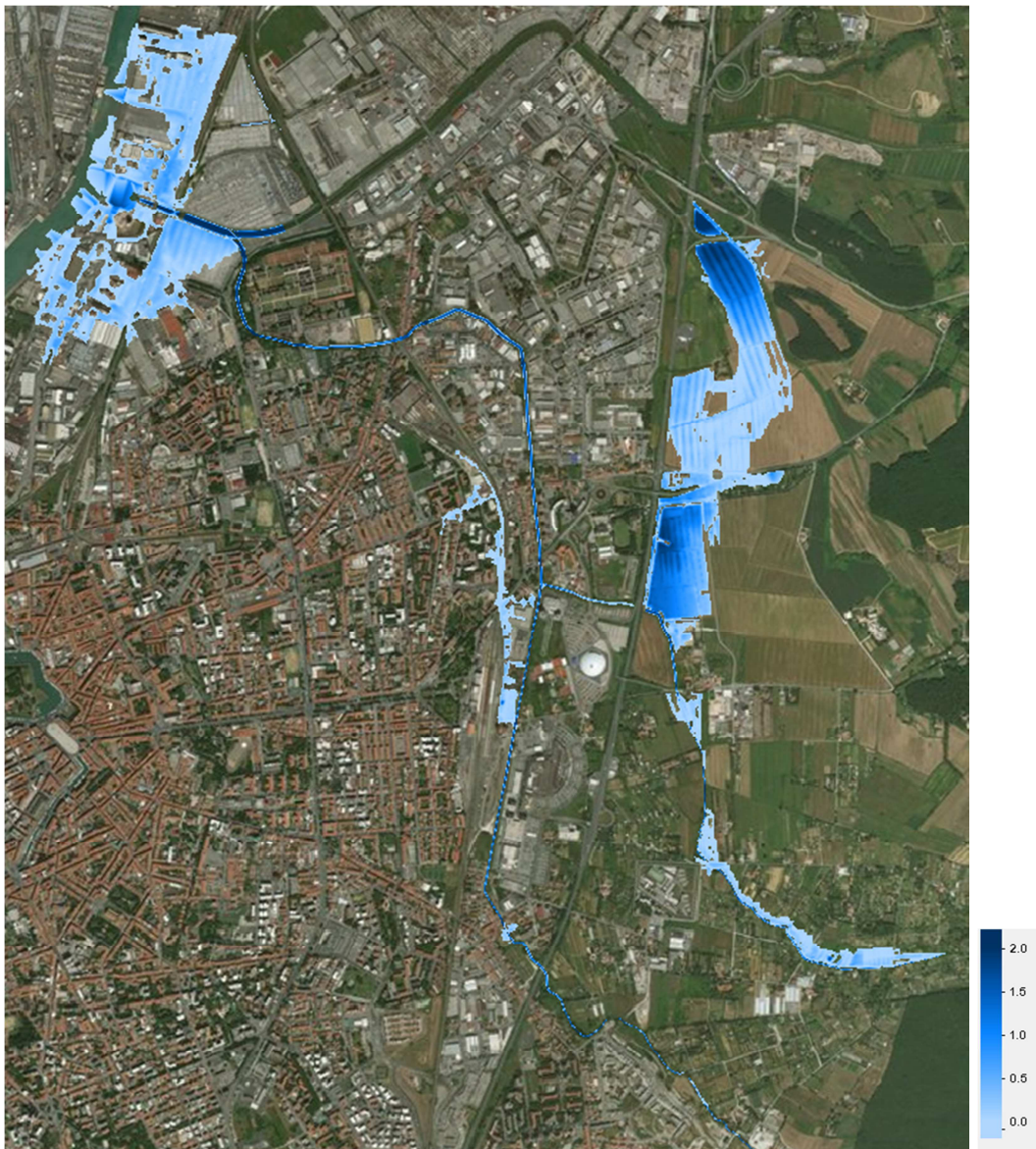


Figura 46 Tiranti idrici massimi per $Tr=30$ anni

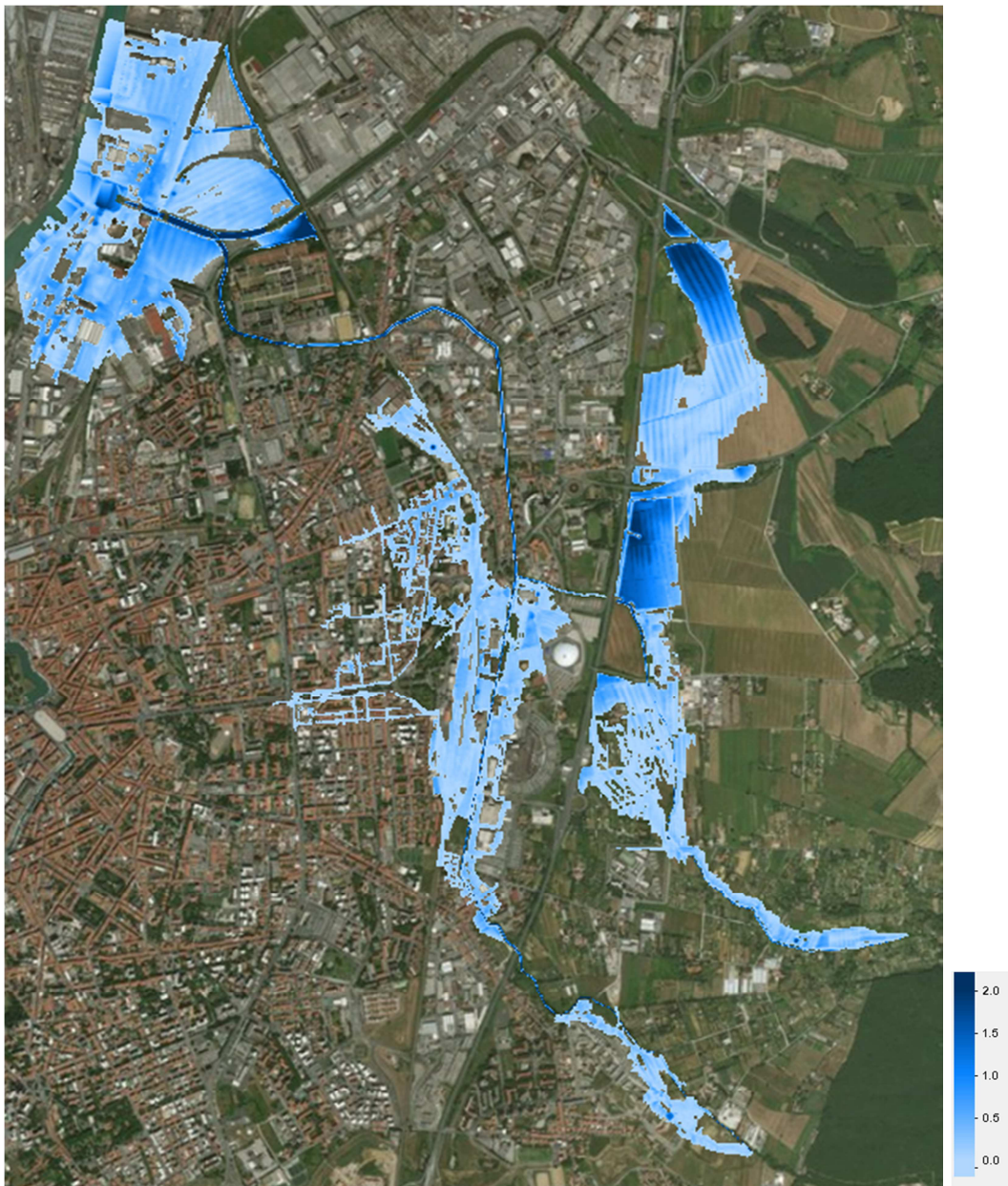


Figura 47 Tiranti idrici massimi per $T_r=500$ anni

5.1 Fosso Felciaio e Querciaio

5.1.1 Aspetti idraulici connessi al rio Felciaio

Il rio Felciaio pur avendo un bacino imbrifero abbastanza limitato presenta importanti criticità, attraversa aree urbane densamente abitate con una sezione scatolare che lo rende funzionante come una fognatura urbana. Il fosso in questione ha subito importanti trasformazioni nel tempo. Durante la realizzazione del quartiere de “La Rosa” il corso d’acqua fu progressivamente tombato e fatto passare in scatolare. Nelle figure che seguono si riportano le ortofoto storiche al fine di avere la successione degli eventi.



Figura 48 Ortofoto 1954



Figura 49 Ortofoto 1965



Figura 50 Ortofoto 1978 – assetto pressochè definitivo

Nella parte a monte della ferrovia il T. Felciaio ha mantenuto caratteri naturali nonostante la realizzazione di due nuovi quartieri (La Leccia e La Scopaia). Le problematiche idrauliche, relative in particolare all'incremento di portata nel corso d'acqua per l'aumento delle superfici impermeabili, sono state risolte con la realizzazione di due casse di laminazione.

- la prima cassa (Figura 83) è su una superficie di circa 2700 mq e con un franco di 1 m rispetto alla sommità dell'argine di contenimento ha una capacità di 4250 mc. Posta in sinistra idraulica del T. Felciaio ha uno sfioratore di circa 10 m di lunghezza ed entra in funzione, secondo le indicazioni del progetto originario, per una portata di 4.25 mc/s. La laminazione determina una diminuzione della portata da 5.85 mc/s a 4.20 mc/s
- la seconda cassa (Figura 52) è su una superficie di circa 1600 mq e con un franco di 1 m rispetto alla sommità dell'argine di contenimento ha una capacità di 3850 mc. Posta in destra idraulica del T. Felciaio a valle della confluenza con il T. Querciaio ha uno sfioratore di circa 16.6 m di lunghezza ed entra in funzione per una portata di 15.9 mc/s. La laminazione determina una diminuzione della portata massima da 18.59 mc/s al valore limite della capacità del corso d'acqua al tombamento di via di Popogna (stimata all'epoca in circa 15.9 mc/s).



Figura 51 Cassa n.1 sul T. Felciaio



Figura 52 Cassa n.2 sul T. Felciaio

Il Bacino del Felciaio si estende per una superficie totale di circa 2.6 kmq. A valle della ferrovia il corso d'acqua risulta tombato ed assume le caratteristiche di una fognatura urbana in cui confluiscono i principali collettori del quartiere La Rosa ed Ardenza mare. L'ambito urbano che sottende al tratto tombato ha una estensione di circa 0.8 km². I principale affluente è il Fosso Querciaio che ha una superficie di 0.35km².

L'asta principale ha una lunghezza di circa 4.2km di cui gli ultimi 1.4km tombati. L'asta del T.Querciaio ha invece una lunghezza di circa 650 m

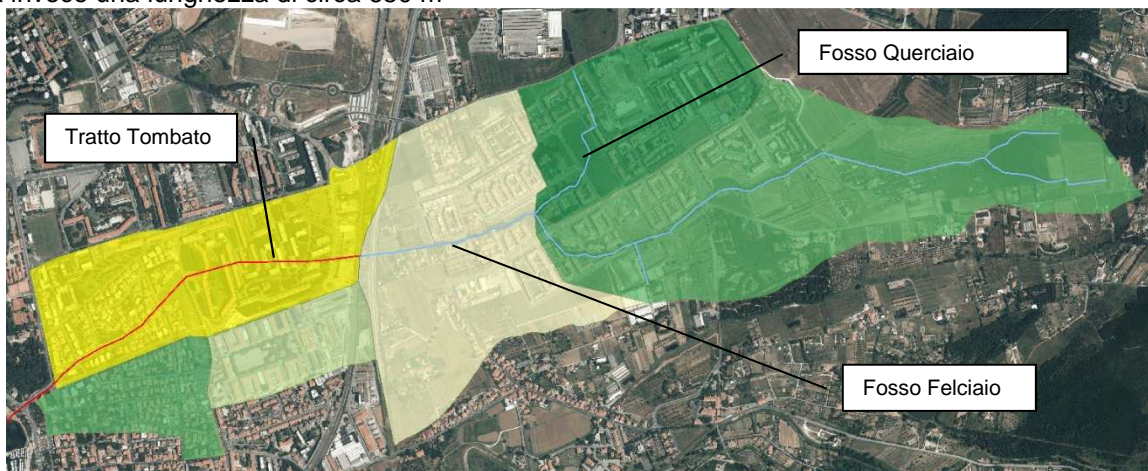


Figura 53 Bacino del Rio Felciaio

Lo studio del Prof. Castelli predisposto a seguito dell'evento, da impiegare per la definizione delle aree allagate e degli interventi progettuali, contrassegna le aste con i numeri di Figura 54.



Figura 54 Codici aste fluviali studio Prof. Castelli

Le portate massime, definite impiegando le perdite idrologiche del suolo con il metodo CN in condizioni AMC3, corrispondenti sono riassunte in Tabella 11.

Tabella 11 Perdite idrologiche

Nome	Codice	Q200	Q30	Q _{evento}
Querciaio	495	2.98	2.05	2.61
Felciaio	509	7.34	5.19	8.52
Felciaio	545	15.61	10.86	15.63

Gli idrogrammi sono riportati nelle figure che seguono.

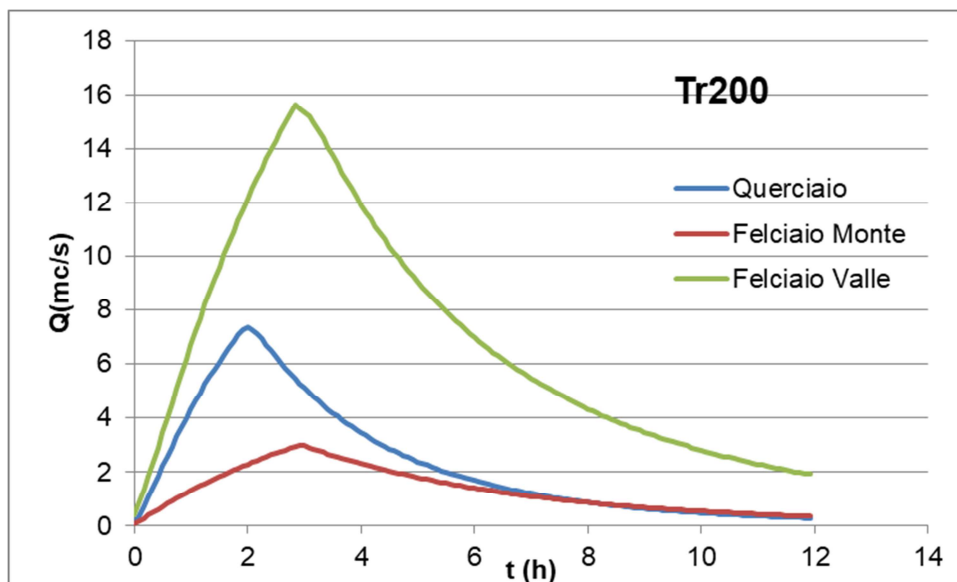


Figura 55 Idrogrammi di piena per Tr=200 anni (prof. Castelli)

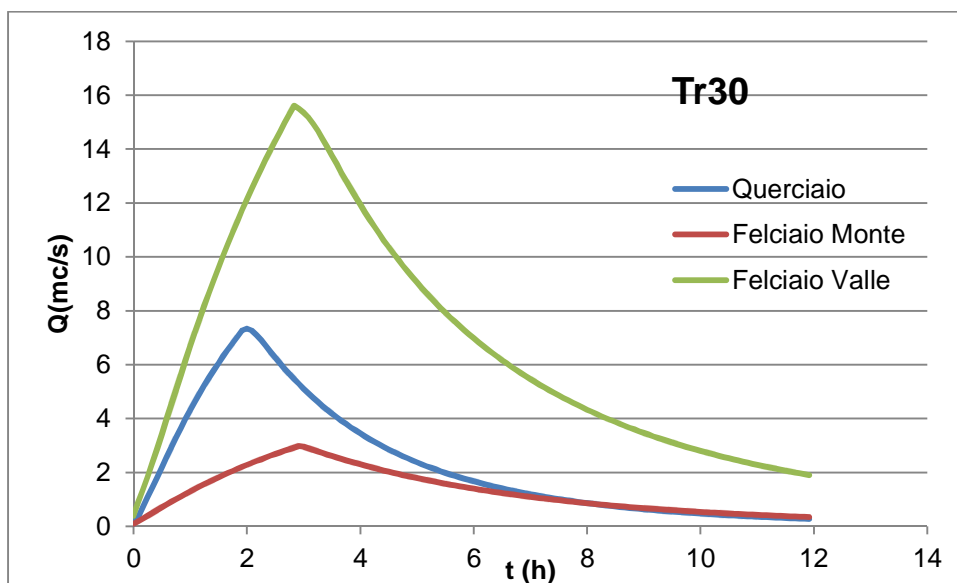


Figura 56 Idrogrammi di piena per Tr=30 anni (prof. Castelli)

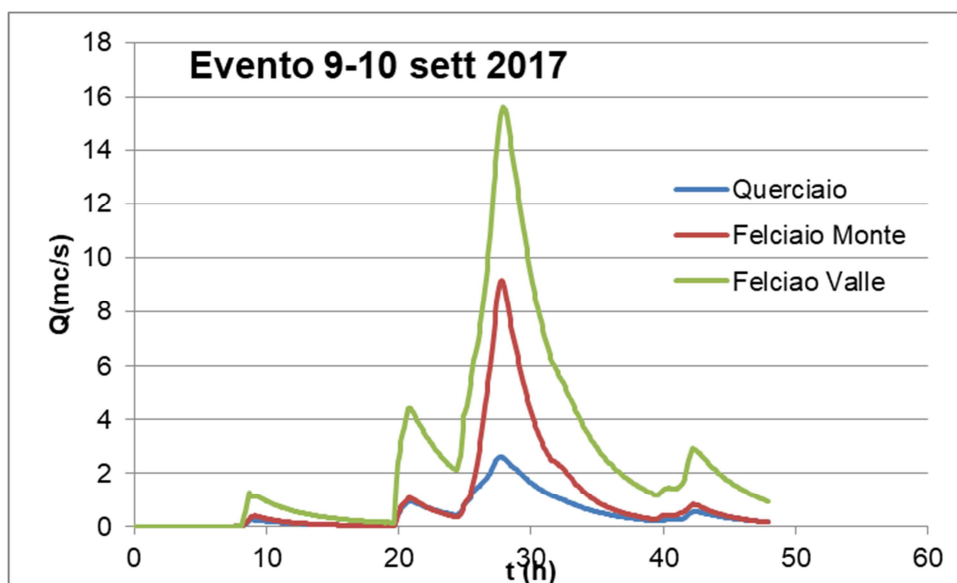


Figura 57 Idrogrammi ricostruiti dell'evento del 9-10 settembre 2017 (prof. Castelli)

Si osserva che le portate determinate nello studio del prof. Castelli risultano inferiori alle portate impiegate per la progettazione delle casse. Questo in particolare per la cassa n. 2 il cui funzionamento è previsto per portata di $Q=15.9$ mc/s a fronte di un valore determinato nello studio del Prof. Castelli di $Q_{200}=15.6$ mc/s e $Q_{evento}=15.63$ mc/s.

Relativamente alla parte urbana si è fatto una valutazione delle portate per i vari rami in cui è suddiviso il tratto urbano come da indicazioni fornite dall'ente gestore.

Un estratto del tracciato fognario è riportato in Figura 58.



Figura 58 Estratto della fognatura bianca nel nodo via dei Pensieri - Via Bat Yam

In particolare si individuano 3 aree urbane principali. Il calcolo della portata, trattandosi di una zona ad uso fognatura può essere fatta mediante il metodo dell'invaso semplificato.

Con tale metodo la portata defluente in fognatura dovuta ad una pioggia generica risulta:

$$Q = uA$$

dove u è il coefficiente udometrico (l/s ha), A l'area scolante (ha) e Q la portata in l/s.
Il valore del coefficiente udometrico è dato da:

$$u = 2160n \frac{a^{1/n}}{W^{1/n-1}} Y^{1/n}$$

dove n e a sono i parametri della curva segnalatrice di possibilità climatica, W il volume totale di invaso specifico riferito all'area del bacino data dalla somma dei piccoli invasi (W0 assunti pari a 60 mc/ha) e dell'invaso proprio (W1), Y il coefficiente di afflusso in fognatura che assume i valori riportati in Figura 59.

Tipo di superficie	Y
Tetti, coperture e pavimentazioni completamente impermeabili	Y2=0.9
Asfalto	Y3=0.7
Superficie parcheggio drenante con ghiaia	Y4=0.40
Aree a verde	Y5=0.1

Figura 59 Coefficienti di afflusso in fognatura

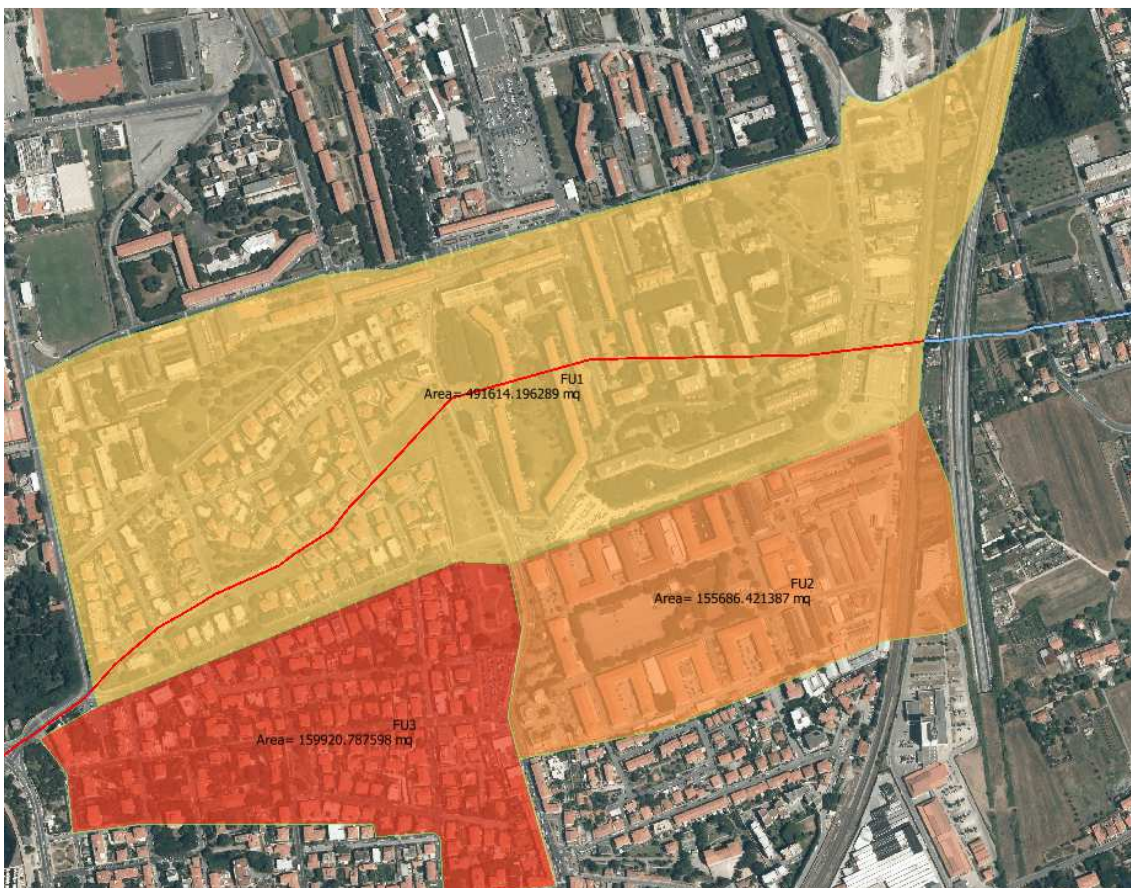


Figura 60 Sottobacini dell'area urbana

Nel metodo dell'invaso semplificato il valore $W_1 = W_0 r A^{0.227}$ dove A è la superficie in ha e r un parametro che per terreni pianeggianti può essere assunto pari a 0.33. In via preliminare si può assumere un coefficiente di deflusso medio di circa 0.5.

Relativamente ai parametri della curva di possibilità climatica si fa riferimento ai valori della stazione di Livorno come indicato nel report del Prof. Castelli.

Tr	a	n
30	80.4877	0.2866
100	99.2217	0.3085
200	109.9577	0.3172

Figura 61 Parametri della curva di possibilità climatica per la stazione di Livorno Mareografo aggiornati a dopo l'evento

Poiché le fognature urbane hanno tempi critici inferiori all'ora il coefficiente n della curva viene modificato con il parametro $n' = 4/3n$.

Con questi parametri le portate di vari tratti sono indicati in Tabella 12 Portate per bacini di fognatura

Tabella 12 Portate per bacini di fognatura

Tr	Bacino	A (m ²)	W0 (mc/ha)	W1 (mc/ha)	U (l/sxha)	Q (mc/s)
30	FU3	155686	60	298.7	105.1	1.6
100	FU3	155686	60	262.5	199.2	3.1
200	FU3	155686	60	262.5	246.8	3.8
30	FU2	159960.8	60	264.2	123.8	2.0
100	FU2	159960.8	60	264.2	197.8	3.2
200	FU2	159960.8	60	264.2	245.1	3.9
30	FU1	491614	60	340.8	87.8	4.3
100	FU1	491614	60	340.8	145.9	7.2
200	FU1	491614	60	340.8	183.4	9.0

L'analisi delle esondazioni è stato eseguito nello stato attuale con il software mono-bidimensionale Tu-Flow (licenza n. 803 di Aquaveo – Utah-USA). La base topografica è quella ricavabile dal dato Lidar e dal rilievo eseguito dallo studio Topografico del Geom. Bennati (Figura 62) su incarico del Commissario per l'Emergenza. Il rilievo risale a marzo aprile 2018.



Figura 62 Traccia sezioni rilievo topografico Geom Bennati

I rilievi di dettaglio hanno consentito di definire la geometria del tombamento tra la Ferrovia e lo sbocco a mare solo nel tratto iniziale ed in quello terminale. Nella sezione iniziale le dimensioni sono di scatolare a sezione rettangolare di dimensione 2.5x1.9m (Figura 63), mentre nel tratto terminale presenta una sezione ad arco con larghezza 2.8m ed altezza in chiave 2.4m circa (Figura 64). Da notare che poco a monte dello sbocco sono presenti due traverse di circa 0.6m di altezza necessarie per il funzionamento della stazione di sollevamento della acque di magra che nel periodo estivo, ai fini della balneazione del litorale non devono raggiungere lo sbocco a mare.

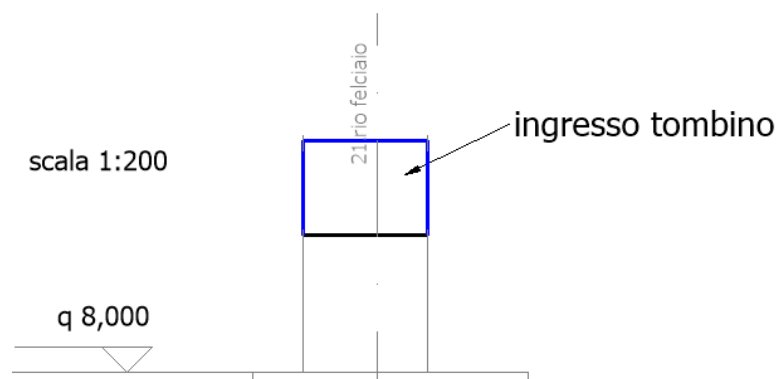


Figura 63 Inizio Tratto tombato

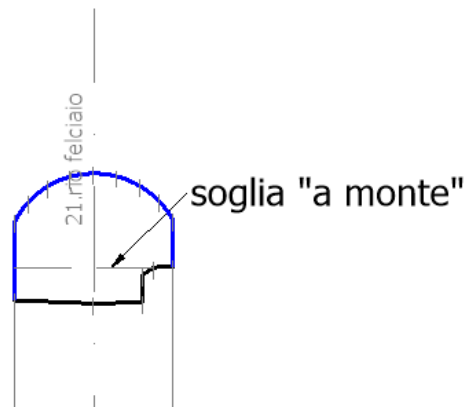


Figura 64 Sezione di uscita tratto tombato

Le modellazioni sono state eseguite su un griglia di dimensioni 3.6x1.2km con celle di dimensioni 2x2m (Figura 65).

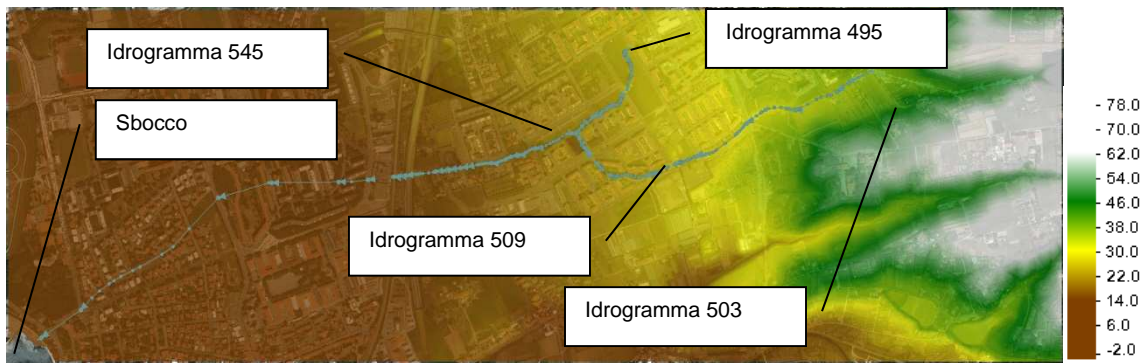


Figura 65 Griglia del modello bidimensionale

Come condizioni al contorno sono state impiegate le seguenti:

- idrogramma di piena (come contributo aggiuntivo) nei vari tratti come da dati dello studio del Prof. Castelli;
- condizioni allo sbocco: livello idrometrico a +0.7 m per $Tr=200$ e 30 anni; a +0.3 m per l'evento. In relazione a quest'ultimo si osserva che nella giornata del 9-10 settembre i livelli hanno subito oscillazioni fino a 40 cm come ricavato dai dati Idromare relativi alla stazione di Livorno Mareografo. Sovrapponendo gli idrogrammi alla variazione del livello del mare si osserva che il picco di livello si è verificato prima dell'evento (a $t=24h$) mentre in corrispondenza dell'evento i livelli erano a valori di circa 0.15-0.2m (a $t=27h$ ovvero le 3:00AM del giorno 10/09). Analizzando l'andamento temporale del vento e della sua direzione si osserva che durante l'evento il vento aveva provenienza dal I e II quadrante e con intensità media di circa 5 m/s. Quindi durante l'evento non era presente moto ondoso significativo ed è pertanto cautelativo considerare una quota allo sbocco costante di circa +0.3m sul l.m.m.

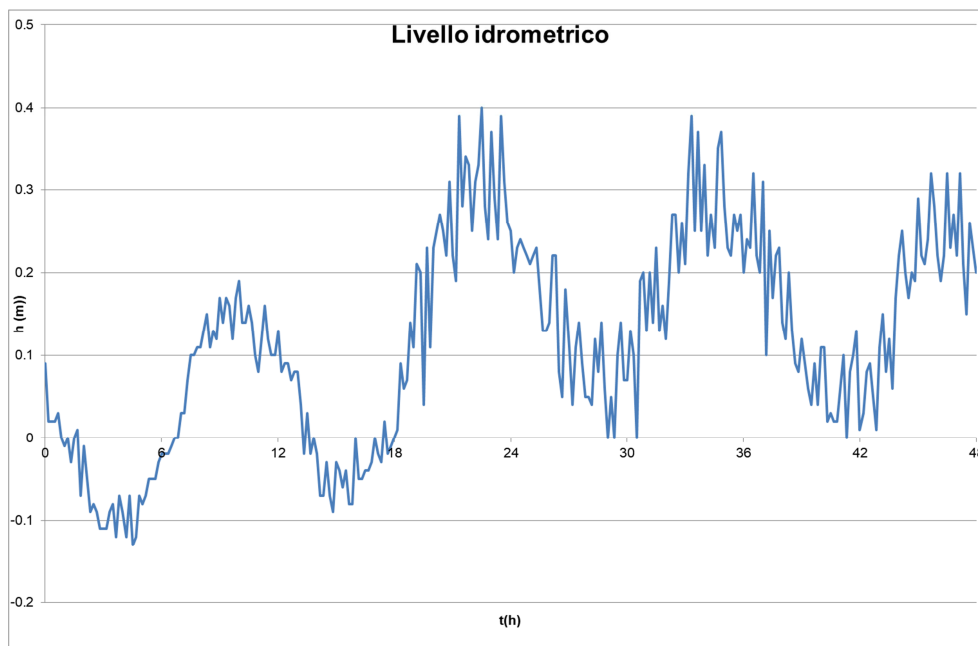


Figura 66 Livello idrometrico a partire dalle ore 00:00 GMT del 09/09/2017 alla stazione di Livorno (fonte Idromare)

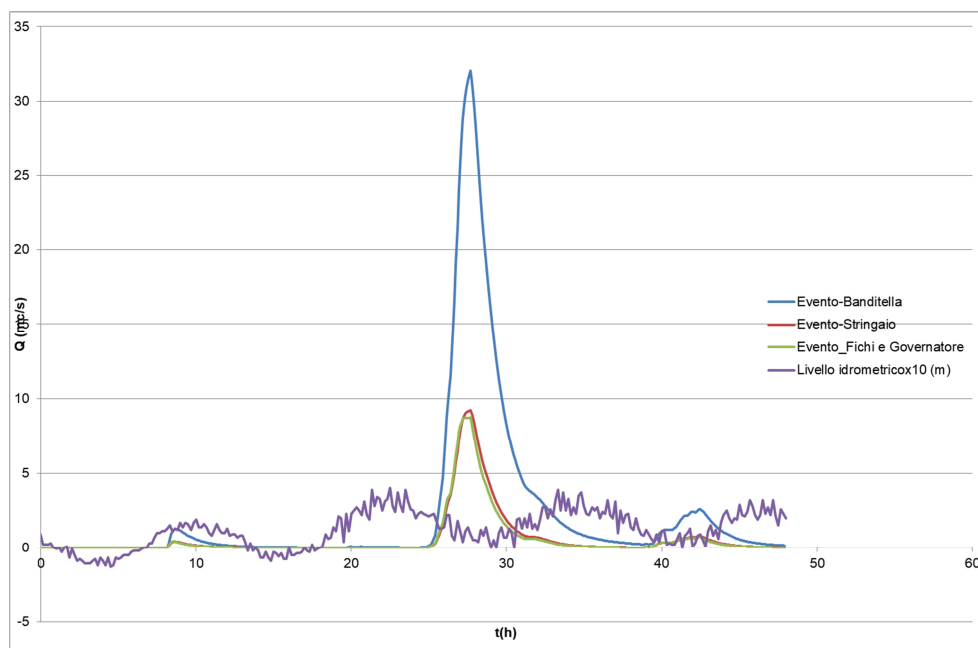


Figura 67 Livello idrometrico (amplificato per 10 volte) e idrogramma a partire dalle ore 00:00GMT del 09/09/2017 (fonte Idromare)

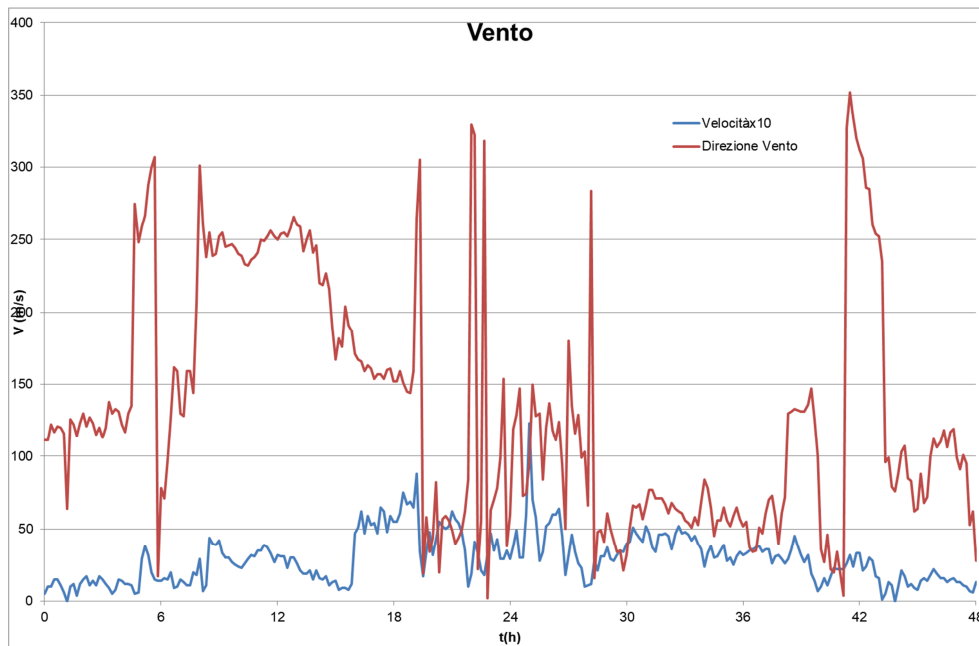


Figura 68 Velocità (amplificata per 10) e direzione (°N) del vento a partire dalle ore 00:00 del 09/09/2017 alla stazione di Livorno (fonte Idromare)

Dal punto di vista della scabrezza si è considerato per i tratti in cemento un coefficiente di Manning $n=0.02$, per quelli in terra $n=0.04$, per i tratti in scogliera $n=0.05$. Per le aree alluvionali si è fatto riferimento ai valori di letteratura associati ai codici di uso del suolo del Land Corine Cover (vedere C.J. van Der Sande et al, "A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment", International Journal of applied earth observation and geoinformation, 2003, Lopes et al "Flooding assessment under sea level rise scenarios: Ria de Aveiro case, Journal of coastal research, 2013), riassunti in Tabella 13.

USO DEL SUOLO	Codice CORINE	Manning n
Tessuto Urbano continuo	111	0.14
Tessuto Urbano discontinuo	112	0.09
Aree industriali o commerciali	121	0.14
Reti stradali e ferroviarie e spazi accessori	122	0.07
Aree portuali	123	0.07
Aeroporti	124	0.06
Aree estrattive	131	0.12
Discariche	132	0.04
Cantieri	133	0.06
Aree verdi urbane	141	0.02
Aree ricreative e sportive	142	0.04
Seminativi in aree non irrigue	211	0.08
Seminativi in aree irrigue	212	0.08
Risaie	213	0.04
Vigneti	221	0.12
Frutteti e frutti minori	222	0.12

Oliveti	223	0.12
Prati Stabili	231	0.1
Colture temporanee associate a colture permanenti	241	0.08
Sistemi colturali e particellari complessi	242	0.10
Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti	243	0.09
Boschi di latifoglie	311	0.1
Boschi di conifere	312	0.1
Boschi misti	313	0.13
Aree a pascolo naturale e praterie	321	0.11
Brughiere e cespuglieti	322	0.06
Aree a vegetazione sclerofilla	323	0.1
Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione	324	0.1
Spiagge, dune e sabbie	331	0.07
Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti	332	0.07
Aree con vegetazione rada	333	0.09
Aree percorse da incendi	334	0.07
Paludi interne	411	0.10
Saline	422	0.04
Corsi d'acqua, canali e idrovie	511	0.03
Bacini d'acqua	521	0.03

Tabella 13 Coefficienti di scabrezza impiegati nel modello bidimensionale

Lo stato attuale evidenzia problematiche da allagamento nel tratto dove è presente il tombamento. In prossimità del quartiere della "Scopaia" non si hanno rilevanti problemi. Le esondazioni sono limitate e pochi tratti rimangono abbastanza circoscritte. Con la portata $Tr=200$ anni si osservano modesti allagamenti prima del tombamento. Le due casse di espansione presenti, coerentemente con i valori di portata assunti come input, forniscono un contributo modesto. Gli sfioratori sono posizionati a quote che sono di poco superate dai tiranti idrici.



Figura 69 Tiranti idrici per $Tr=200$ anni

Il caso dell'evento risulta sostanzialmente simile allo scenario $Tr=200$ anni. I maggiori livelli liquidi nella prima cassa a monte contribuiscono ad avere un effetto di laminazione più elevato. Questo

effetto fa diminuire le portate nei tratti più a valle a valori tali da non mettere in funzione la seconda cassa. Le portate nel tratto risultano inferiori a quelle di progetto.

Si osservano modeste fuoriuscite dai pozzetti lungo strada. Questo significa che il tratto tombato lavora sostanzialmente a sezione piena e non ha la capacità di ricevere altri scarichi. In Figura 70 è riportato un confronto tra le quote liquide determinate nel tratto tombato e le quote del terreno. Si osserva in molti casi (punti A, B, C) una quota del livello liquido ad profondità inferiori a 1m rispetto al piano campagna. Essendo la quota del cielo dello scatolare a profondità superiori si deduce che il tratto tombato risulta in pressione ed ha scarso margine rispetto al piano campagna prima che lo stesso non fuoriesca dalla rete di fognatura che vi si immette.

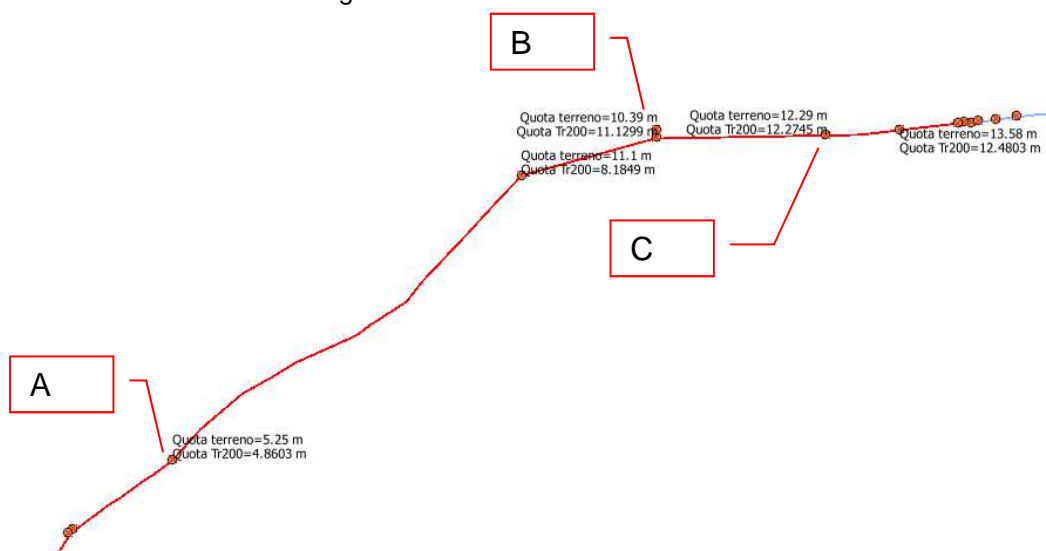


Figura 70 Tiranti idrici nel tratto tombato per Tr=200 e quote del terreno

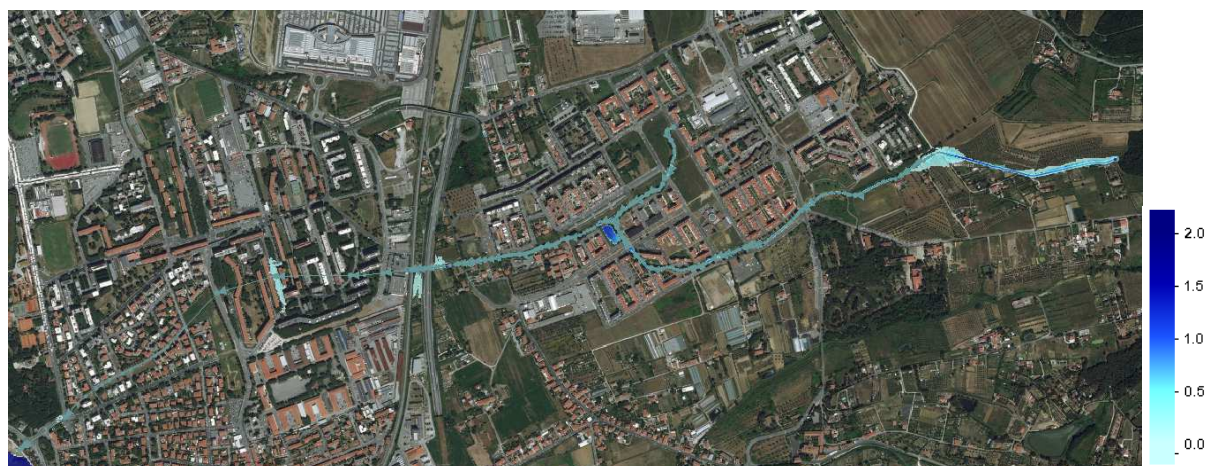


Figura 71 Tiranti idrici per Evento

Nel caso di portata Tr=30 anni le situazioni critiche sono sostanzialmente risolte; anche in questo caso la portata nel tratto tombato risulta pressoché al limite della capacità (Figura 72).



Figura 72 Esondazioni per $Tr=30$ anni

Al fine di valutare la pericolosità nell'area urbana è stata eseguita una modellazione considerando il contributo di pioggia dell'intera area. Il modello simula infatti anche il run-off su superfici estese fornendo risultati di drenaggio urbano e tendenza all'accumulo nelle zone più depresse.

La simulazione è stata eseguita per una pioggia di 3h ad intensità costante secondo le curve di possibilità climatica aggiornata dal prof. Castelli (Figura 73) che ha una quantità di pioggia complessiva di 143 mm.

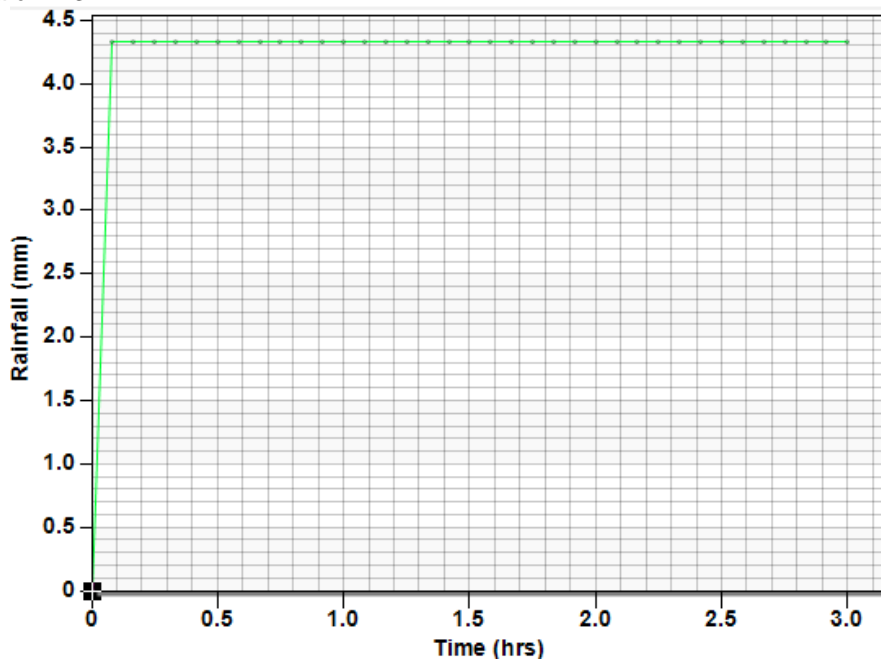


Figura 73 Ietogramma ad intensità costante per $Tr=200$ anni

I risultati, facendo riferimento a tiranti idrici >10cm (si considera che i primi 10 cm siano assorbiti dal terreno e che entrino negli invasi della rete, senza pertanto contribuire alle aree allagate per insufficiente drenaggio) forniscono lo scenario di esondazioni di Figura 74. Si osserva come la morfologia del territorio penalizzi gli assi di via Bat Yam e via Muratori, che presentano frequenti problemi di allagamento anche in condizioni non estreme.

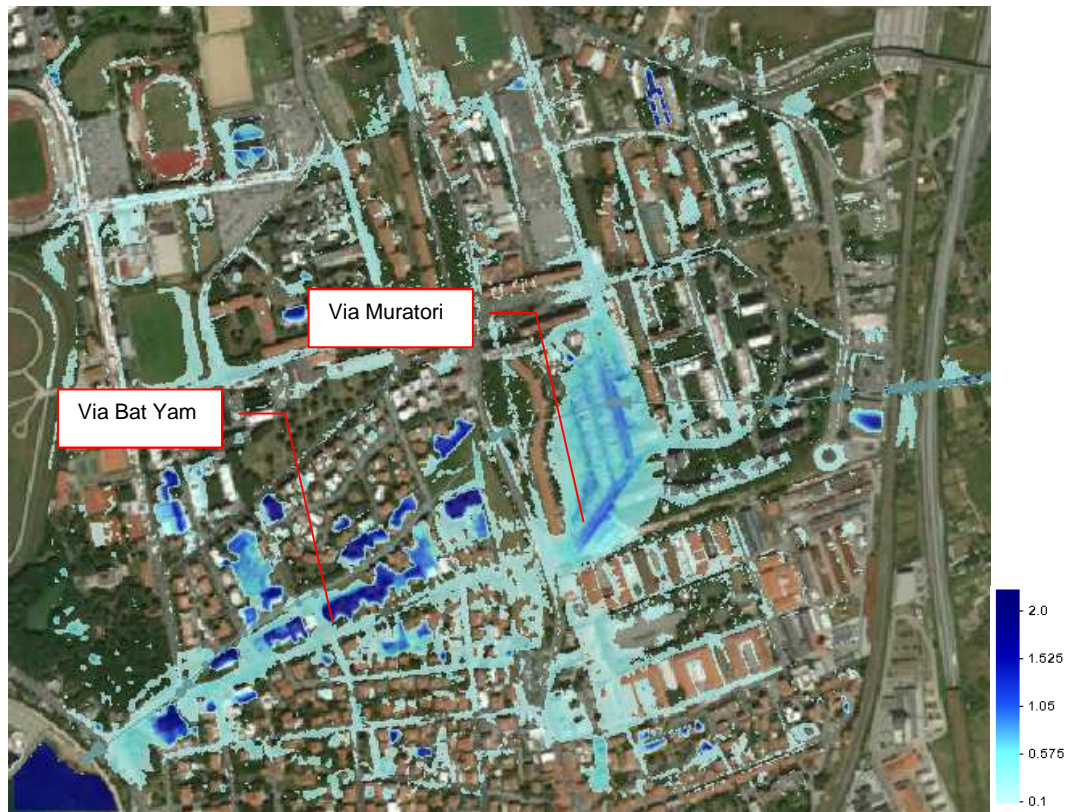
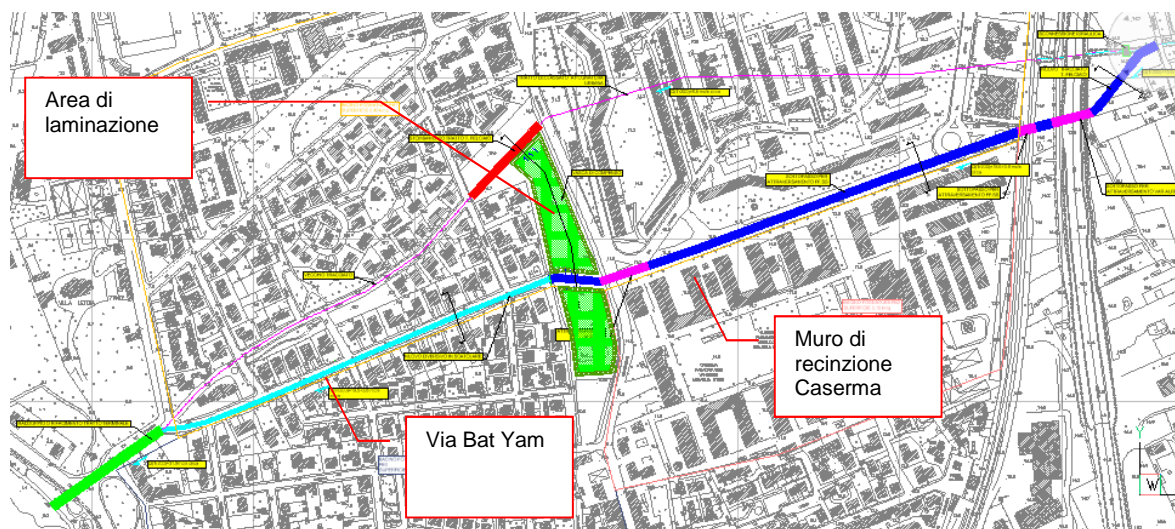


Figura 74 Aree allagate per mancata ricezione della rete di drenaggio per $Tr=200$ anni

L'elevato grado di urbanizzazione del Fosso Felciaio limita fortemente le scelte progettuali che non possono contemplare soluzioni di riapertura integrale del tratto tombato, ormai vincolato dall'edificato. Il grado di riempimento elevato suggerisce di mantenere il tracciato urbano per le fognature bianche del quartiere dell'Ardenza e della "Rosa", deviando il deflusso proveniente dal tracciato a monte della Ferrovia su un nuovo corso d'acqua.

La portata di detto corso d'acqua riceverà le fognature provenienti dalla parte urbana meridionale (FB2 e FB3) corrispondenti per $Tr=200$ anni a $Q_{(FB2)}=3.9$ mc/s e $Q_{(FB1)}=3.8$ mc/s oltre a quelle provenienti da monte.

Il percorso prevede la realizzazione del nuovo fosso in vicinanza al muro di recinzione della Caserma 187 Reggimento Folgore per poi proseguire lungo la via Bat Yam.



In prossimità dell'esistente area verde lungo la Via del Litorale è prevista la realizzazione di un'area di laminazione che entri in funzione solo per eventi estremi. Tale area metterà in comunicazione il nuovo corso d'acqua con l'esistente tracciato del F.Felciaio che pertanto sarà aperto nel tratto che passa attraverso gli esistenti giardini.

Il primo tratto che costeggia l'esistente avrà sezione trapezia e larghezza alla base di 5 m.

Il dimensionamento e la determinazione può essere eseguita mediante la formula di Manning dove

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} \sqrt{i}$$

dove i è la pendenza di fondo (0.5%), A l'area idraulica, R il raggio idraulico (rapporto tra Area idraulica A e contorno bagnato), ed n il coefficiente di scabrezza ($n=0.04$ per parti in terra 0.016 per quelle in cemento)

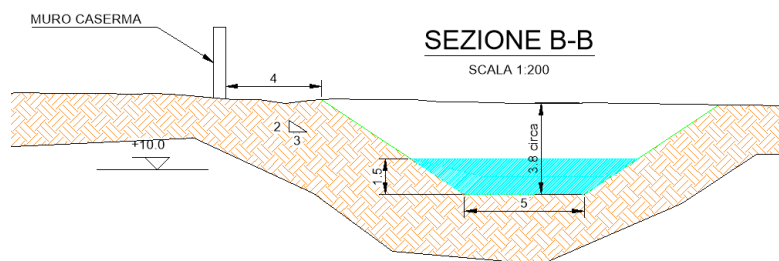


Figura 75 Sezione del tratto iniziale del nuovo fosso del Felciaio

geometria:	trapezia		
base inferiore:	5	m	
profond.idraulica massima:	1.49	m	
scarpa:	1.5		
scabrezza (Manning)	0.040		
Pendenza:	0.0050		
Area:	10.759	mq	
Contorno bagnato:	10.364	m	
Raggio idraulico:	1.038	m	
Portata moto uniforme (f. Manning):	19.500	mc/s	

Figura 76 Dimensionamento del tratto in terra a sezione

Il tratto di Via Bat Yam assume la funzione di diversivo dell'intero corso d'acqua e sarà realizzato in scatolare in cemento (Figura 77). La portata in questo tratto risulta pari a $Q=23.3 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tirante idrico di circa 1.3m (Figura 78).

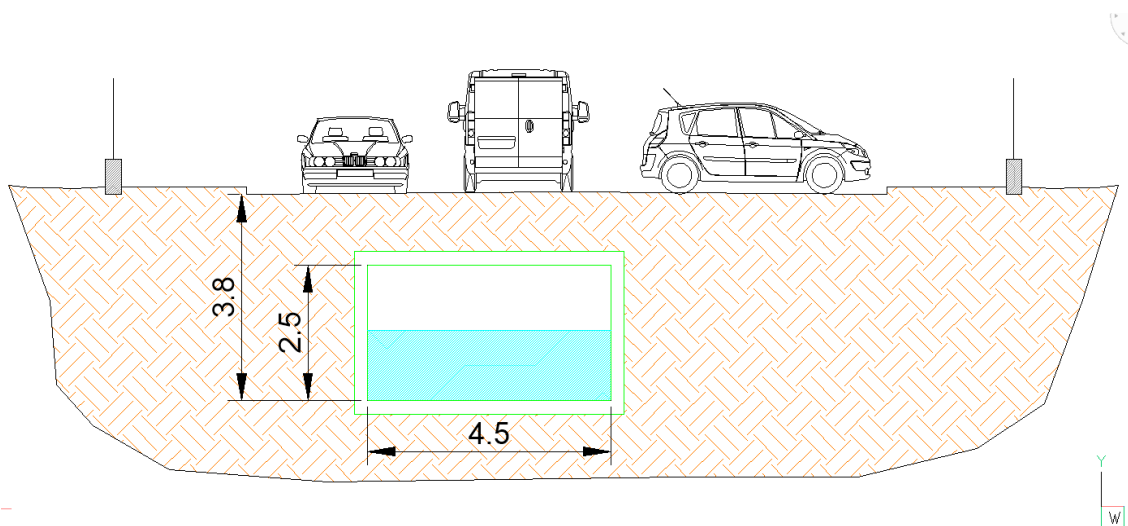


Figura 77 Sezione tipo del tratto lungo via BatYam

geometria:	rettangolare
base inferiore:	4.5 m
profond.idraulica massima:	1.32 m
scarpa:	0
scabrezza (Manning)	0.016
Pendenza:	0.0050
Area:	5.954 mq
Contorno bagnato:	7.146 m
Raggio idraulico:	0.833 m
Portata moto uniforme (f. Manning):	23.300 mc/s

Figura 78 Dimensionamento del tratto in scatolare

Il tratto terminale dovrà avere una sezione adeguata per una portata complessiva $Q=31.8 \text{ m}^3/\text{s}$. In questo caso è necessaria una sezione scatolare di circa 8m di larghezza in sostituzione dell'esistente percorso (Figura 79).

geometria:	rettangolare
base inferiore:	8 m
profond.idraulica massima:	1.028326847 m
scarpa:	0
scabrezza (Manning)	0.016
Pendenza:	0.0050
Area:	8.227 mq
Contorno bagnato:	10.057 m
Raggio idraulico:	0.818 m
Portata moto uniforme (f. Manning):	31.800 mc/s

Figura 79 Dimensionamento del tratto in scatolare nel tratto terminale

5.1.2 Fosso Felciaio e Querciaio

I fossi del Felciaio e del Querciaio interessano prevalentemente l'area della Scopaia. La griglia di calcolo presenta dimensioni di 2.1x1.2 km con dimensioni delle celle 2x2 m. La base topografica è quella lidar in attesa che siano disponibili le sezioni commissionate dalla Regione Toscana.

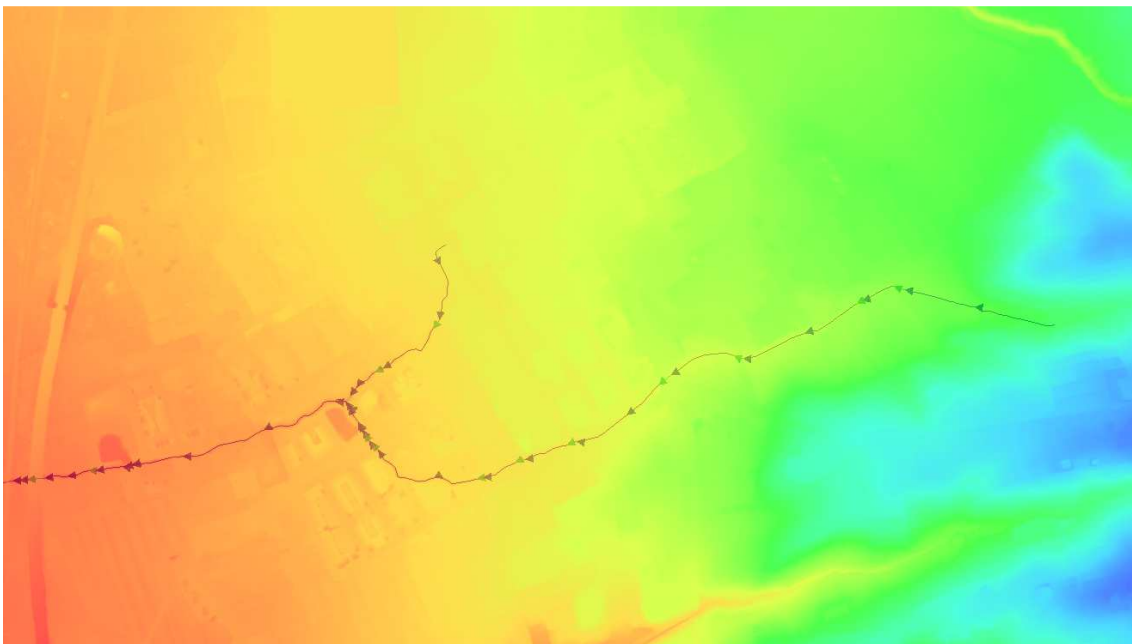


Figura 80 Griglia di calcolo T. Felciaio e T. Querciaio

Le condizioni al contorno sono riportate in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..** L'analisi è stata condotta nel dominio 1D/2D con scabrezza dei canali pari a 0.045. Tutti i dati topografici sono stati estrapolati dal Lidar forzando una riduzione di sezione del 15% in corrispondenza dei manufatti di attraversamento.

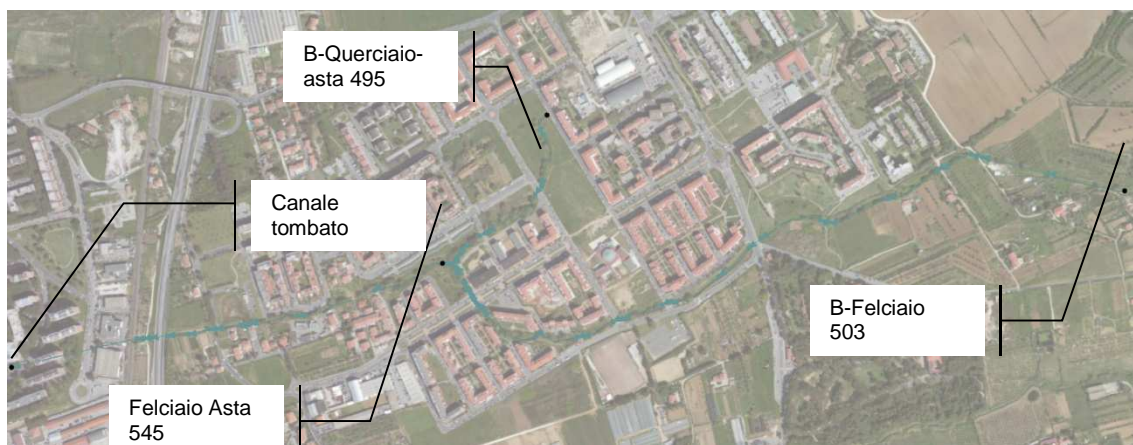


Figura 81 Condizioni al contorno

La condizione di uscita è stata imposta con una tubazione con sezione di capacità di deflusso pari a 18 mc/s, capacità limite individuata dallo studio del Prof. Cavazza.

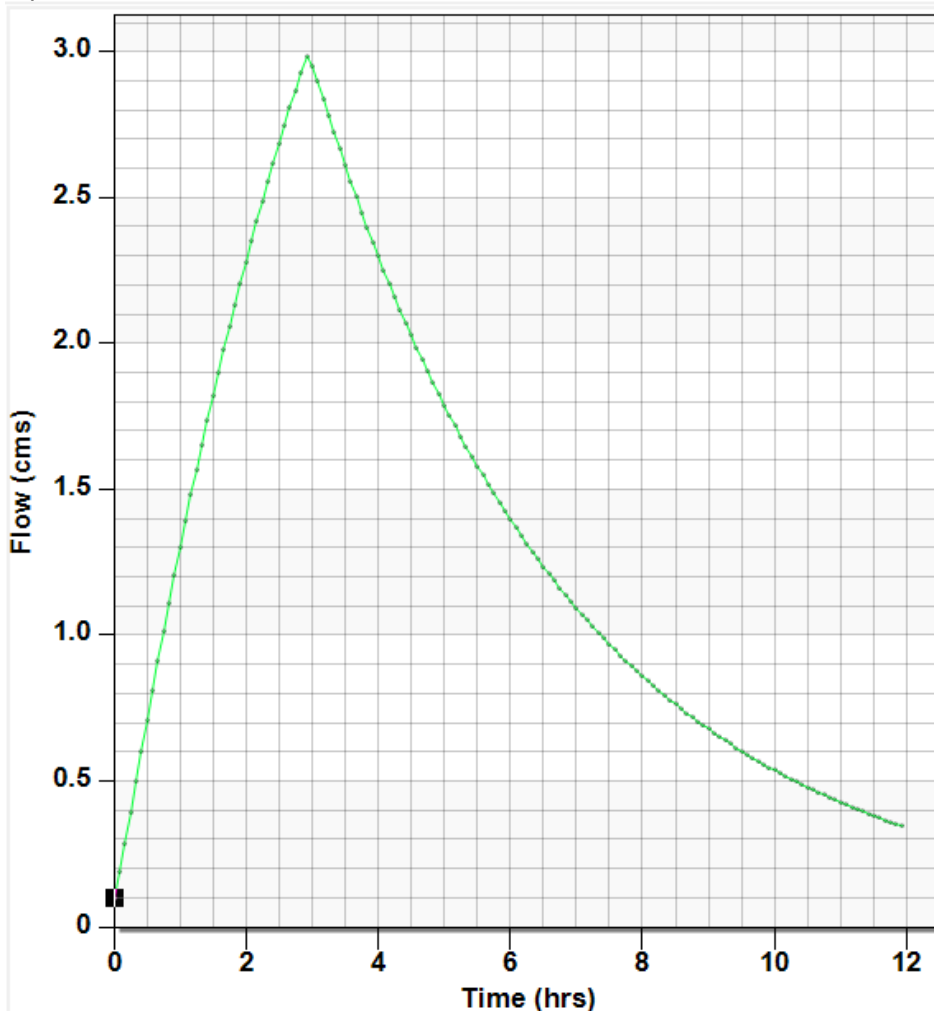


Figura 82 Idrogrammi di piena Querciaio – asta 495-Tr200

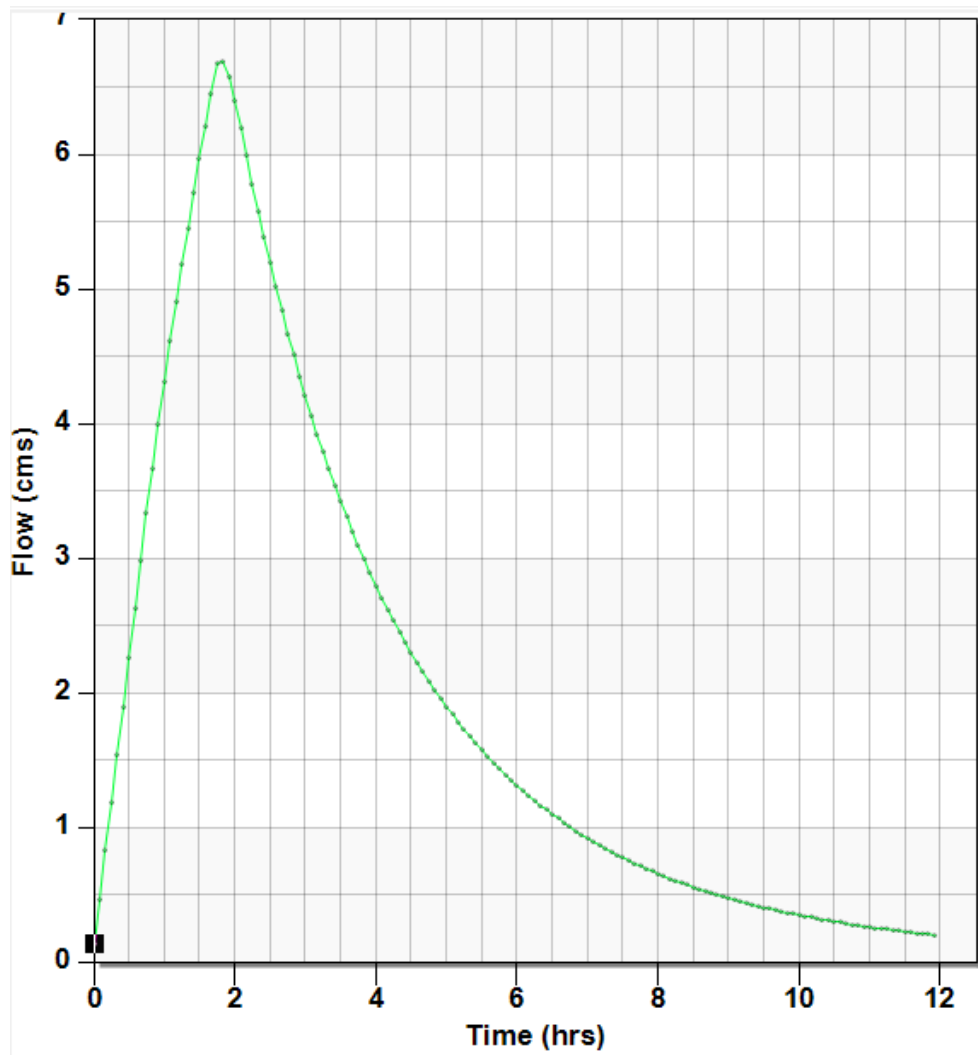


Figura 83 Idrogramma di piena Felciaio -asta 503- Tr200

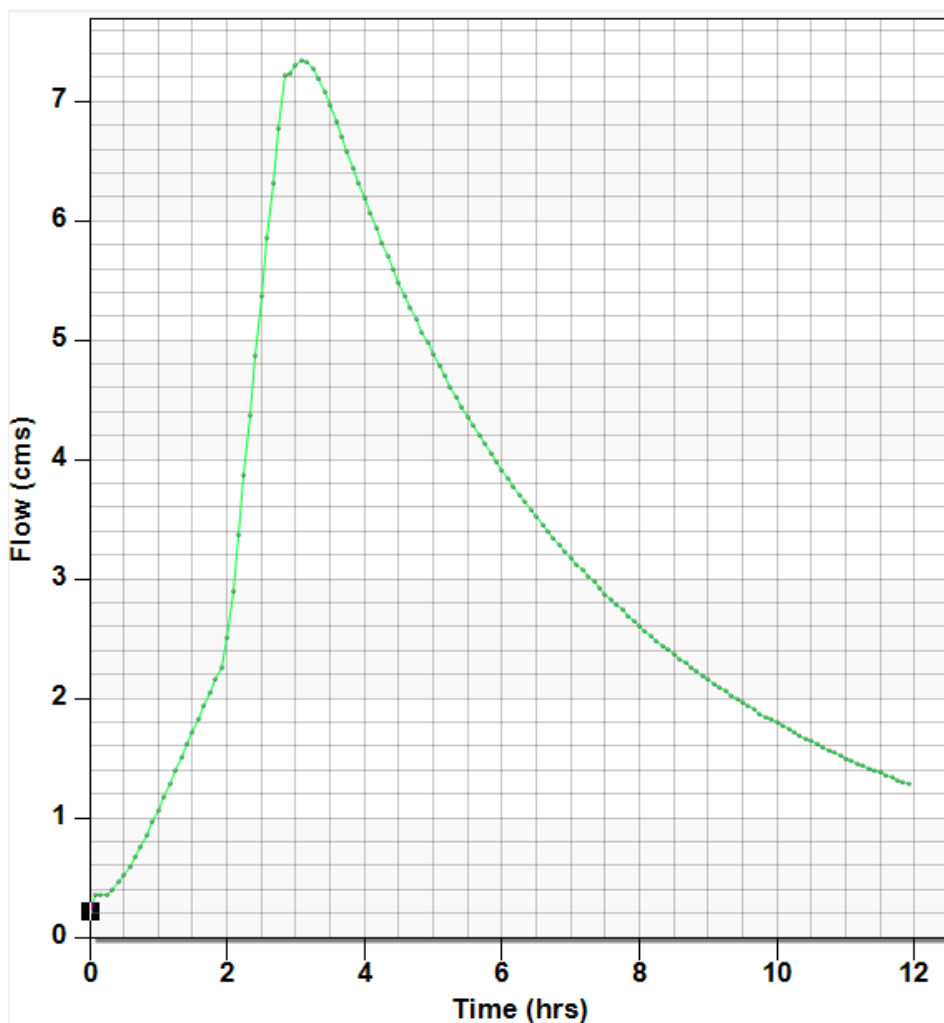


Figura 84 Idrogramma di piena Felciaio2

I risultati evidenziano il corretto funzionamento delle casse di laminazione e delle risagomature d'alveo previste negli interventi eseguiti negli anni 2000. Si verificano limitate uscite nei tratti principali comunque circoscritte e facilmente risolvibili. Rimangono problemi solo nella parte terminale prima del tombamento della ferrovia che crea un rigurgito significativo. I tiranti di esondazione sono riportati in Figura 85, Figura 86 e Figura 87.



Figura 85 Tiranti idrici Tr=200 anni per T. Querciaio e Felciaio



Figura 86 Tiranti idrici $T_r=30$ anni per T. Querciaio e Felciaio



Figura 87 Tiranti idrici $T_r=500$ anni per T. Querciaio e Felciaio

5.1 Rio Ardenza

Il Rio Ardenza è stato studiato con una modellazione 1D/2D. Le sezioni topografiche sono state fornite dalla Regione Toscana nell'ambito degli interventi di sistemazione post alluvione, mentre come dato di base è stato impiegato il Lidar. L'estensione della griglia di calcolo è di circa 5.5x2.6 km (Figura 88). I tratti analizzati sono riportati in Figura 89 mentre le condizioni al contorno sono indicate in Figura 90. Per il moto nei canali è stato impiegato un coefficiente di scabrezza $n=0.035$.

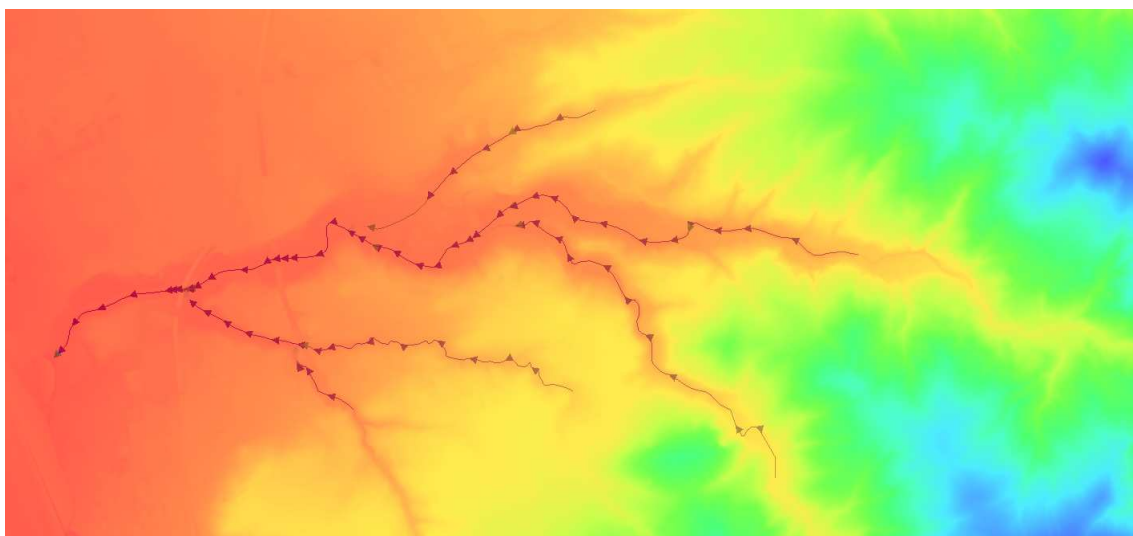


Figura 88 Griglia di calcolo Rio Ardenza



Figura 89 Tratti oggetto di indagine Rio Ardenza

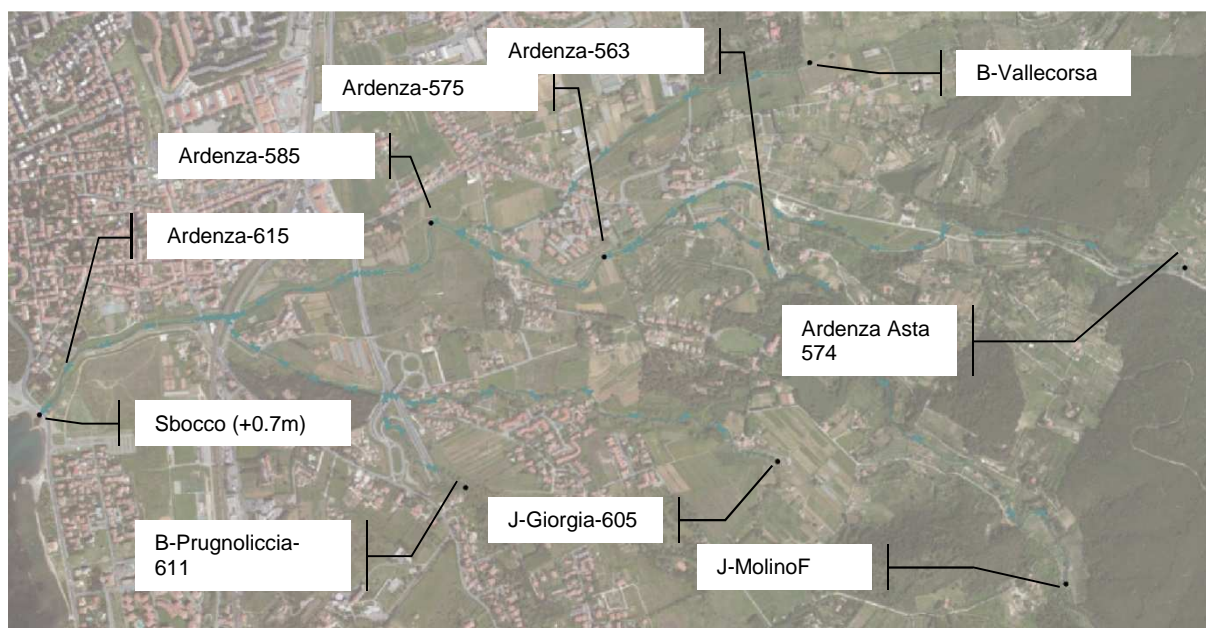


Figura 90 Condizioni al contorno Rio Ardenza

Gli idrogrammi di piena sono meglio specificati nelle figure che seguono.

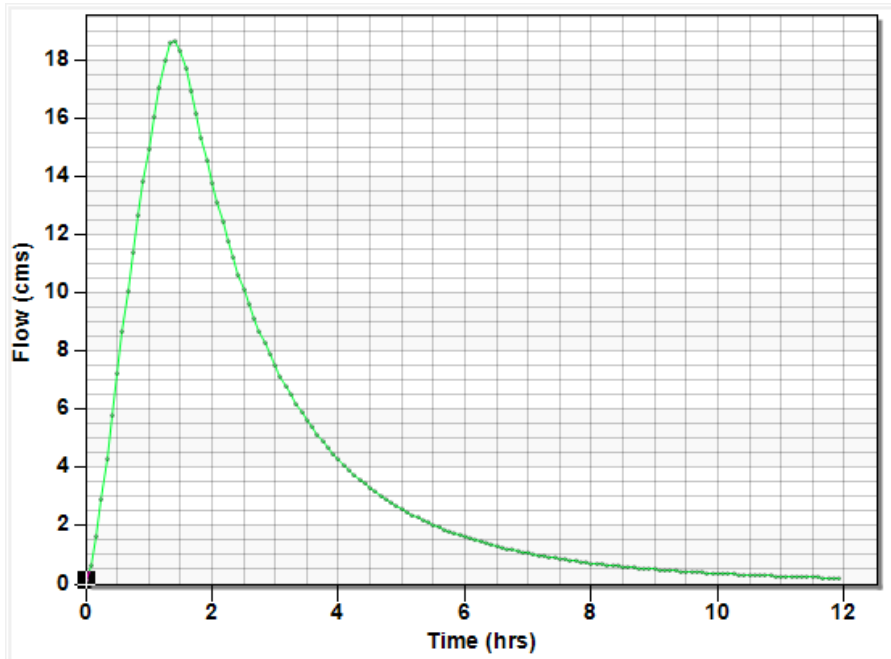


Figura 91 Idrogramma di piena Prugnoliccia -611- Tr200

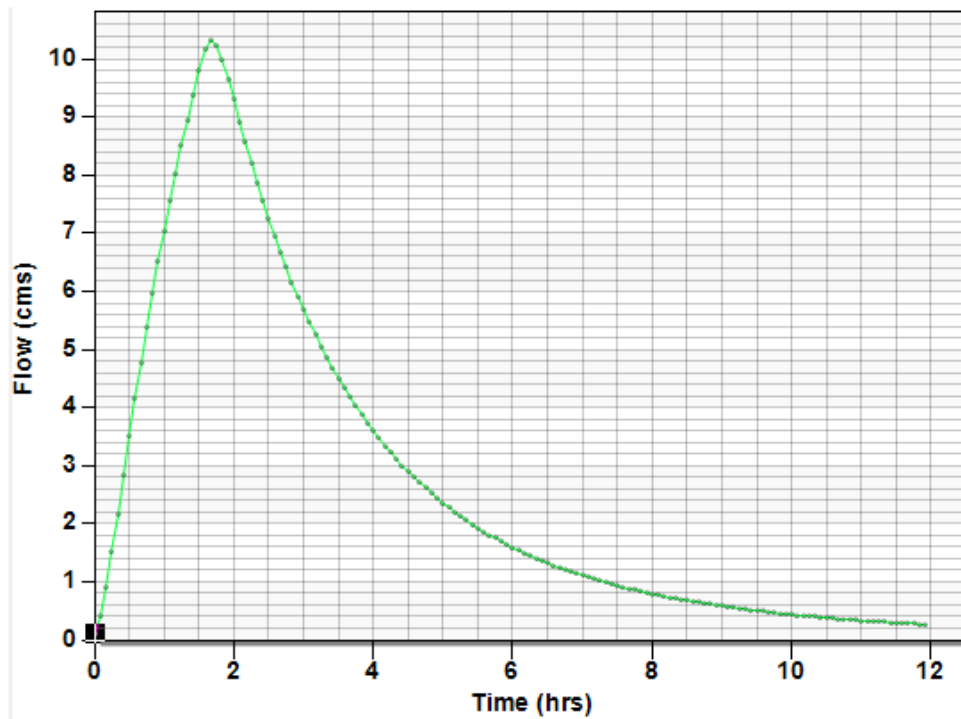


Figura 92 Idrogramma di piena Vallecorsa-asta 562 -Tr200

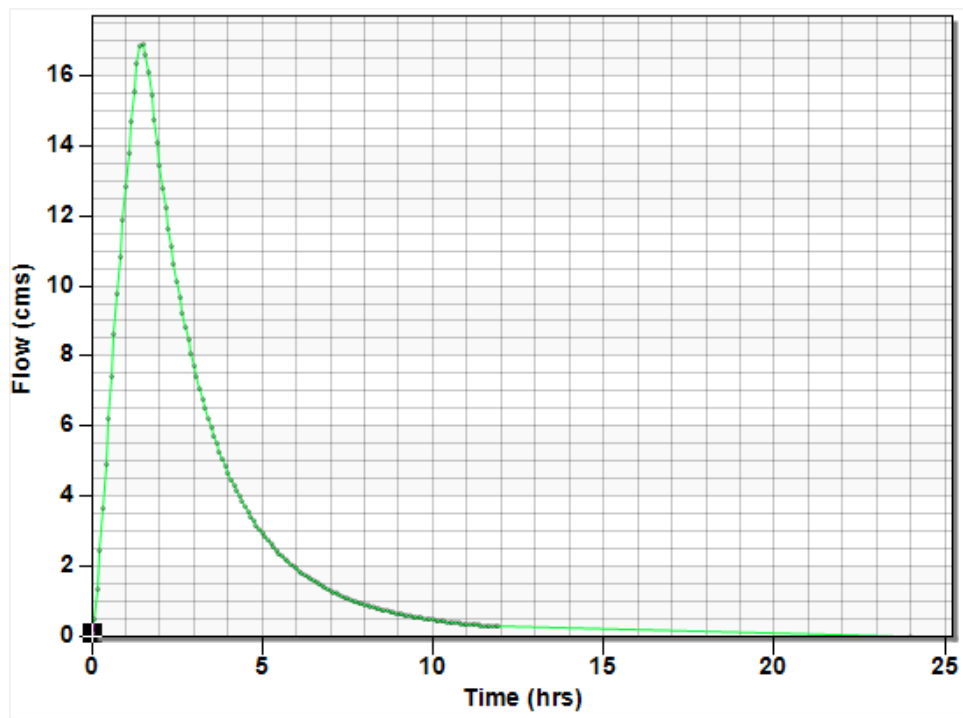


Figura 93 Idrogramma di piena confluenza Giorgia- asta 605-Tr200

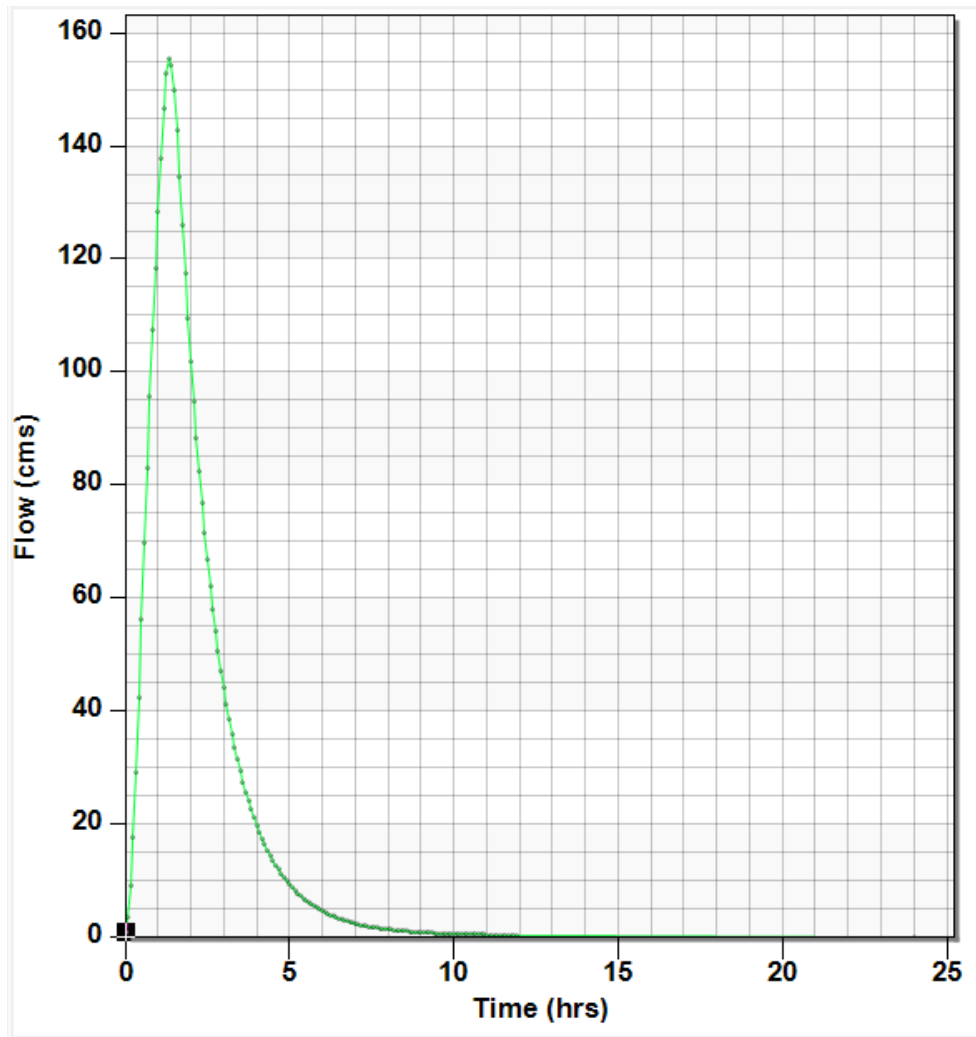


Figura 94 Idrogramma di piena Ardenza-asta 574 -Tr200

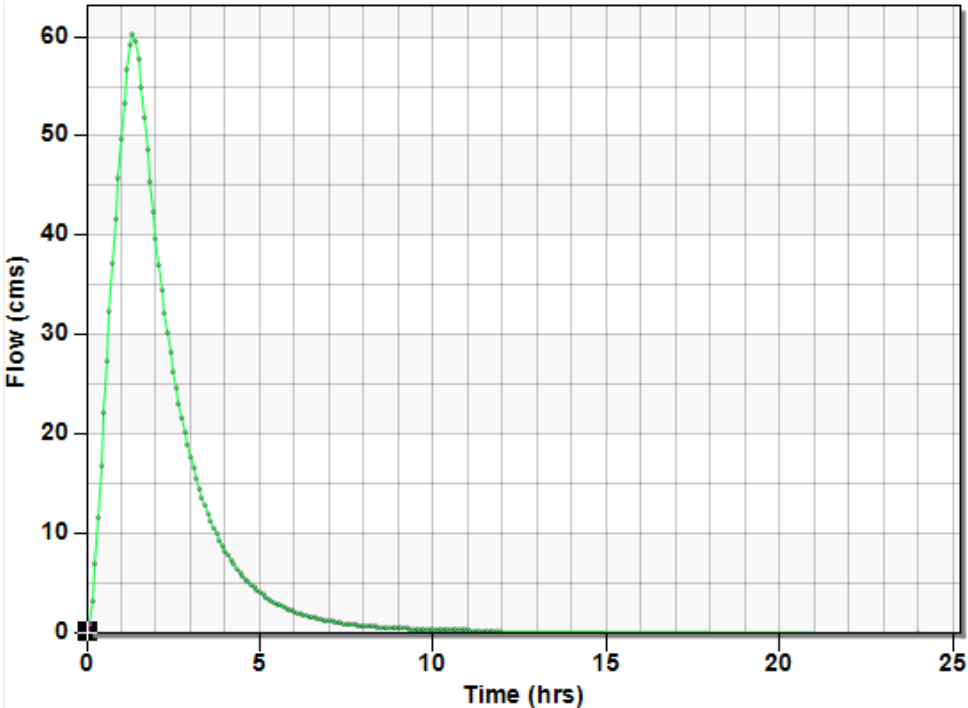


Figura 95 Idrogramma di piena Molino -asta 590-Tr200

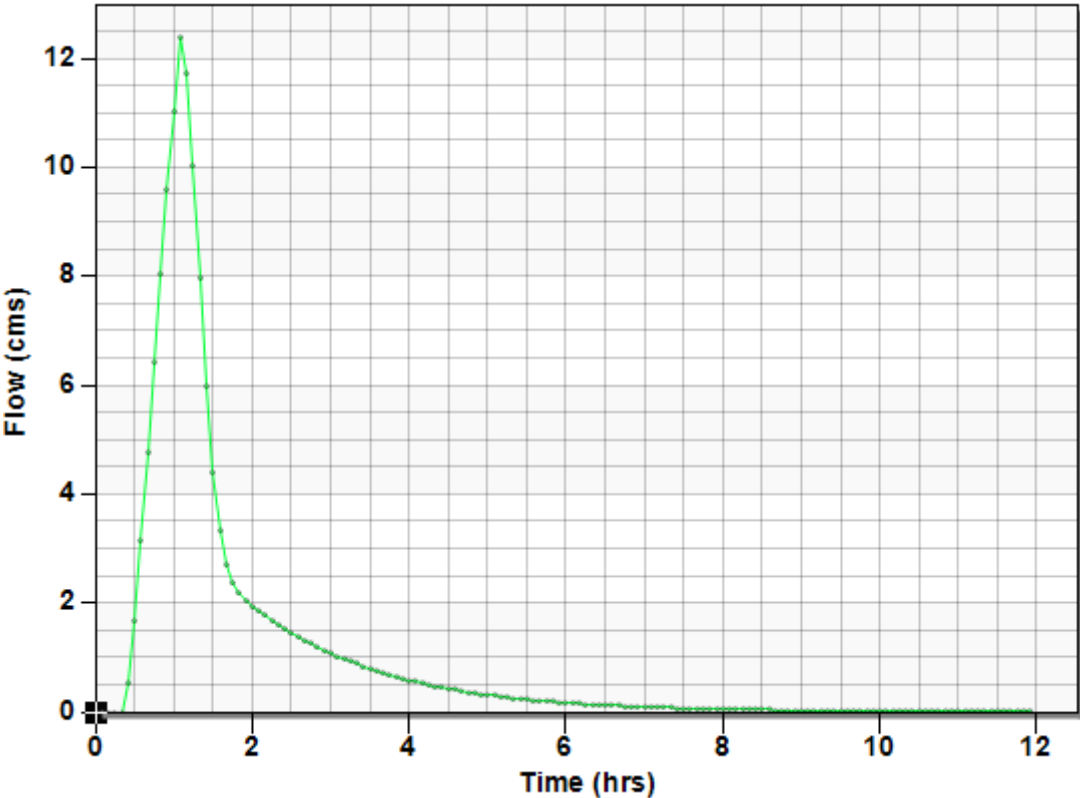


Figura 96 Idrogramma di piena Ardenza 563- Tr200

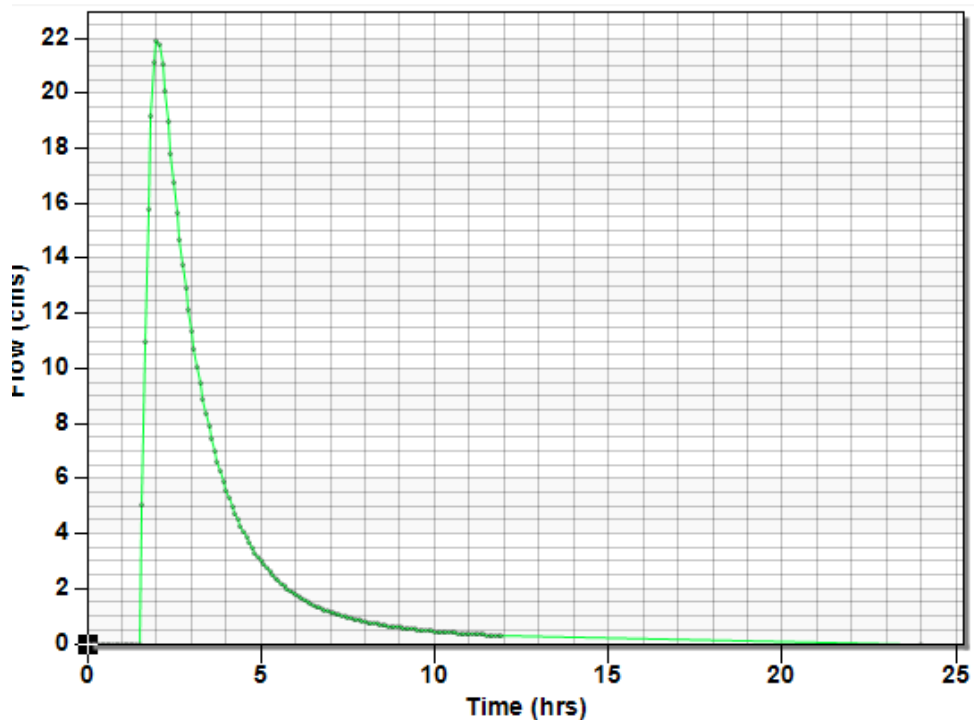


Figura 97 Idrogramma di piena Ardenza-575- Tr200

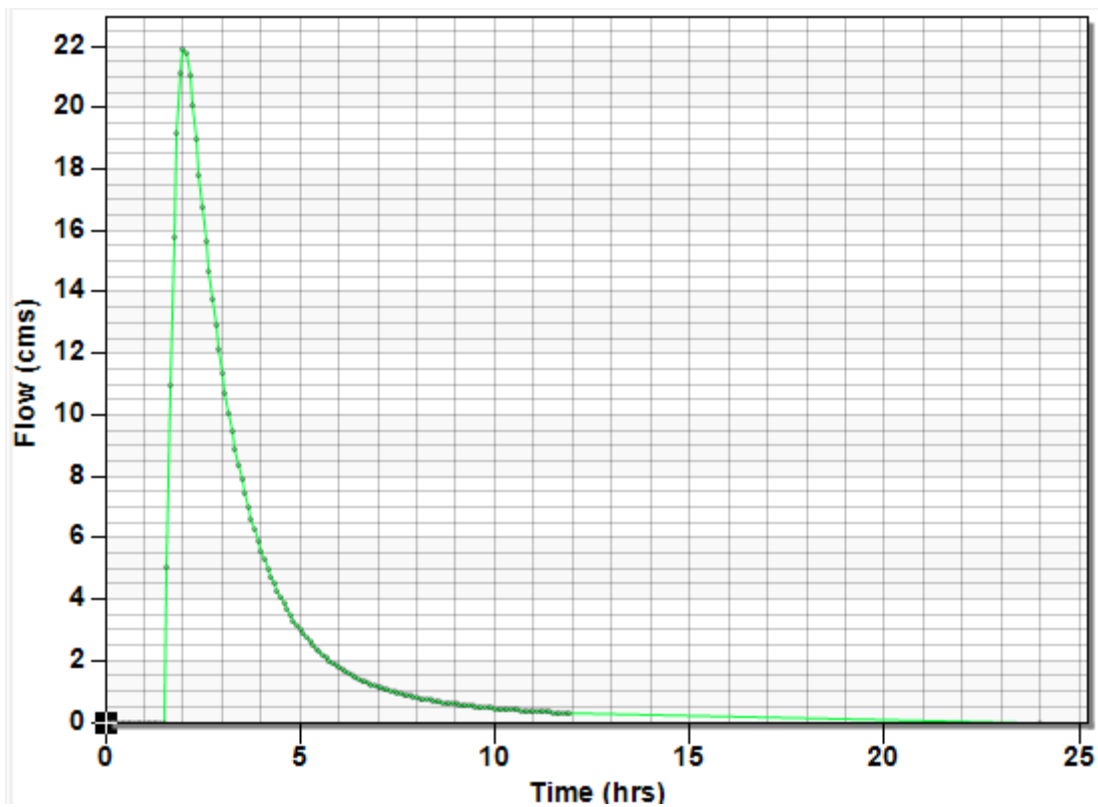


Figura 98 Idrogramma di piena Ardenza-585 - Tr200

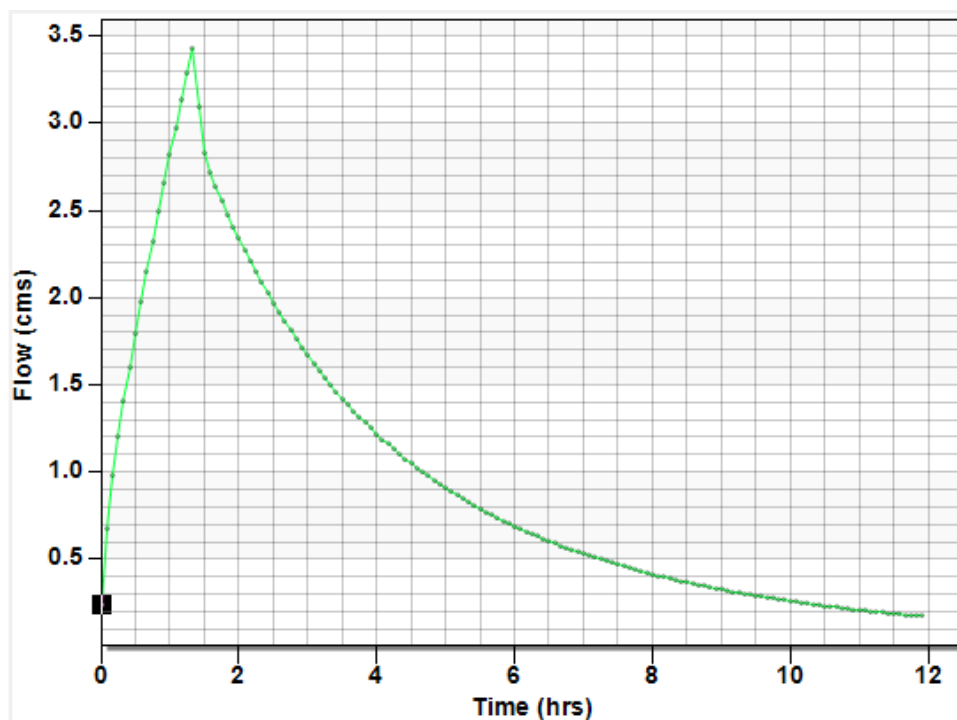


Figura 99 Idrogramma di piena Ardenza-615 - Tr200

I risultati evidenziano diffuse criticità, aggravate dalla presenza dei manufatti di attraversamento, specialmente nel tratto arginato dove si verificano diffusi sormonti. Questo anche a valle del ponte sull'Aurelia primo dello sbocco in Loc. 3 Ponti.

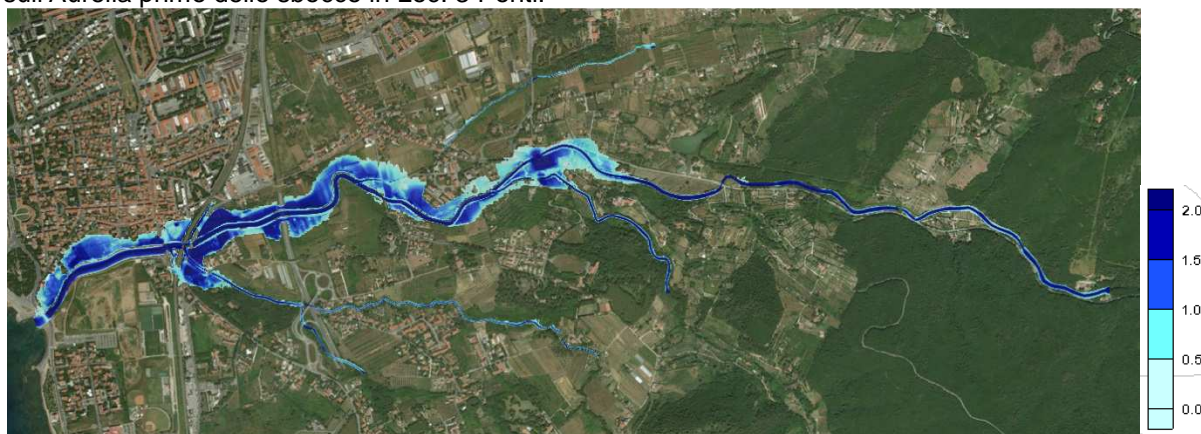


Figura 100 Tiranti idrici per il rio Ardenza Tr=200 anni

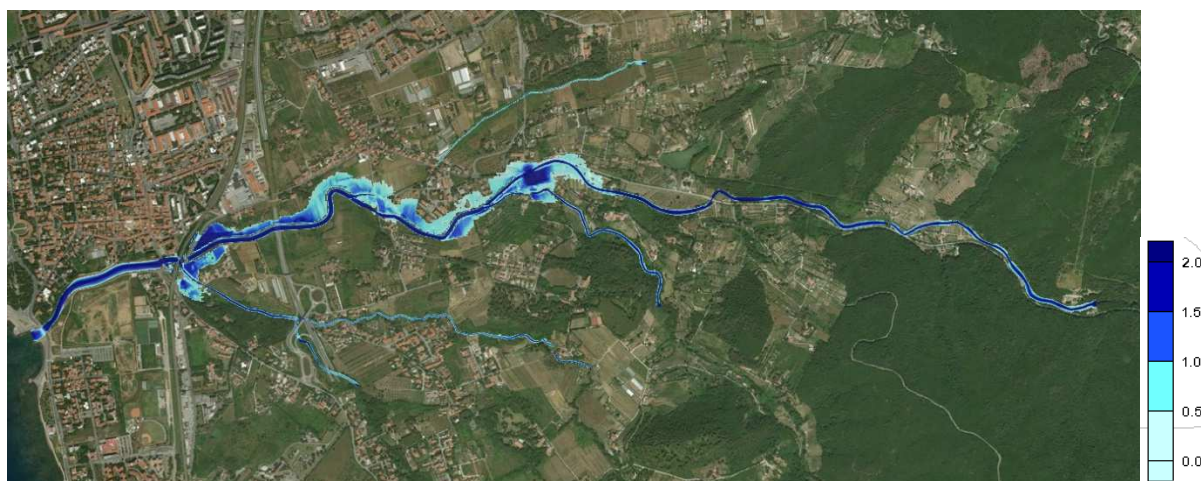


Figura 101 Tiranti idrici per il rio Ardenza Tr=30 anni



Figura 102 Tiranti idrici per il rio Ardenza per l'evento ricostruito (equivalente a Tr500 anni)

5.2 Fosso della Banditella e Bacini di Montenero

La griglia di calcolo ha dimensioni di 3.0x1.6 km con celle 2x2m. Il dominio di calcolo è completamente bidimensionale (2D) nella zona di Montenero ed 1D/2D nella parte valliva (impiegano i rilievi eseguiti nel mese di Marzo da parte della Regione Toscana).

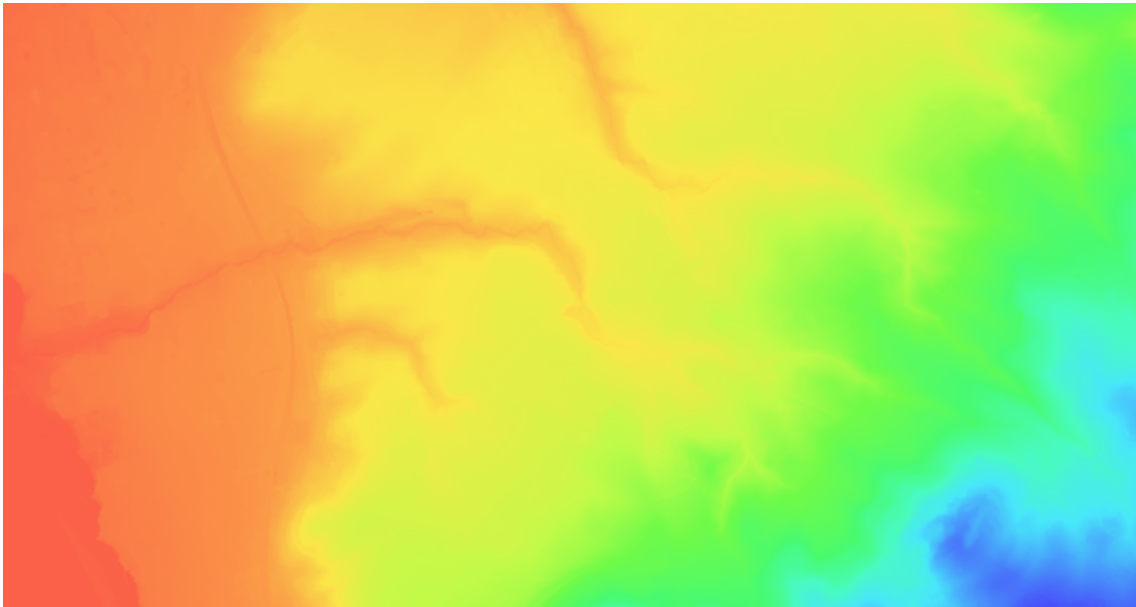


Figura 103 Griglia di calcolo bacini di Montenero e Rio Banditella

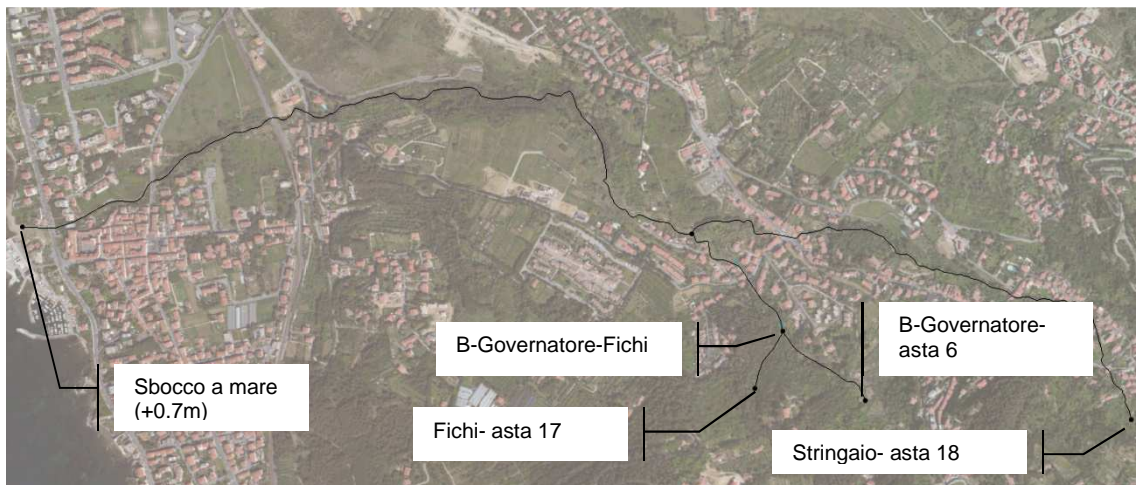


Figura 104 Tratti investigati e condizioni al contorno

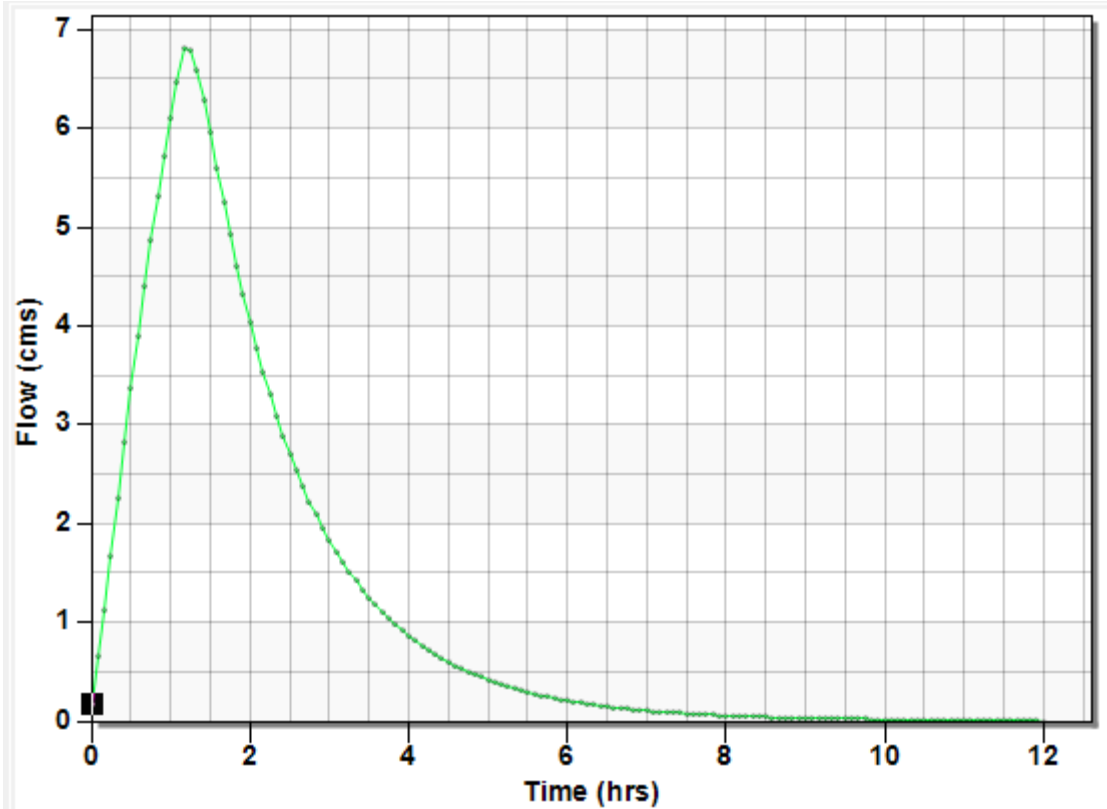


Figura 105 Idrogramma di piena Botro Stringaio –asta 18- Tr200

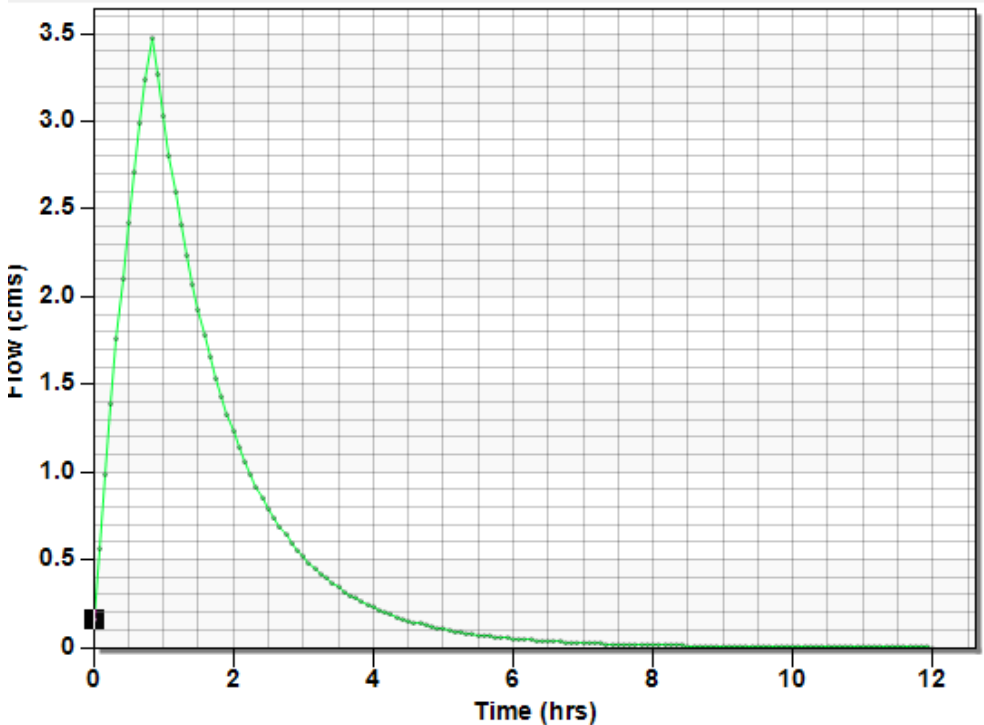


Figura 106 Idrogramma di piena bacino Governatore asta 6 –Tr200

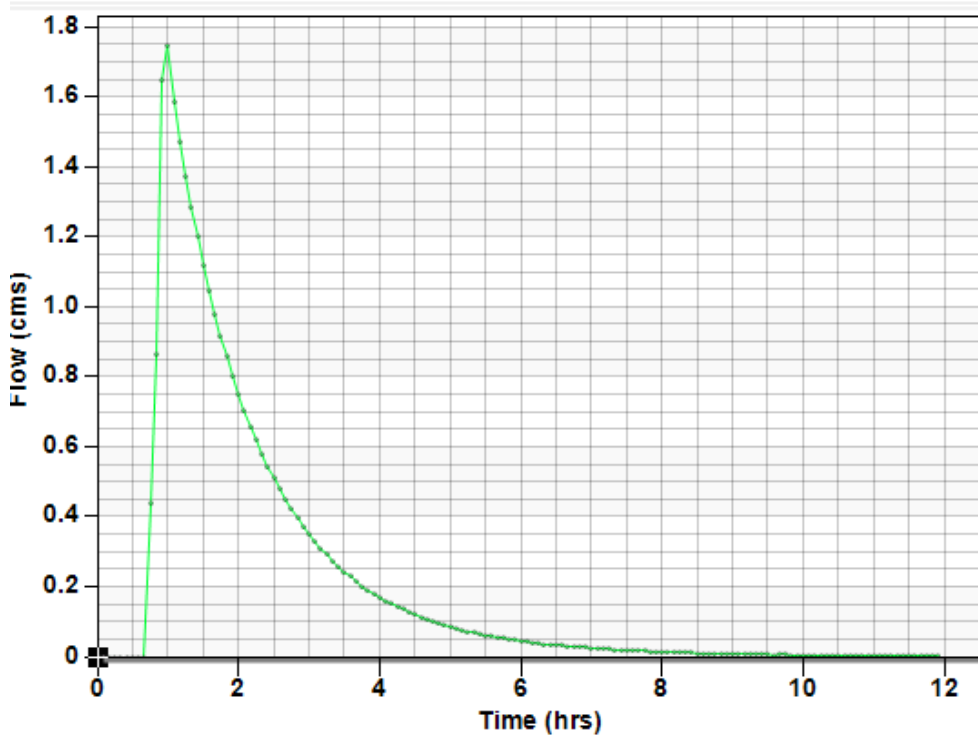


Figura 107 Idrogramma di piena bacino Governatore -Fichi

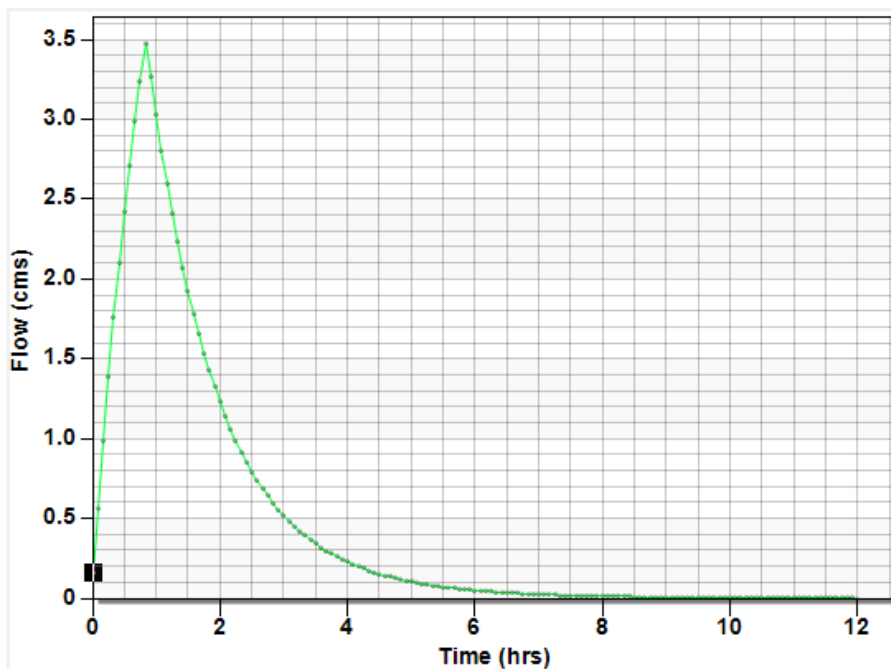


Figura 108 Idrogramma di piena bacino Fichi- asta 17 -Tr200

I risultati evidenziano problematiche diffuse ma di modesta entità. Le elevate pendenze rendono i tiranti bassi dell'ordine di pochi centimetri. Le zone di ristagno si verificano in piazza delle Carrozze.

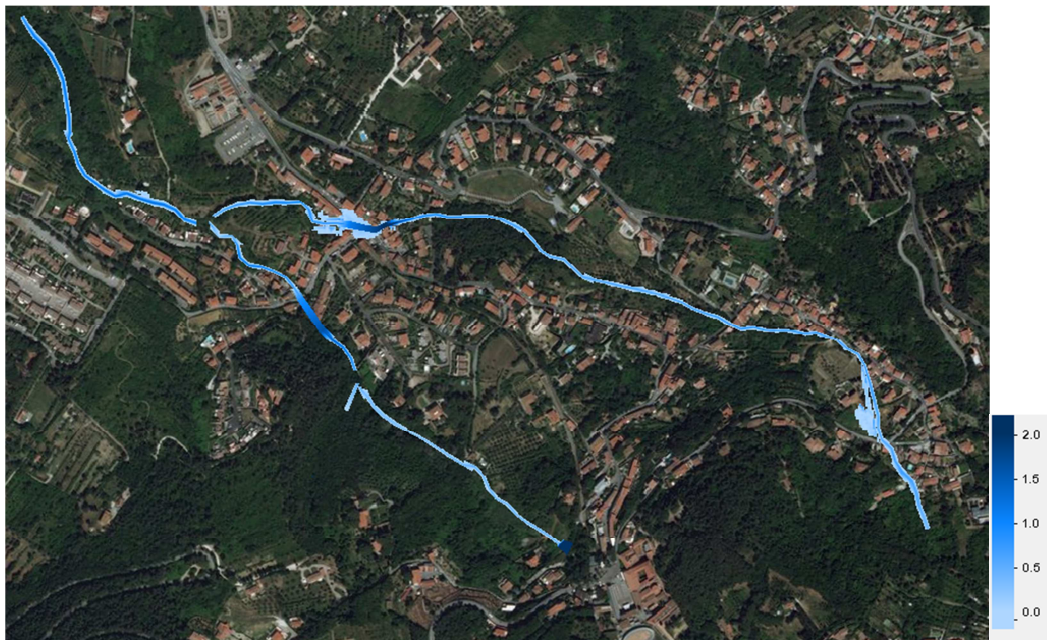


Figura 109 Tiranti idrici per $T_r=200$ anni- bacino di Montenero

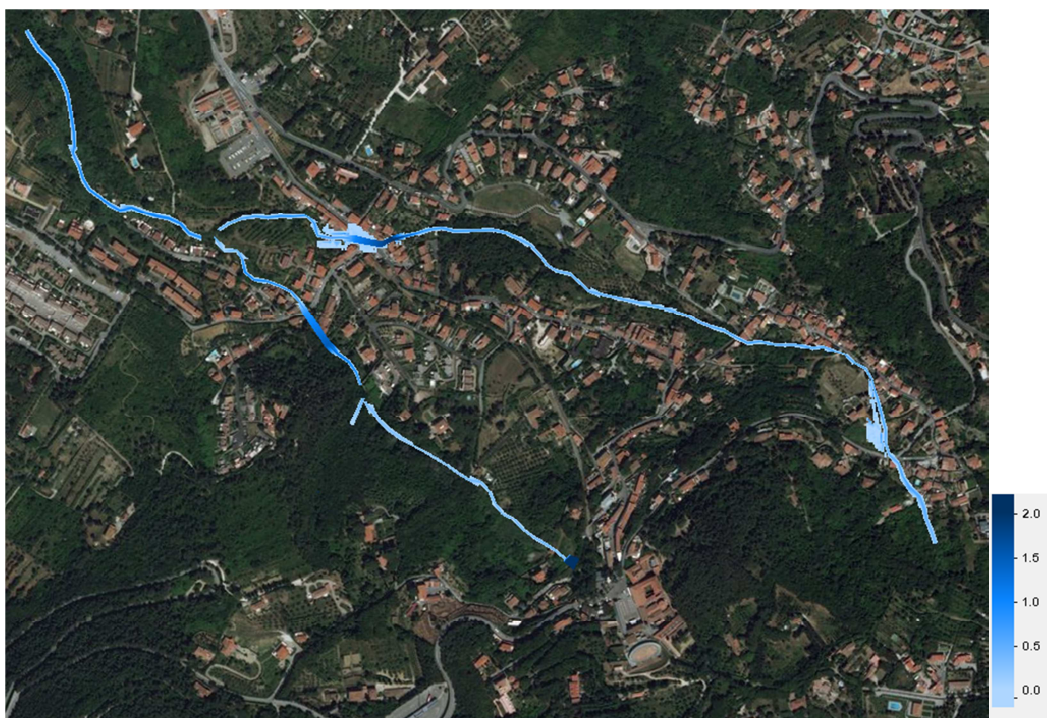


Figura 110 Tiranti idrici per $T_r=30$ anni

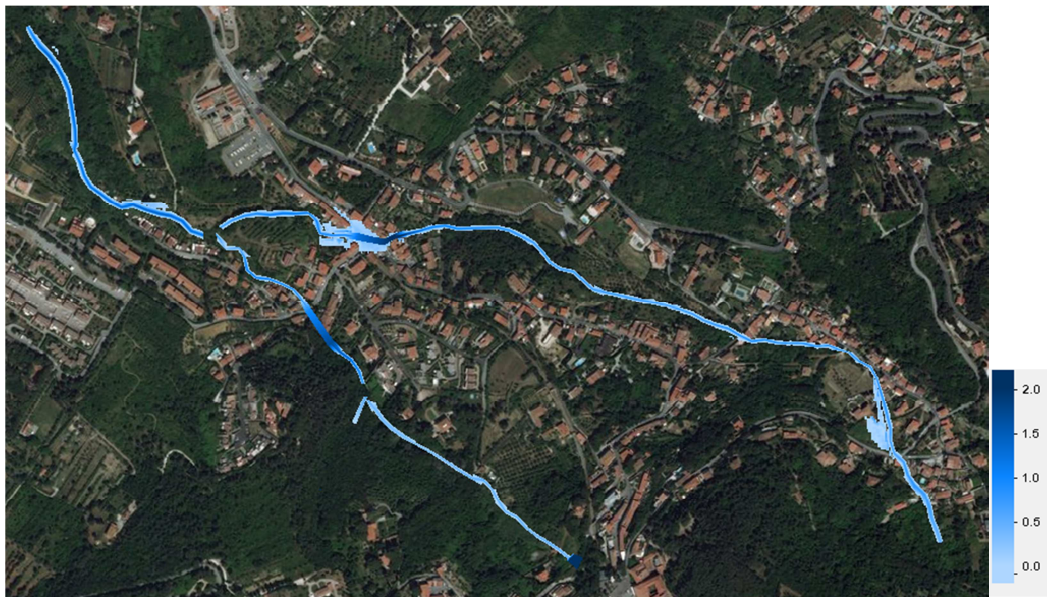


Figura 111 Tiranti idrici per $Tr=500$ anni

Preme osservare una difformità tra il fosso del Governatore come reale e come indicato nel reticolo della LR 79/2012. Detto fosso in prossimità della Via del Governatore non prosegue lungo il percorso indicato dalla cartografia, ma viene deviato in un altro collettore che costeggia le proprietà della Villa della Vinca per poi trasformarsi in una fognatura urbana interrata che confluisce nel Botro dello Stringaio in Piazza delle Carrozze.



Figura 112 Percorso rilevato del Fosso del Governatore

Di recente è stato predisposto un collegamento di bypass di troppo pieno per convogliare le acque nel percorso originario.

Per la parte a valle della confluenza con il Botro Stringaio –Botro ai Fichi è stata effettuata una seconda simulazione su griglia di 1.5x1 km con celle di passo 2x2 m, al fine di massimizzare le esondazioni nel tratto terminale (Figura 113). La condizione al contorno di ingresso è infatti costituita dalla portata idrologica senza considerare eventuali sottrazioni a monte (Figura 114).

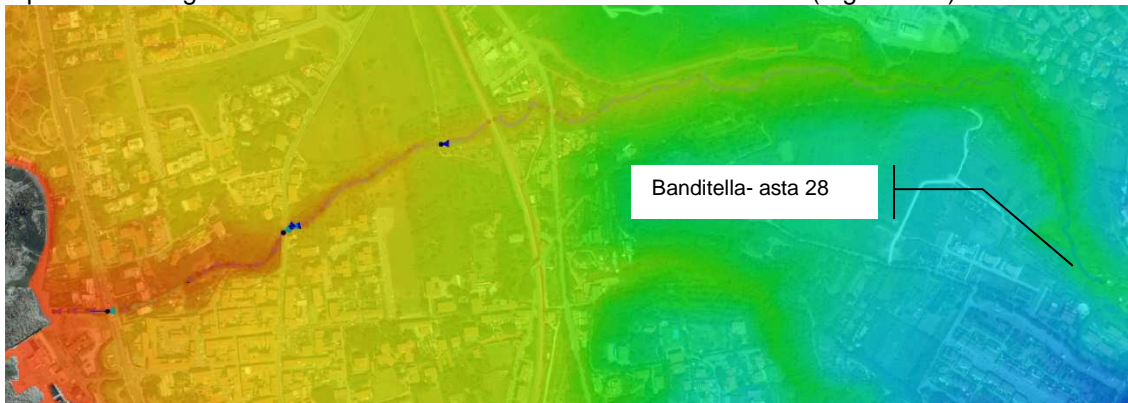


Figura 113 Griglia per l'analisi a valle delle ferrovia

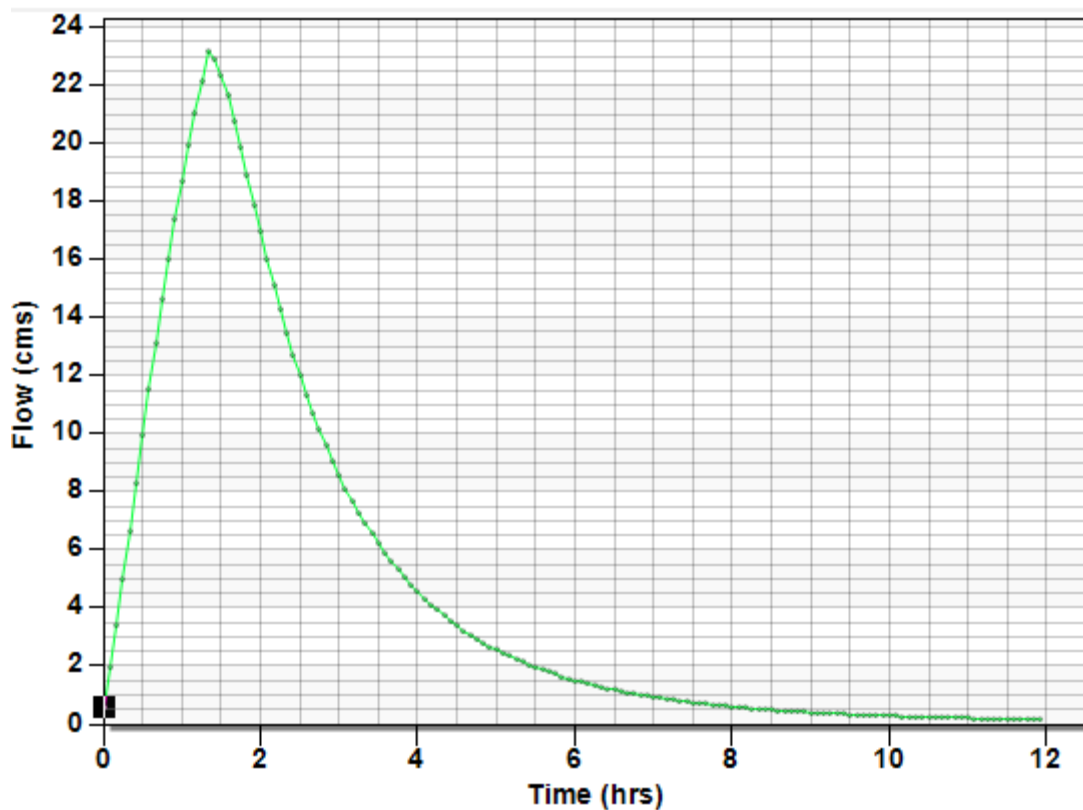


Figura 114 Idrogrammi di piena Banditella asta 28 Tr200

I risultati sono riportati nelle figure che seguono.

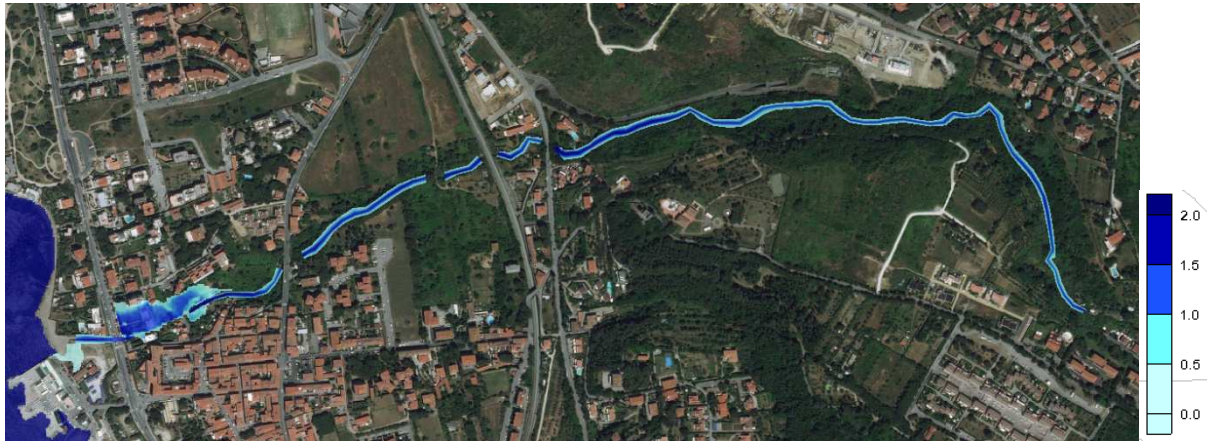


Figura 115 Tiranti idrici $Tr=200$ anni

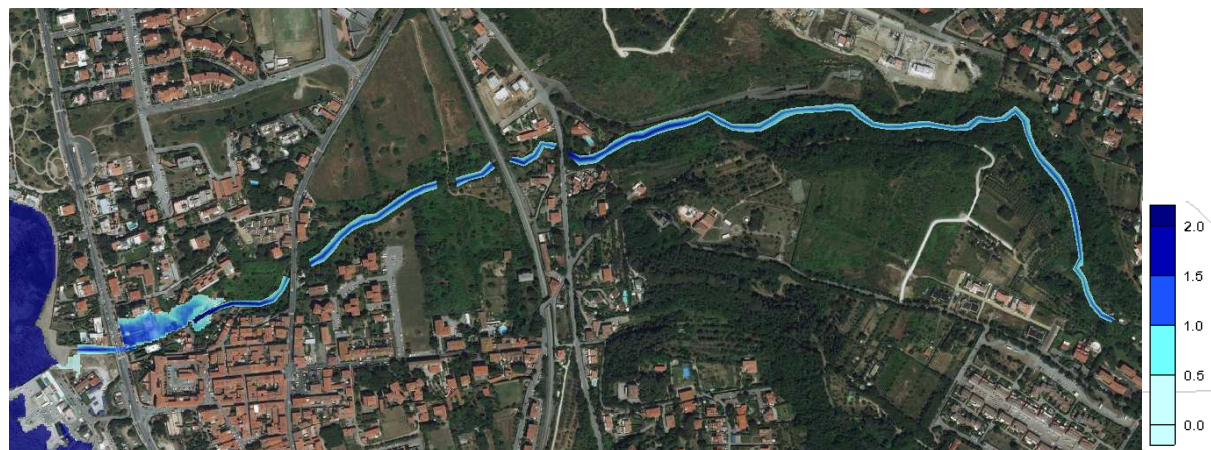


Figura 116 Tiranti idrici $Tr=30$ anni

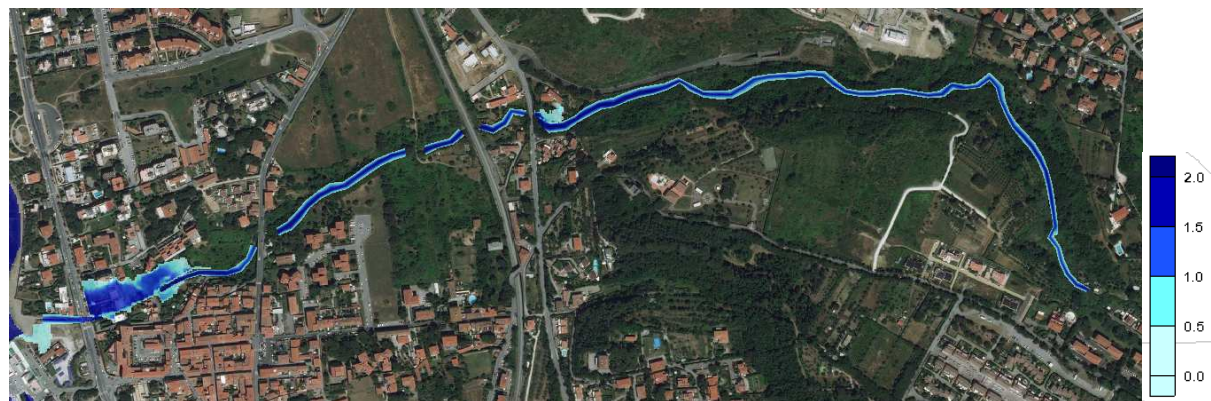


Figura 117 Tiranti idrici per evento sett. 2017 (equivalente a $Tr=500$ anni)

5.3 Botro delle Pianacce

Si tratta di un corso d'acqua che attraversa l'abitato di Antignano. Risulta in gran parte tombato con sbocco poco più a sud del porticciolo omonimo (Figura 118).



Figura 118 Sblocco a mare del Botro delle Pianacce

Altro attraversamento si ha in prossimità della Ferrovia in un contesto idrografico di difficile identificazione (Figura 119).



Figura 119 Tombamento a valle della Ferrovia

La modellazione è stata eseguita su un'area di circa 0.73x0.65 maglia 2x2 m.
Le portate in ingresso sono state ricavate dallo studio idrologico del presente lavoro non essendo stato analizzato dal Prof. Castelli nel suo report post evento alluvione 2018. Il tempo critico del corso d'acqua è stato valutato in circa 0.75 con una portata massima $Q_{200}=18.6\text{mc/s}$. Per come è

strutturato il bacino tale portata è assegnata per 2/3 a monte dell'attraversamento della ferrovia e per 1/3 a valle dello stesso (prima del tratto tombato terminale) come

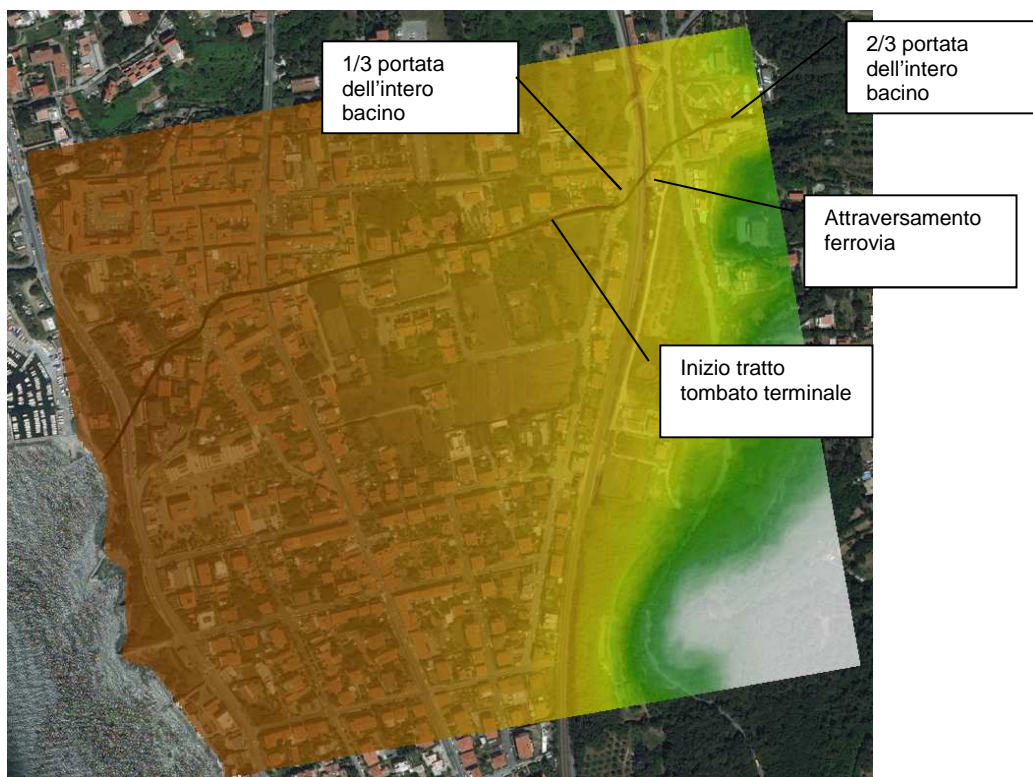


Figura 120 Griglia di calcolo Botro delle Pianacce

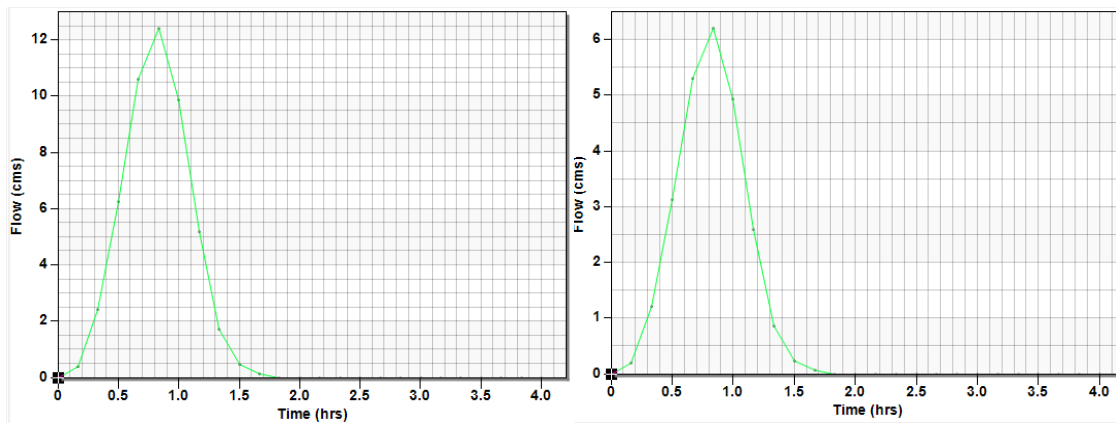


Figura 121 Idrogrammi di piena a monte dell'attraversamento della ferrovia (a sinistra) ed a valle della stessa (a destra)

I risultati evidenziano l'insufficienza di entrambi gli attraversamenti per le portate in arrivo. Le fuoriuscite tendono a riversarsi diffusamente tra le strade di quartiere (Figura 122 e Figura 123) sebbene stante l'elevata pendenza del territorio i tiranti si mantengono modesti (dell'ordine di 10-20cm).



Figura 122 Aree allagate per il botro delle Pianacce per $Tr=200$ anni



Figura 123 Aree allagate per il botro delle Pianacce per $T_r=30$ anni

5.4 Bacini di Quercianella

Il dominio di calcolo è del tipo 2D su griglia di dimensione 3.5x1km con celle 2x2m (Figura 124). Le condizioni al contorno sono riportate in Figura 125. Per il T. Chioma e Fosso della Quercianella si fa riferimento alle portate dello studio del Prof. Castelli mentre per quelle degli altri corsi d'acqua (non valutati dal prof Castelli) alle portate determinate con la metodologia sopra illustrata.

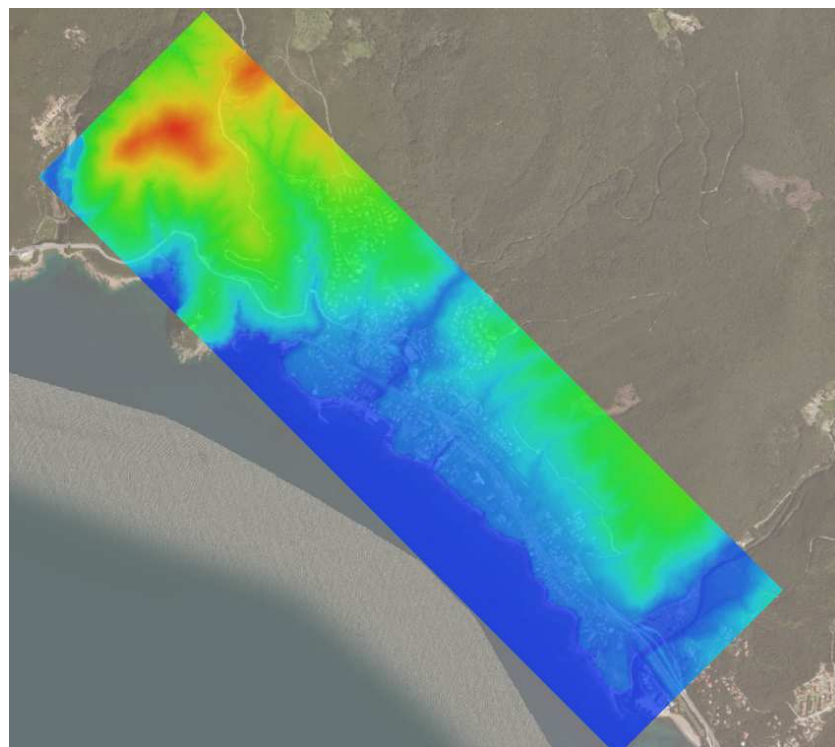


Figura 124 Griglia di calcolo bacini di Quercianella



Figura 125 Condizioni al contorno bacini di Quercianella

Di seguito i dettagli degli idrogrammi per vari tempi di ritorno.

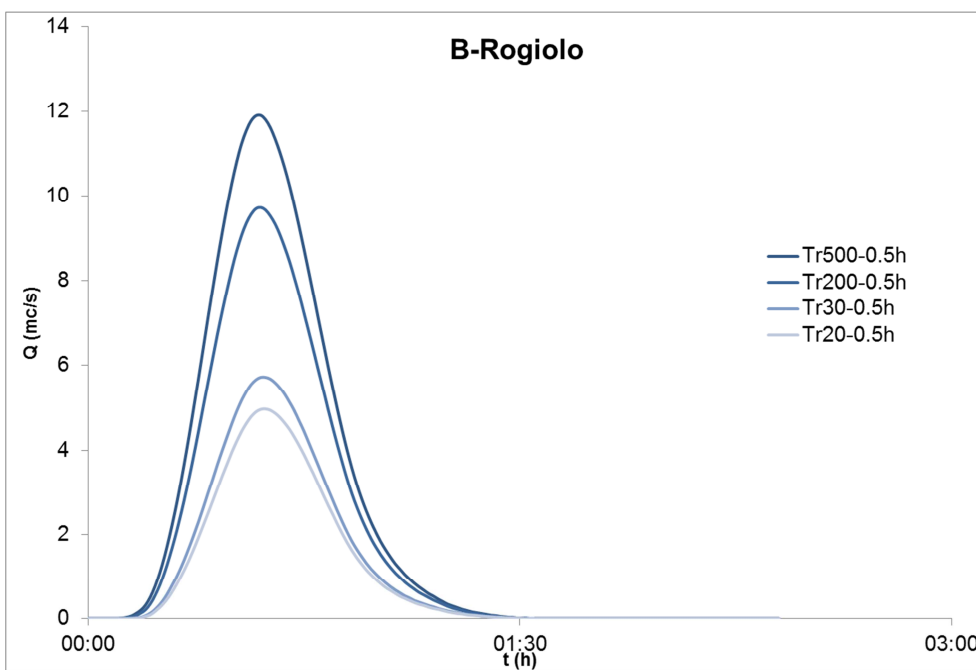


Figura 126 Idrogramma di piena Rogiolo

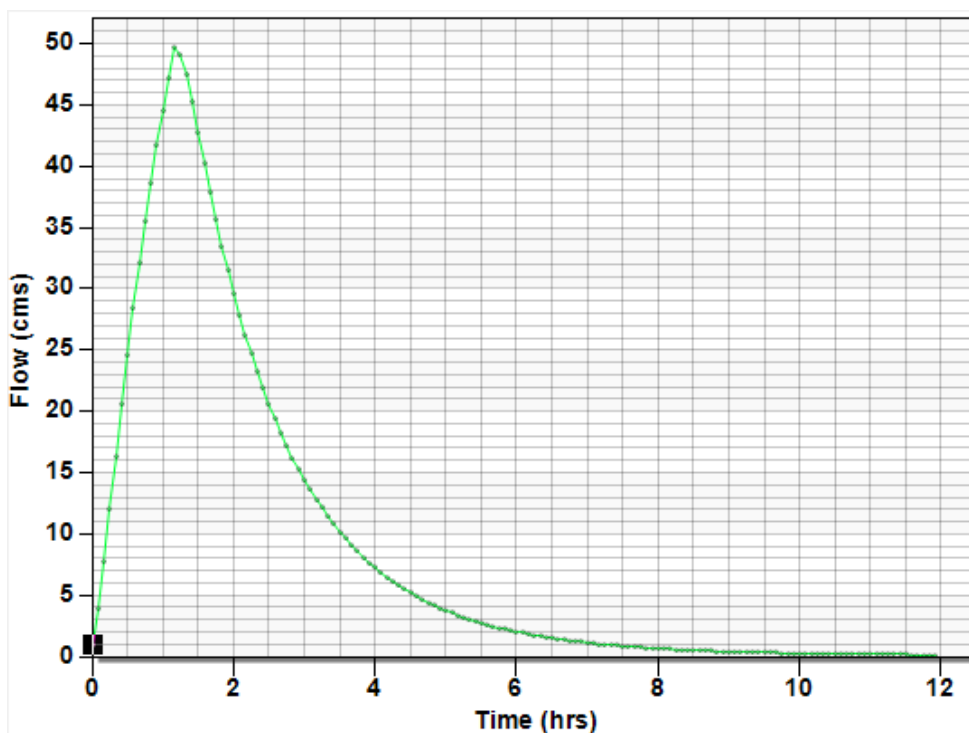


Figura 127 Idrogramma di piena Quercianella

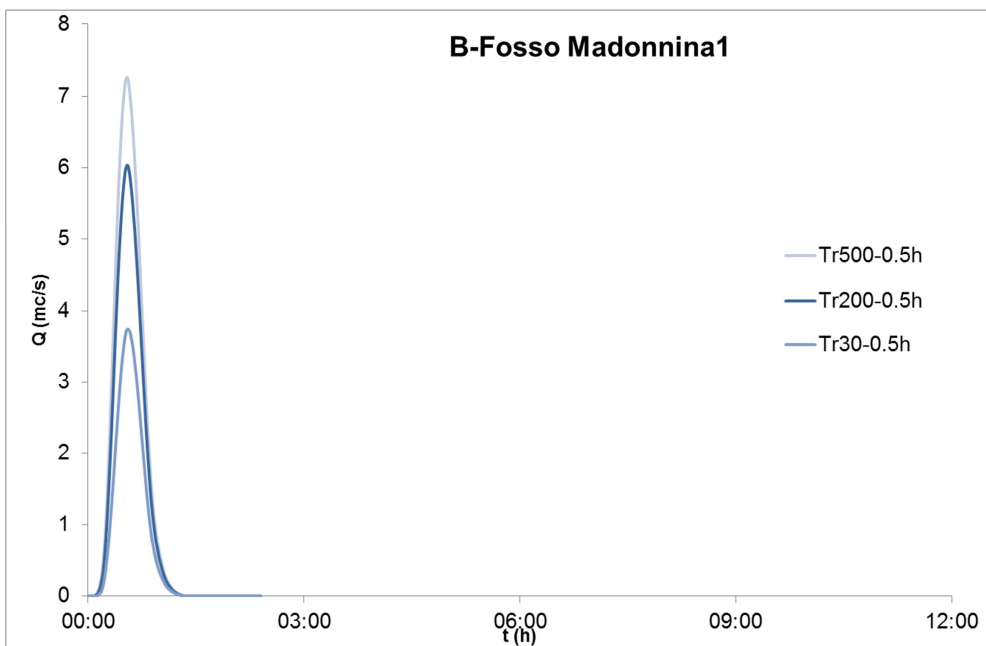


Figura 128 Idrogramma di piena Madonna 1

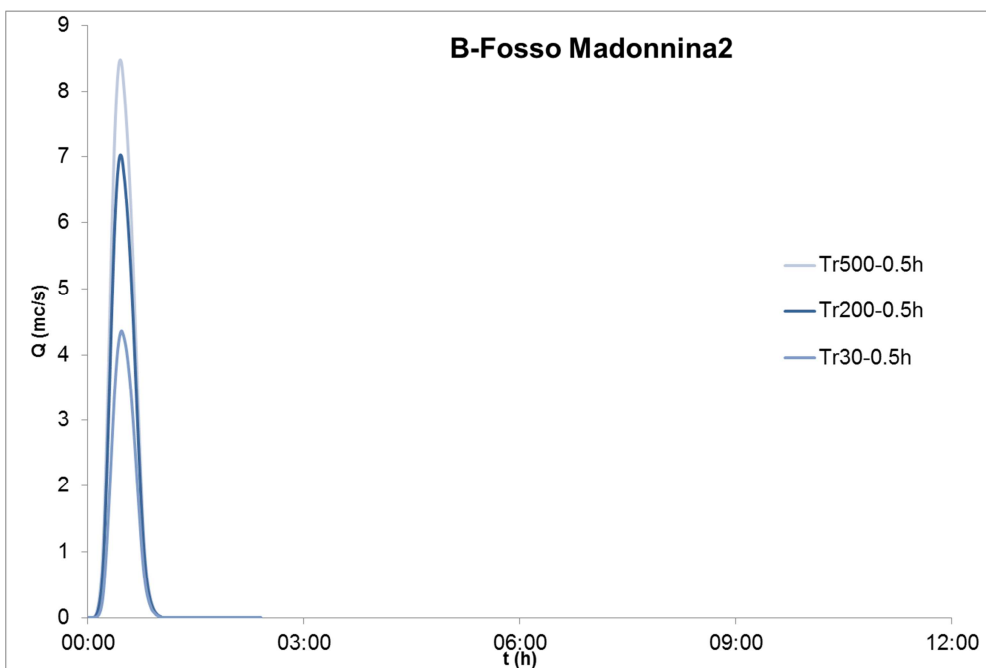


Figura 129 Idrogramma di piena Madonna 2

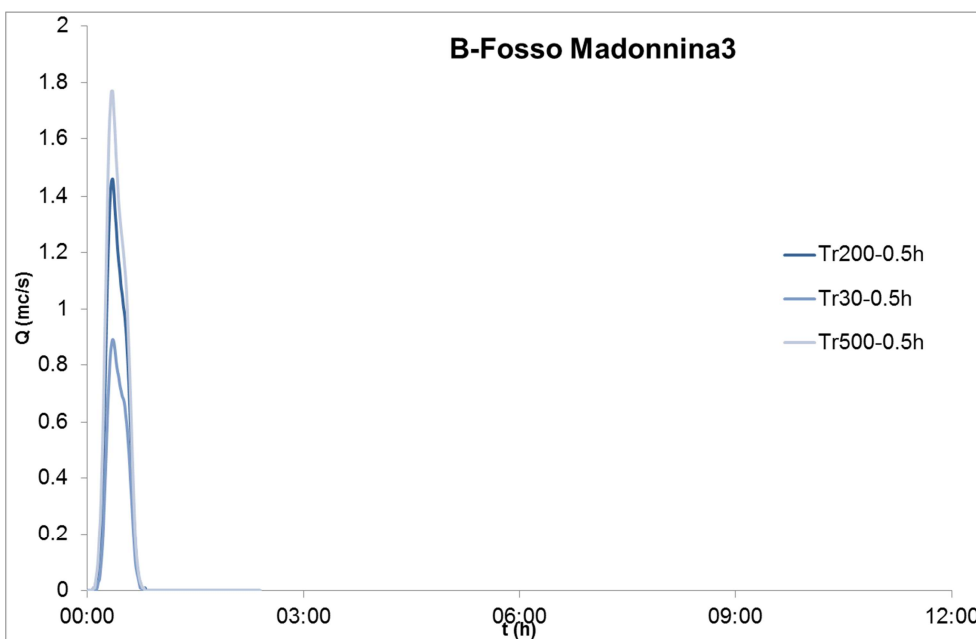


Figura 130 Idrogramma di piena Madonna 3

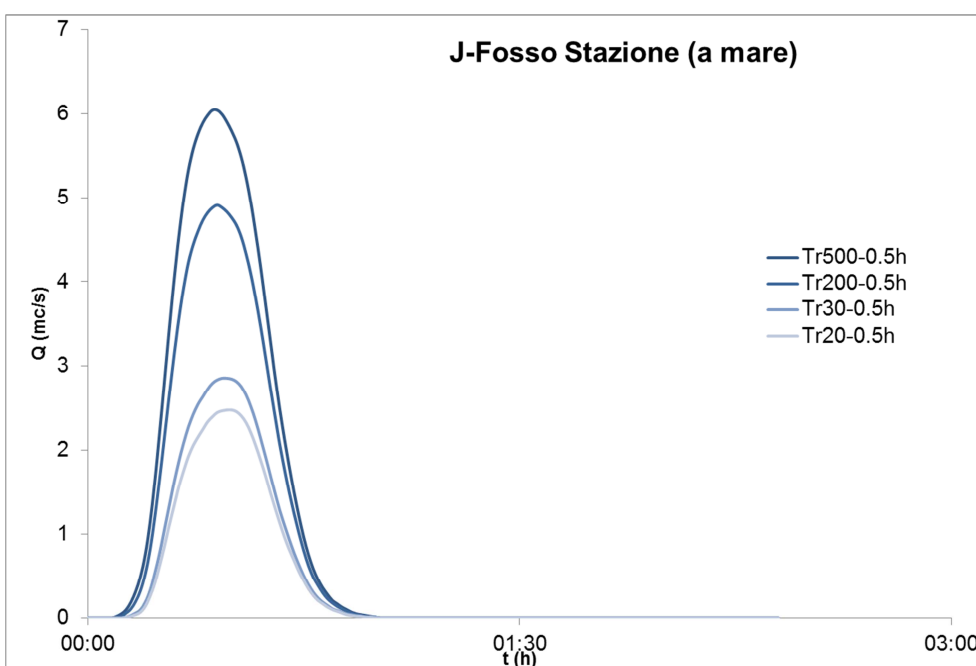


Figura 131 Idrogramma di piena Fosso Stazione

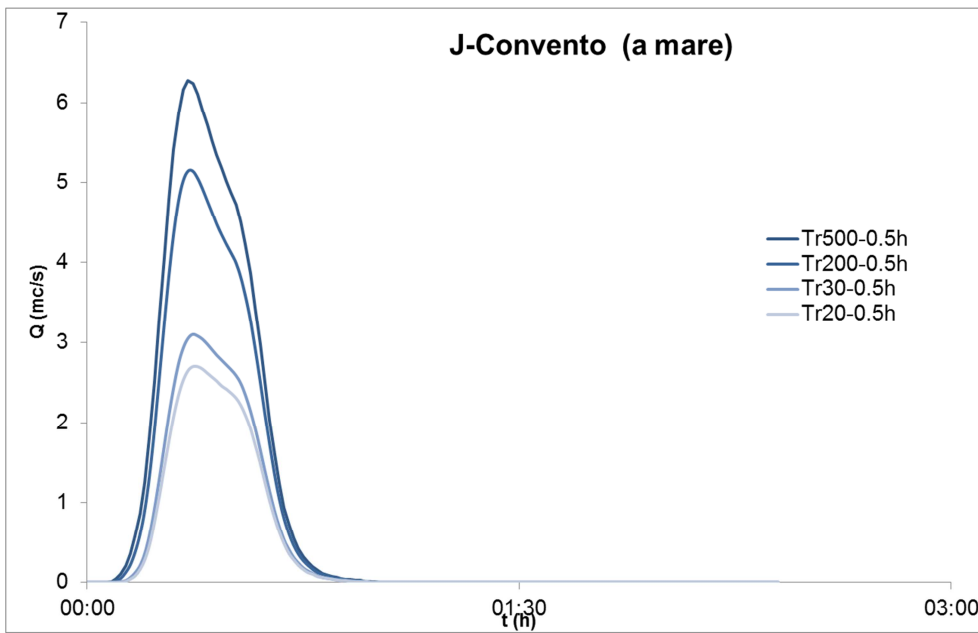


Figura 132 Idrogramma di piena fosso del Convento

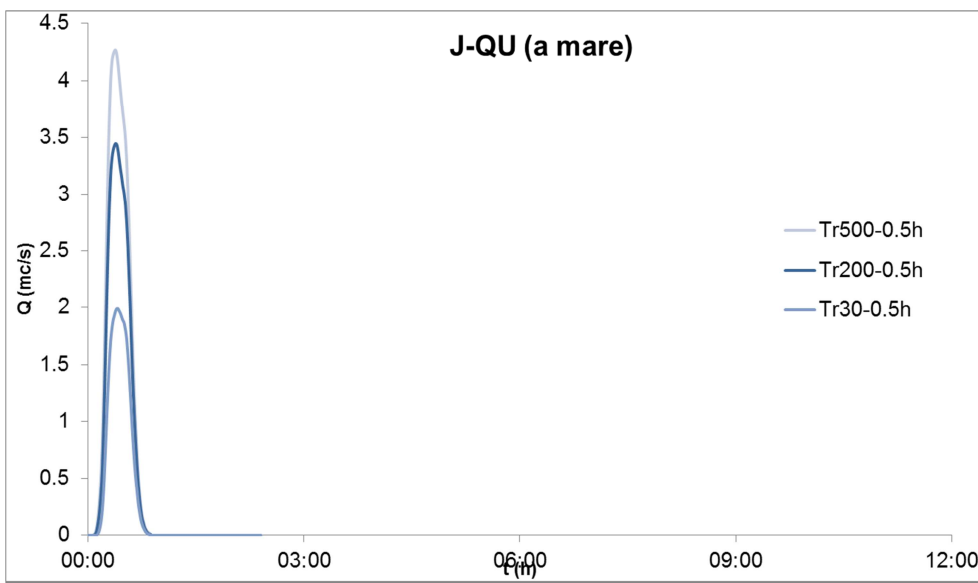


Figura 133 Idrogramma di piena fosso non identificato

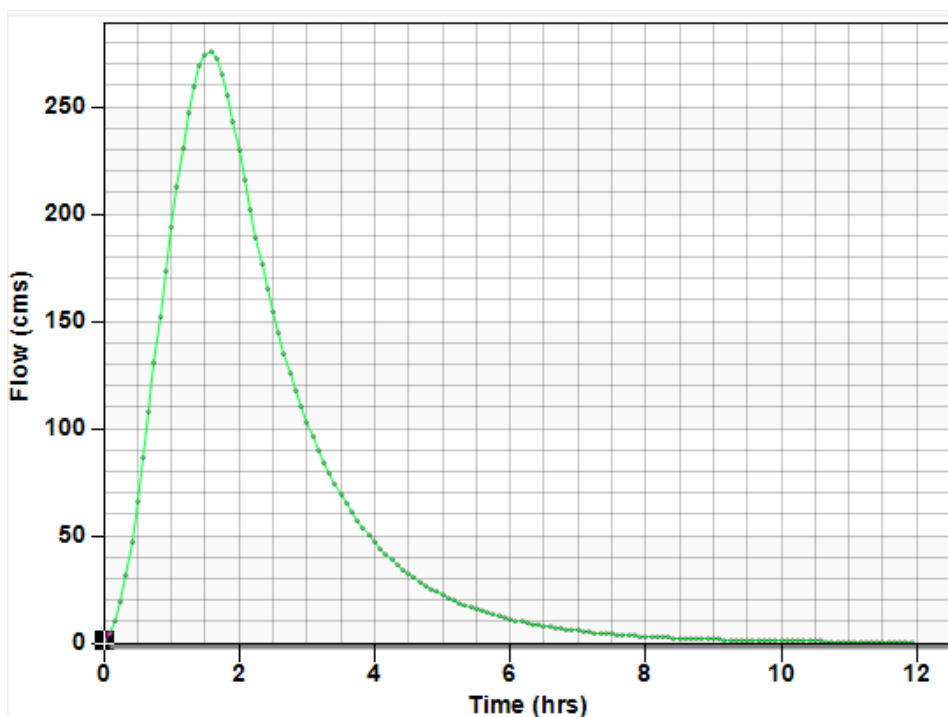


Figura 134 Idrogramma di piena T. Chioma- asta 906 Tr200

I risultati evidenziano problematiche diffuse. La maggior parte dei corsi d'acqua nell'ambito urbano non sono ben individuati e terminano in genere con scotolari che ne condizionano la capacità di deflusso. La mancanza di un reticolo ben individuato favorisce pertanto situazioni di scorrimento superficiale che in ogni caso presenta tiranti idrici modesti (di pochi centimetri). Più gravose sono le esondazioni relative al T. Chioma ed al Fosso di Quercianella.



Figura 135 Tiranti idrici Tr=200 anni



Figura 136 Tiranti idrici $T_r=30$ anni



Figura 137 Tiranti idrici Tr=500 anni

5.5 Altri corsi d'acqua

La parte industriale a nord risulta interessata da possibili fenomeni dei corsi d'acqua provenienti dalla piana di Collesavetti (AcqueChiare, Torretta, Scolmatore). Ai fini dell'aggiornamento delle carte di pericolosità si fa riferimento allo studio idraulico predisposto per il Comune di Collesavetti ed approvato per la modifica del Piano di Gestione Rischio Alluvioni con comunicazione dell'Autorità di Bacino dell'Arno prot. 3577 del 05/10/2015. I principi di detto studio sono stati applicati alle aste fluviali nei tratti di interesse del Comune di Livorno. Si rimanda al documento sopra individuato per gli approfondimenti.

5.5.1 Scolmatore

Le modellazioni sono state eseguite con le sezioni dello studio idraulico del progetto esecutivo di adeguamento del canale scolmatore. Le portate sono riassunte in Tabella 14. Si sono considerate quelle derivate dai dati forniti dall'Autorità di Bacino dell'Arno

Tabella 14 Portate per l'analisi del canale Scolmatore

Sezione	Immissione	Tr30 (24h)	Tr30 (36h)	Tr2000 (24h)	Tr200 (26h)
131	Arno/Usciana	1173.31	1137.63	1403.37	1405.96
88	Zannone/Crespina	1173.31	1138.19	1452.80	1454.40
83	Orcina	1175.85	1152.38	1551.62	1526.85

73	Isola	1173.31	1138.19	1464.05	1459.79
49	Tora	1182.74	1209.14	1733.30	1665.20
21	Fossa nuova	1210.62	1241.67	1793.09	1717.41
9	Emissario/Navicelli/Fossa Chiara	1435.98	1470.77	2089.30	1997.02

Sono stati analizzati 2 scenari:

- 1) quota allo sbocco di 0.7 m sul l.m.m; coefficiente di scabrezza d'alveo (Manning) 0.025
- 2) quota allo sbocco di 0.3 m sul l.m.m; coefficiente di scabrezza d'alveo (Manning) 0.025

5.5.1.1 ANALISI IN MOTO PERMANENTE

L'analisi è stata eseguita utilizzando il codice di calcolo HEC-RAS che è in grado di fornire i profili liquidi dei corsi d'acqua, oggetto della simulazione, basandosi su di un'analisi a moto permanente ed a moto vario monodimensionale. La procedura di calcolo si basa sulla soluzione dell'equazione dell'energia con le perdite di carico valutate mediante l'equazione di Manning

Gli scenari analizzati hanno evidenziato una non sostanziale influenza della condizione allo sbocco in quanto a causa delle elevate portate in arrivo il punto di equilibrio delle spinte idrodinamiche è spostato ben più a largo della sezione terminale del tratto analizzato.

La simulazione idraulica è stata effettuata per tempi di ritorno pari a 30 e 200 anni (Figura 139) e per durate di 24 e 36h. In tutti gli scenari la portata liquida è ben al di sopra della sommità arginali con problematiche che pertanto risultano essere diffuse in tutta l'asta fluviale, in particolare nel territorio del Comune di Collesalveti .

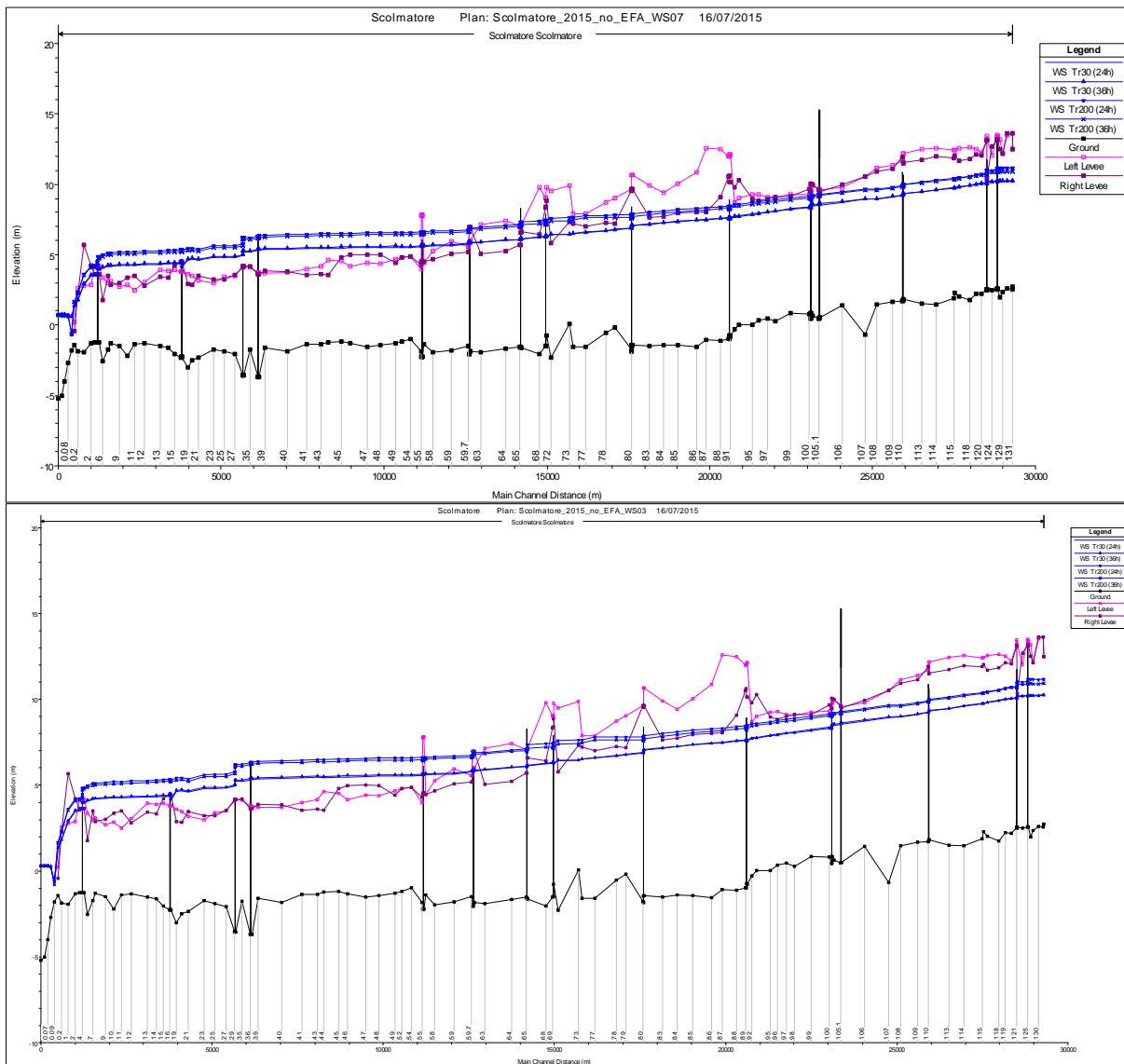


Figura 138 Confronto per Tr=200 e 30 anni anni con condizione al contorno WS=0.3m (sotto) e WS=0.7m (sopra)

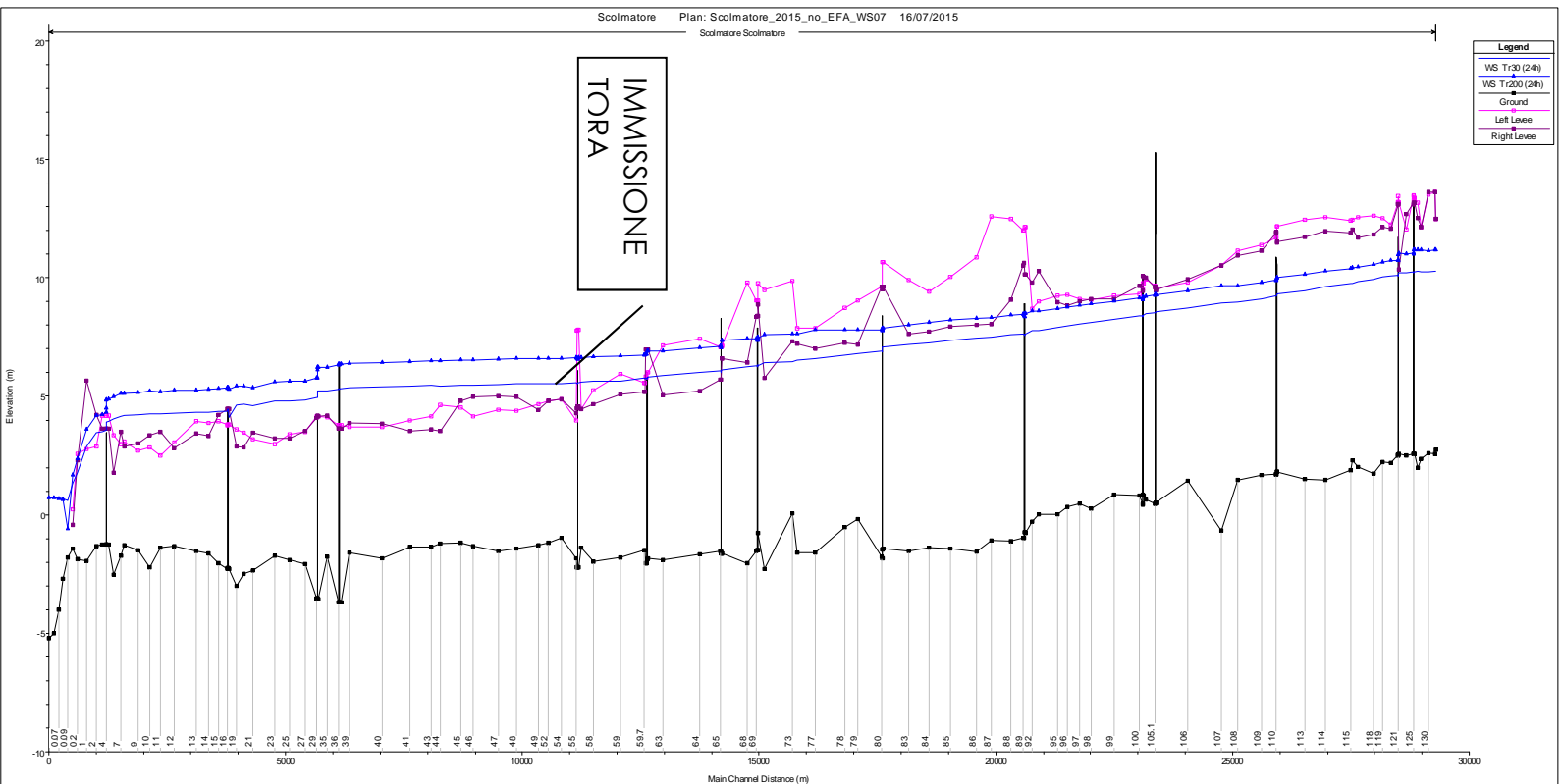


Figura 139 Confronto tra Tr=200 anni e Tr=30 anni (24h)

Solo nella parte a monte le condizioni d'alveo risultano essere meno critiche ed una riduzione dei livelli liquidi per effetto delle esondazioni fa ipotizzare il contenimento delle portate nelle sezioni disponibili. A valle invece l'effetto combinato dell'incremento di portata e della riduzione della pendenza di fondo (dovuta al progressivo interrimento del corso d'acqua) contribuisce ad innalzare i livelli liquidi che crescono sensibilmente, in particolare a partire dall'immissione del Tora.

5.5.2 Verifiche della capacità

Le simulazioni sono state condotte anche nell'ipotesi di verificare le capacità limite allo stato attuale. In particolare sono state considerate tre portate costanti sull'intero tratto:

- 500 mc/s pari alla portata ordinaria per le piene del solo bacino dello Scolmatore
- 1000 mc/s pari alla portata corrispondente al manifestarsi di criticità
- 1400 mc/s pari alla portata di progetto

Ipotizzando un coefficiente di scabrezza pari a 0.025 si mota come la portata di 1000 mc/s rappresenti effettivamente una condizioni limite, oltre la quale si hanno fenomeni di esondazione (Figura 140). E' una situazione inoltre critica per i vari affluenti, che vengono rigurgitati fino alle quote arginali, specialmente nel tratto terminale (Emissario Bientina, Fossa Chiara, Antifosso Acquechiare,...). Le principali criticità si hanno nel tratto antistante l'Interporto sia in destra che sinistra idraulica. Il caso $Tr=500$ anni rappresenta una condizione di deflusso in sicurezza. Solo in alcuni punti (sezioni 40-41) potrebbero verificarsi piccoli sormonti.

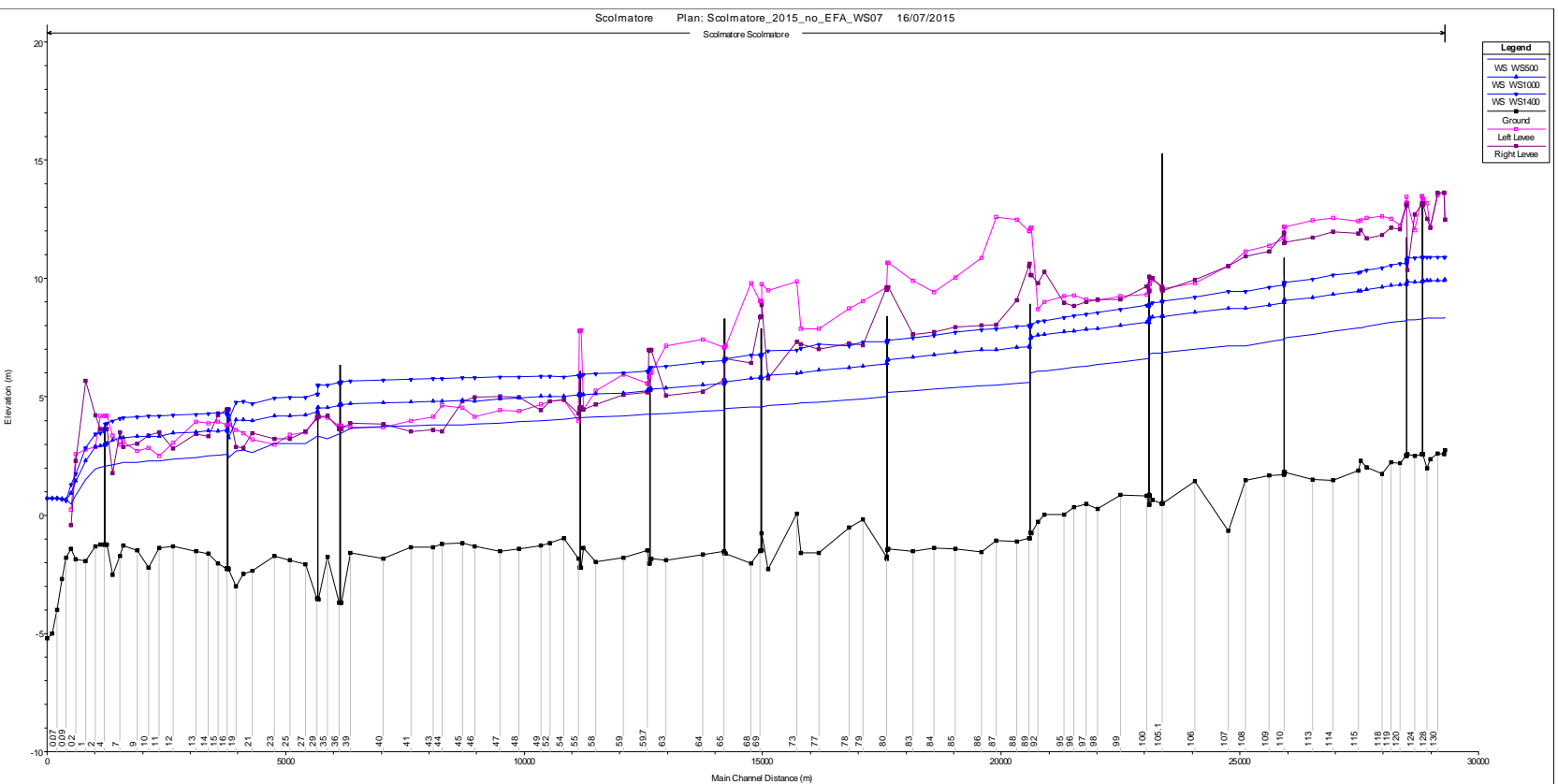


Figura 140 Livelli liquidi Portate di 500-1000-1400 mc/s- WS=0.7

5.6 ANALISI IN MOTO VARIO ED ESONDAZIONI

Il modello mono-bidimensionale è stato applicato su una griglia di dimensioni 17.5x8km celle 10x10m. La base topografica ad eccezione di poche zone non rientranti nel territorio comunale è costituita dal LIDAR fornito disponibile sul sito della Regione Toscana. La zona dell'Interporto, oggetto di recenti modifiche morfologiche è stata integrata con dati di rilievi specifici che individuano la quota terreno a circa +1.85 m sul l.m.m (Figura 141). Le simulazioni sono state fatte per eventi con $Tr=30$ e $Tr=200$ relative a durata di pioggia di 36h (quota allo sbocco di 0.3 m sul l.m.m; coefficiente di scabrezza d'alveo (Manning) 0.025). Questo perché non è stata riscontrata significativa differenza in termini di valore di picco rispetto alla durata di 24h, a fronte di un maggiore contributo in termini di volumi defluiti.

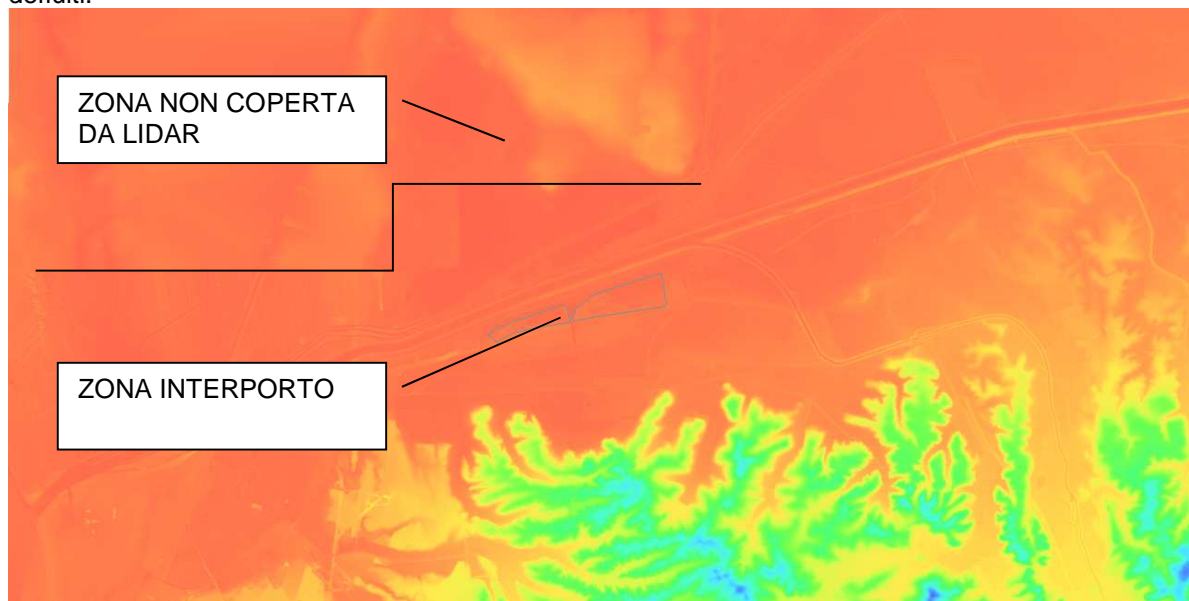


Figura 141 Griglia di calcolo

Il canale Scolmatore è stato trattato con schema monodimensionale. Quando il livello liquido supera le quote arginali si innesca il meccanismo di propagazione bidimensionale.

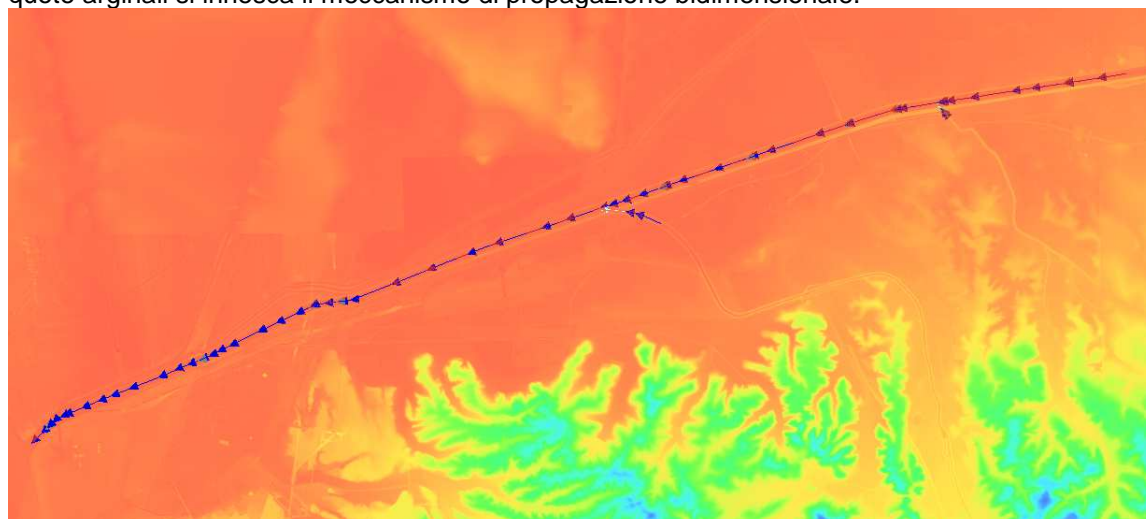


Figura 142 Tratto investigato

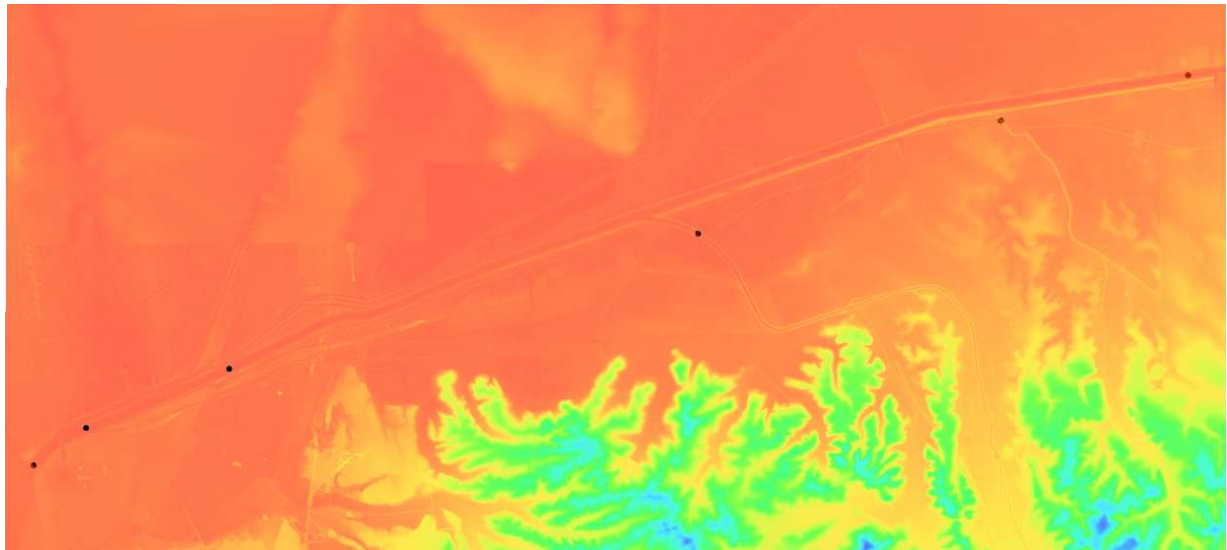


Figura 143 Punti di immissione delle portate

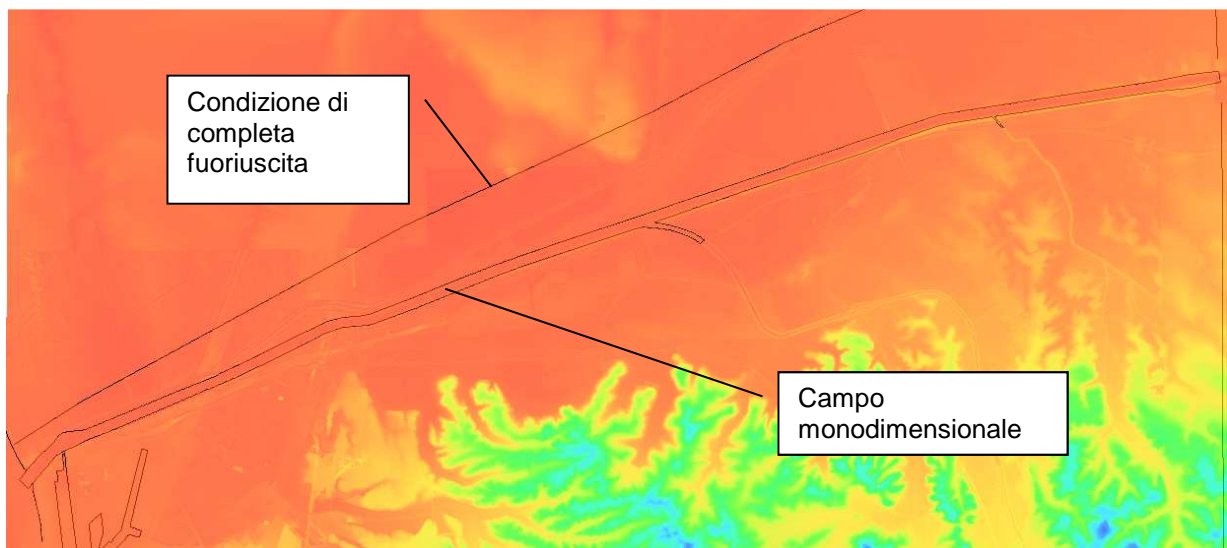


Figura 144 Condizioni al contorno

I risultati per $T_r=30$ anni hanno evidenziato che le prime fuoriuscite si verificano dopo circa 25h dall'inizio dell'evento in destra idraulica corrispondenza dell'abitato del Biscottino nel Comune di Collesalveti.. Le sezioni critiche risultano essere comprese tra la 40 e la 44.

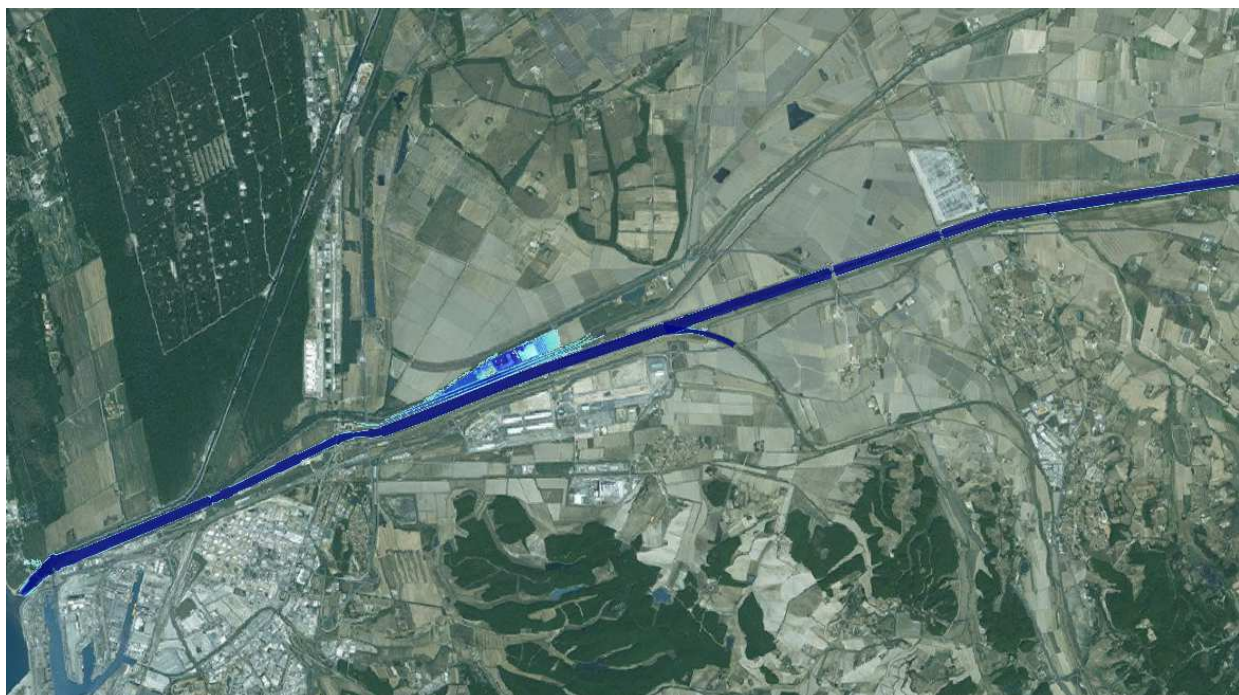


Figura 145 Allagamenti $T_r=30$ anni a $t=25$ h

Dopo circa 28 h si hanno anche esondazioni di rigurgito del T. Tora (destra idraulica) ed in corrispondenza della sezioni 54 (destra idraulica a monte della confluenza con il T. Tora).



Figura 146 Allagamenti $T_r=30$ anni a $t=28$ h

Al passaggio del picco di piena (dopo circa 36 h) si assiste anche ad una ulteriore fuoriuscita in corrispondenza della loc. Il Faldo (sempre nel comune di Collesalveti)

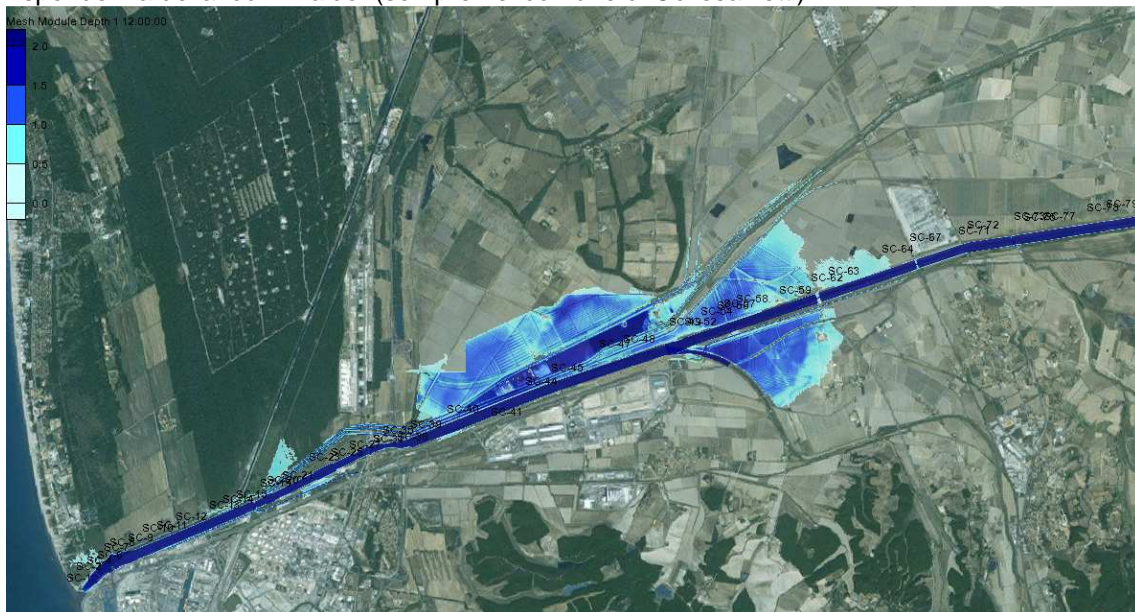


Figura 147 Allagamenti Tr=30 anni a t=36 h

Dopo circa 48 h, si assiste ad un progressivo interessamento delle aree allagate senza comunque ulteriori contributi da parte dello Scolmatore.

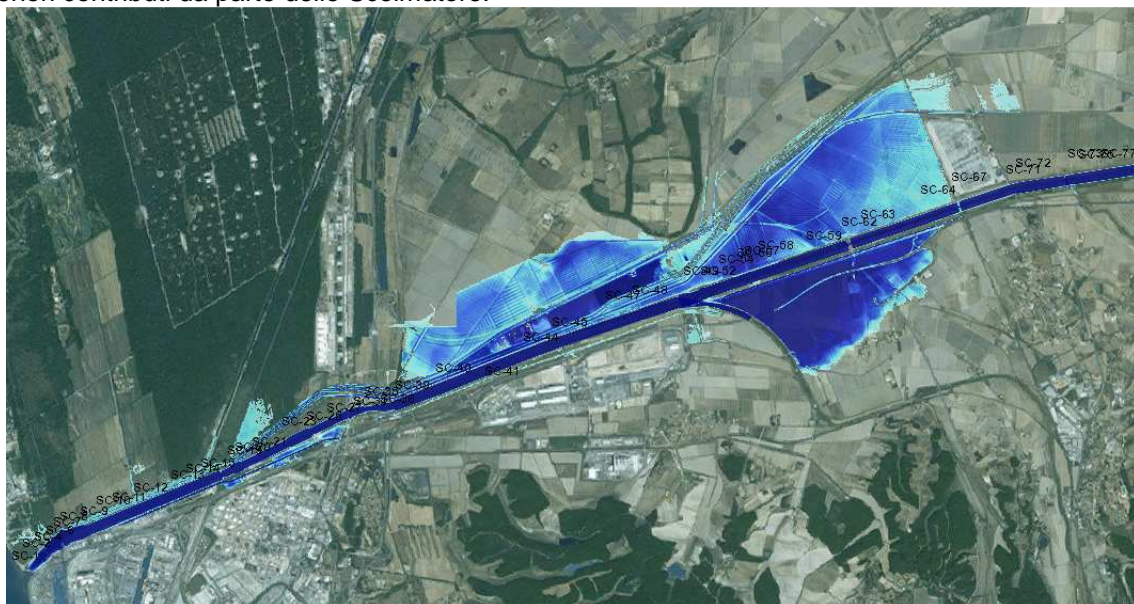


Figura 148 Allagamenti Tr=30 anni a t=48 h

A fine simulazione lo scenario è indicato in Figura 149.

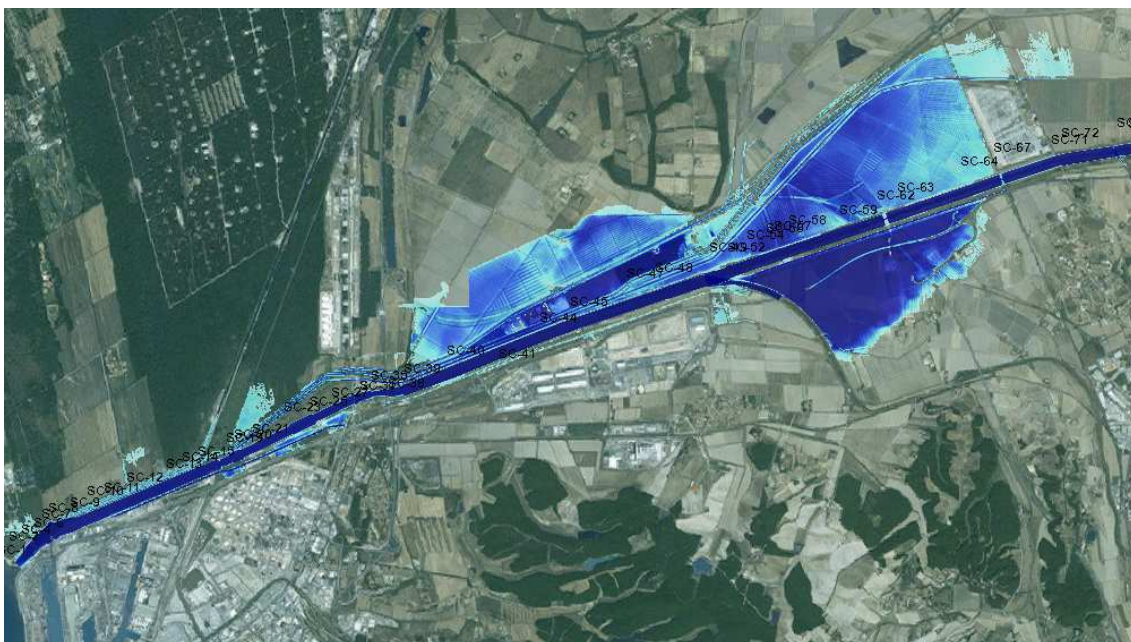


Figura 149 Allagamenti Tr=30 anni a t=60 h

Per quanto riguarda il caso Tr=200 anni, gli allagamenti si verificano dopo circa 17h comunque negli stessi punti visti in precedenza.

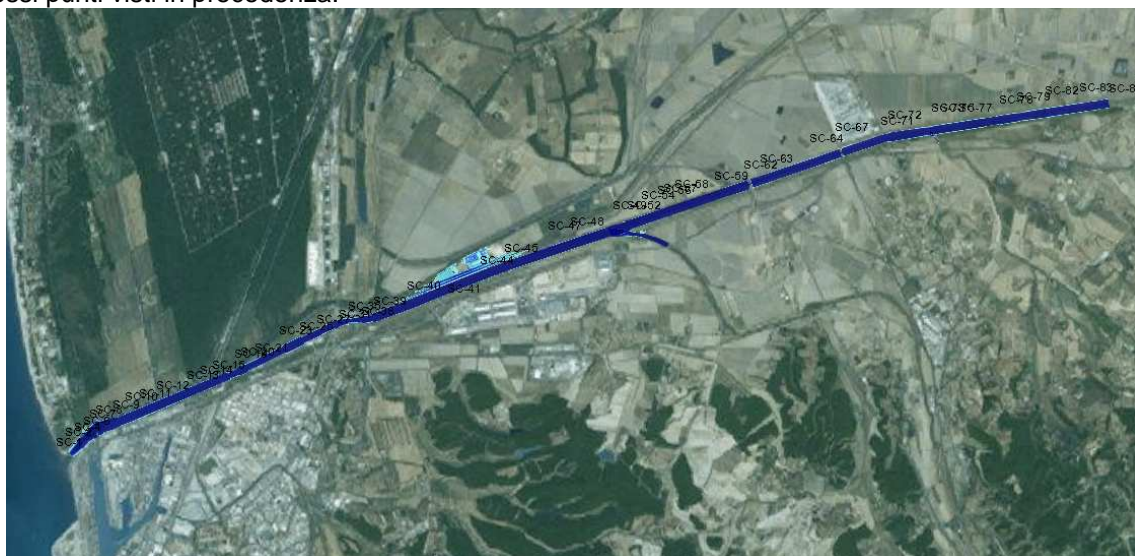


Figura 150 Allagamenti Tr=200 anni a t=17 h

Dopo circa 24h, oltre alle fuoriuscite indicate per il caso Tr=30 anni, si verificano ulteriori esondazioni anche in sinistra idraulica a valle della confluenza con il T. Tora.

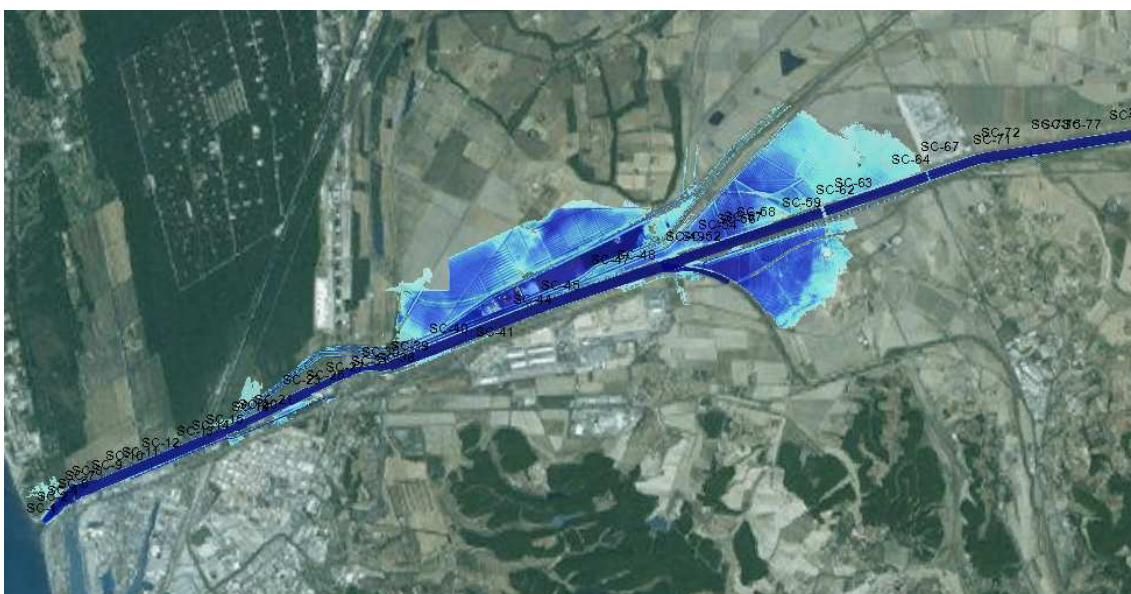


Figura 151 Allagamenti $Tr=200$ anni a $t=24$ h

La condizione di massima fuoriuscita si ha in corrispondenza del picco (36h) ma nelle ore successive continuano a verificarsi insufficienze che negli istanti successivi (48 e 60h) contribuiscono ad una notevole estensione delle aree allagate che nella parte a sud raggiunge anche gli argini del F.sso dell'Acquasalsa.

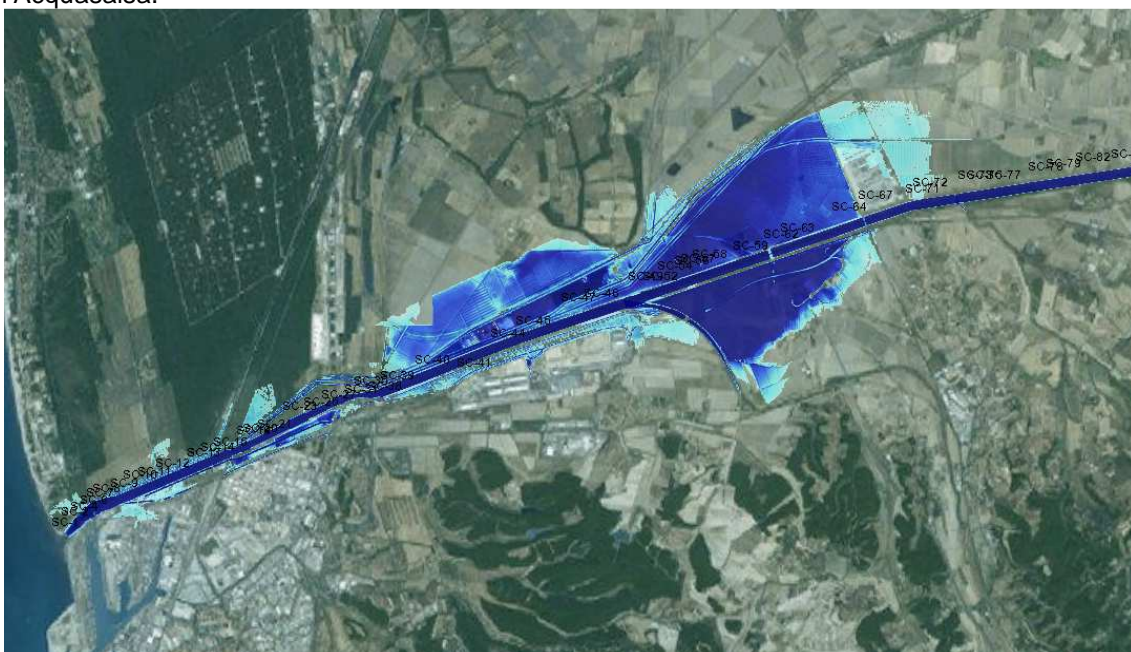


Figura 152 Allagamenti $Tr=200$ anni a $t=36$ h

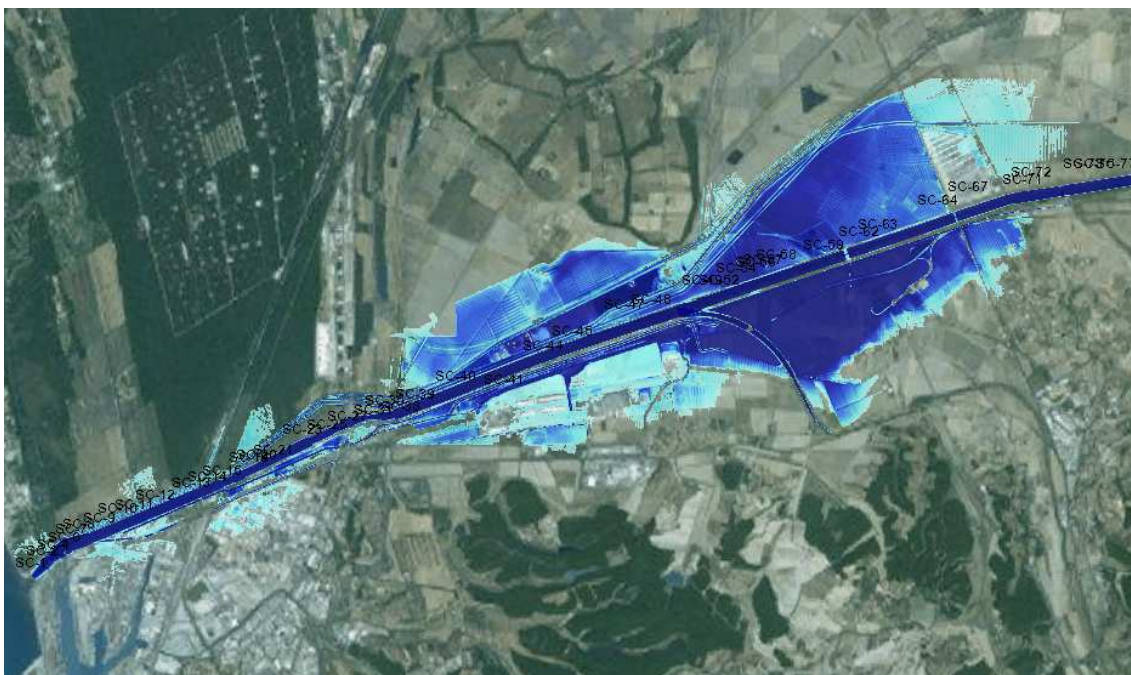


Figura 153 Allagamenti Tr=200 anni a t=48 h

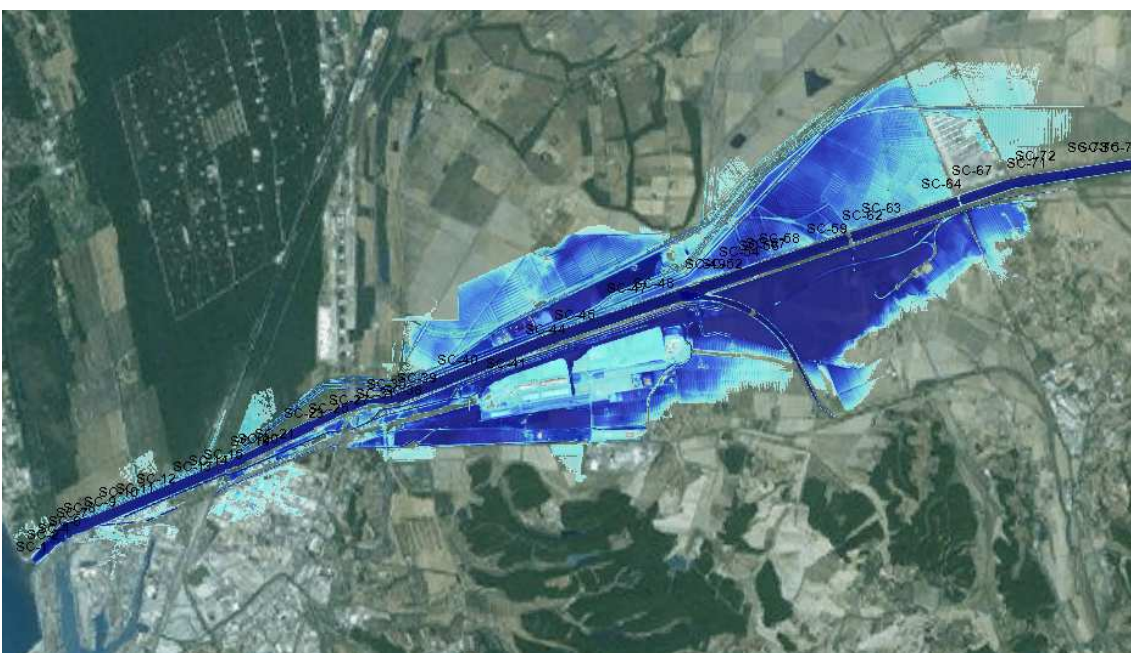


Figura 154 Allagamenti Tr=200 anni a t=48 h

Si evidenziano alcune criticità nella zona dell'interporto e dell'abitato di Stagno mentre sono solamente lambiti i centri di Vicarello e Guasticce. Nel comune di Livorno sussistono limitate fuoriuscite nella zona di Via Quaglierini (Figura 155).

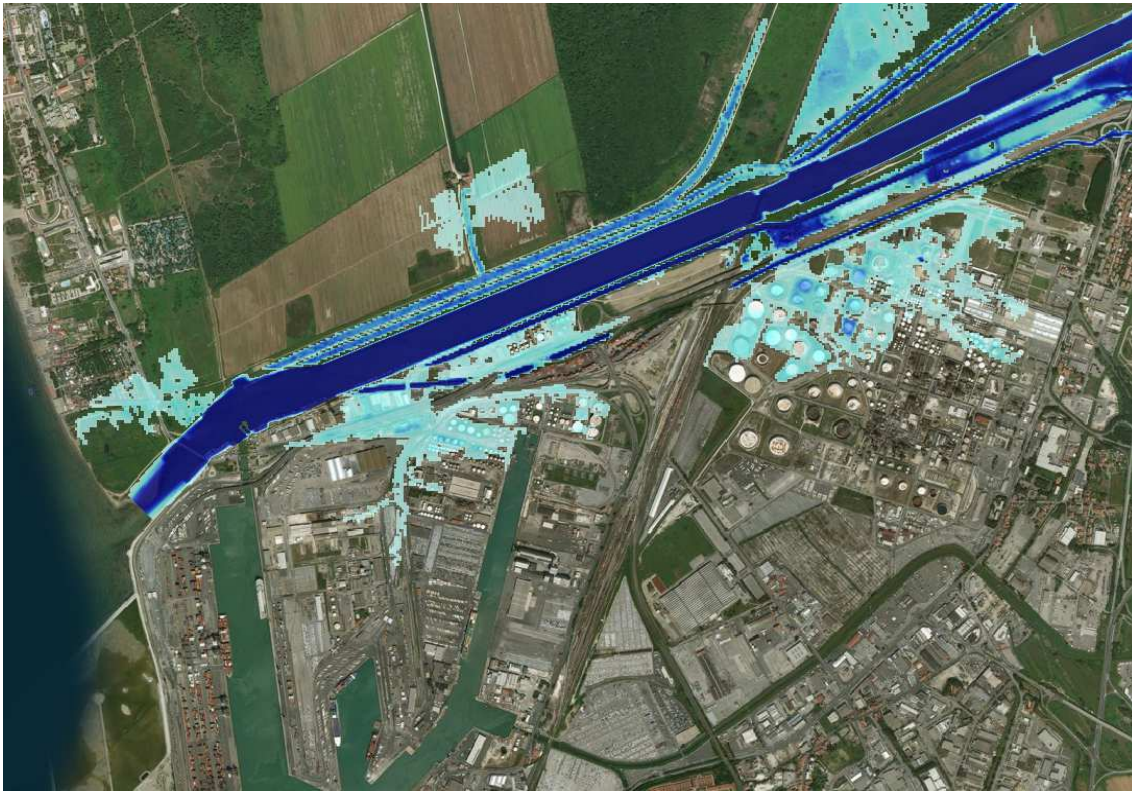


Figura 155 Dettaglio esondazioni dovuto allo Scolmatore nel comune di Livorno (Tr200 anni)

5.6.1 Fosso delle Acque chiare e Torretta

I due fossi sono affluenti dello Scolmatore e drenano gran parte delle aree del Comune di Collesalveti. Le insufficienze principali si verificano nei tratti di monte di Stagno con una riduzione delle portate compatibili con le capacità dei tratti terminali. Non sussistono pertanto problematiche nel comune di Livorno dovuto a questi corsi d'acqua (Figura 156).



Figura 156 Dettaglio esondazioni dovuto al fosso delle acque chiare e Fosso Torretta nel comune di Livorno (Tr200 anni)

5.1 Drenaggio urbano

Il piano di protezione civile ha evidenziato alcune situazioni critiche dovute ad insufficiente drenaggio urbano.

In particolare sono segnalate la zona artigianale del Picchianti, nel tratto lungo Via Firenze i cui canali sono regolati da una idrovora, che risultando insufficiente per le portate in arrivo determina rigurgiti della rete a monte penalizzata dal sottoattraversamento del T. Ugione.

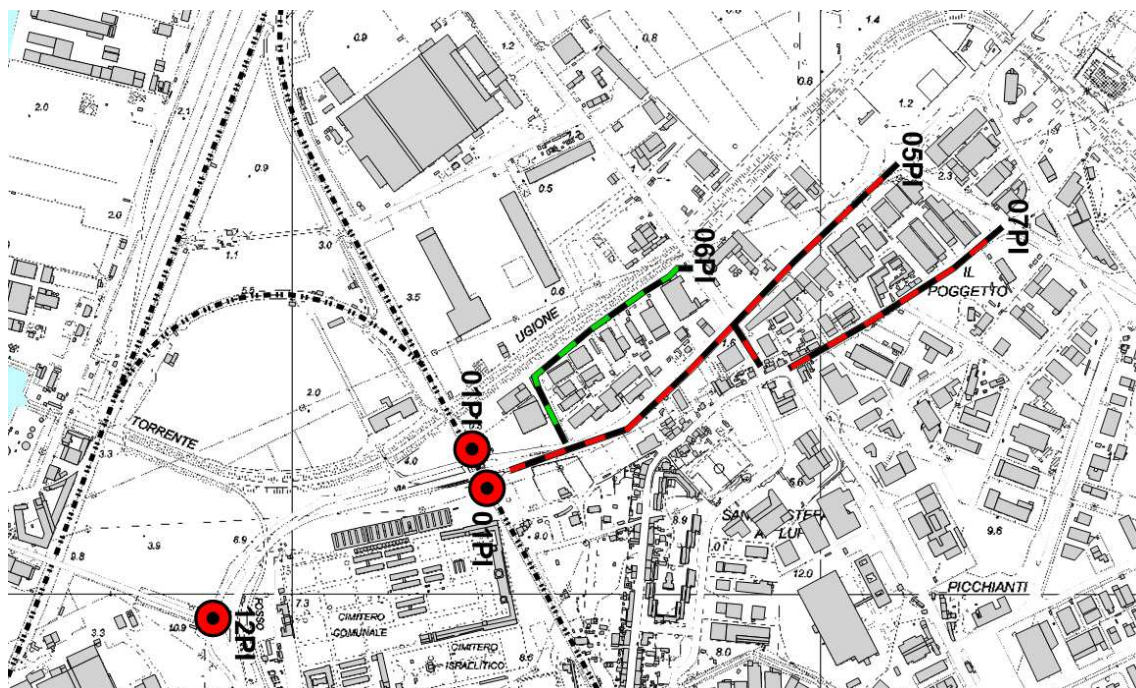


Figura 157 Criticità nella zona del Picchianti per drenaggio urbano- carta Hot Point Piano Protezione civile

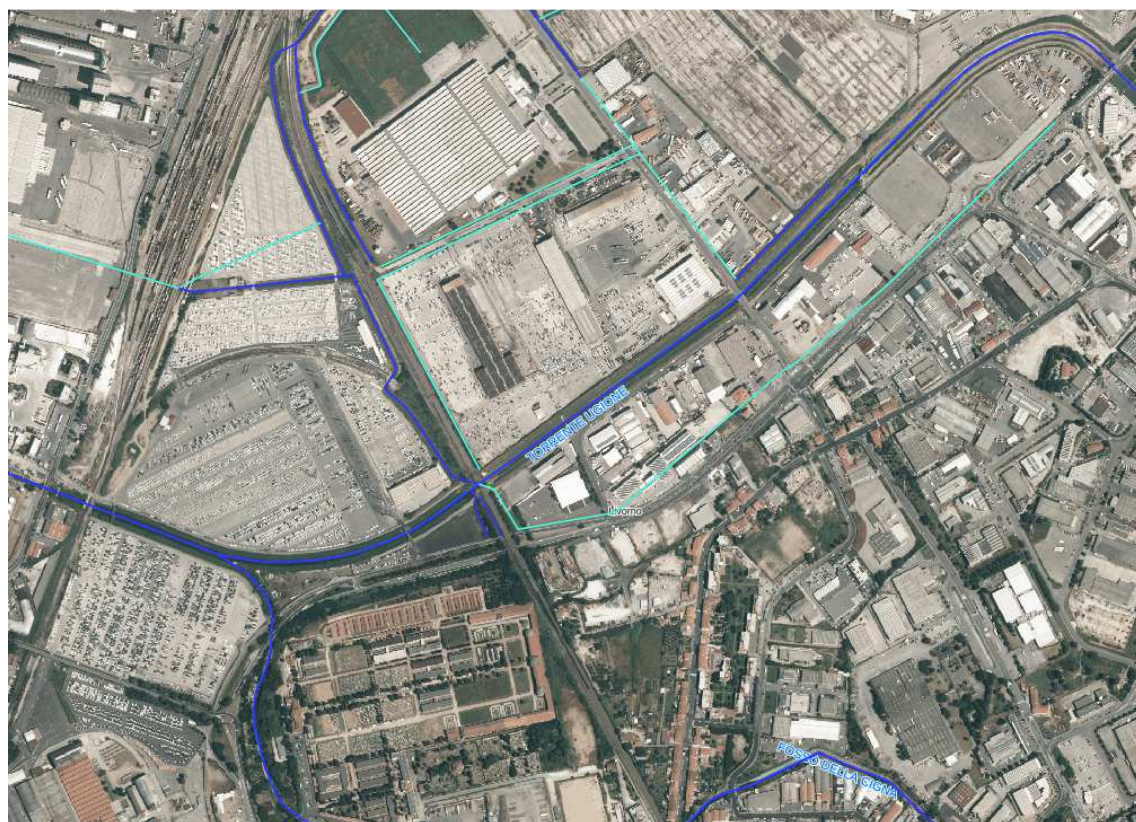


Figura 158 Reticolo sotteso all'idrovora del Picchianti



Figura 159 Allagamenti al sottopasso di Via Firenze

Altri punti critici sono in zona stazione, Salviano, Coteto e zona cimitero dei Lupi.

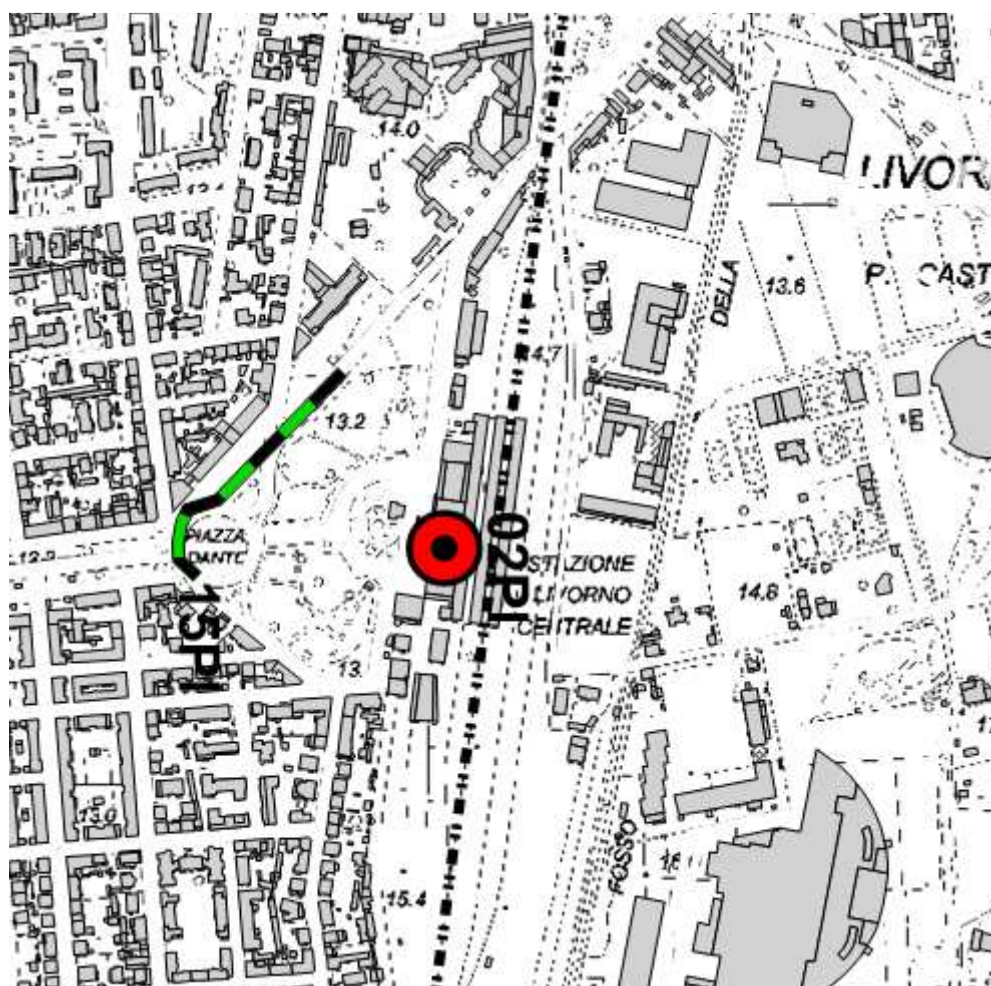


Figura 160 Criticità zona stazione

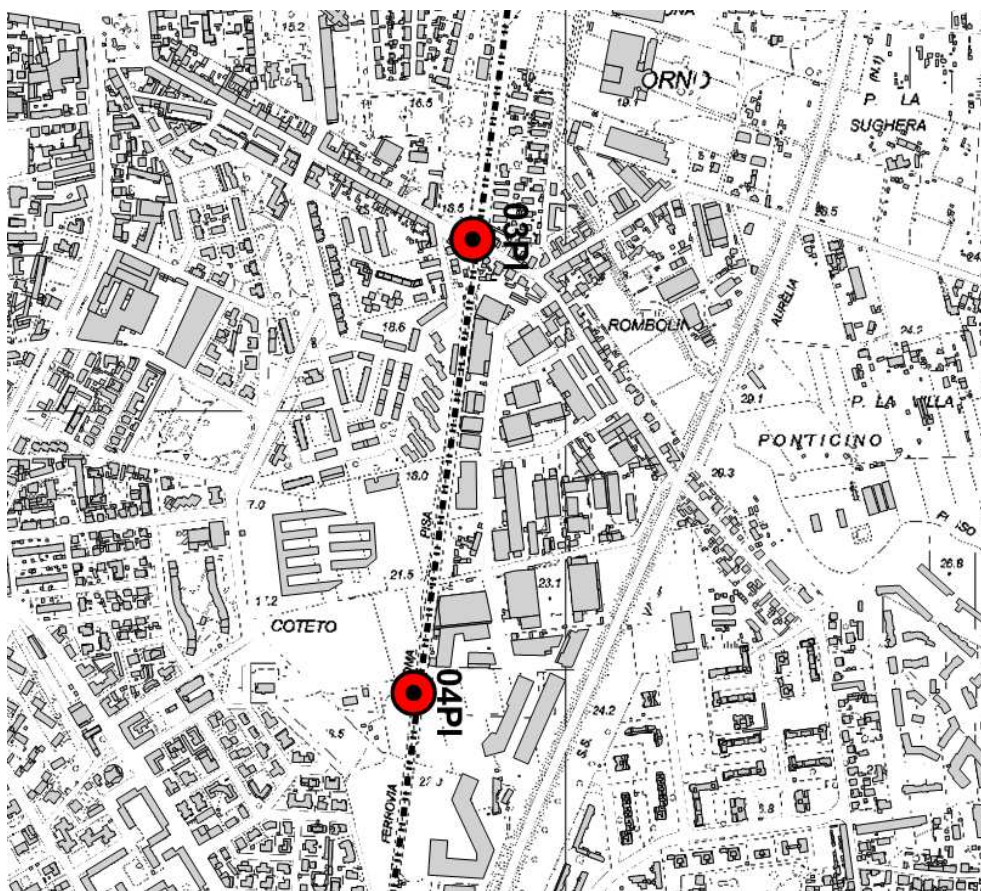


Figura 161 Criticità zona stazione

In tutti i casi si tratta di problemi di insufficienza della rete di fognatura che si aggravano in corrispondenza di zone depresse (sottopassi). Essendo fenomeni di rigurgito gli allagamenti sono per lo più invasivi e per ristagno e tranne le problematiche di via Firenze che sono più diffuse, le altre criticità rimangono circoscritte (anche se estremamente pericolose specialmente in corrispondenza dei sottopassi). In via Firenze il bacino sotteso ha una estensione di circa 1 kmq (Picchianti 2) con portate che arrivano fino a circa 10 mc/s per $Tr=200$ anni. I quantitativi di acqua che si invasano per mancato deflusso considerando durate critiche di circa 2h sono pertanto stimabili in circa 36-40000 mc valore che in parte è invasato nella rete (circa il 10-15%) ed in parte sul territorio. Considerando un valore di tirante medio di circa 0.3m le superfici allagabili arrivano pertanto ad occupare 100-120000 mq di territorio. Le aree allagate diventano hanno un andamento analogo a quello ottenuto nello scenario di esondazioni del T. Ugione.

6. PERICOLOSITA' IDRAULICHE

Gli approfondimenti effettuati hanno consentito di aggiornare un quadro conoscitivo che già evidenziava problematiche diffuse.

Generalmente gli studi esistenti si basavano su dati pluviometrici aggiornati agli anni '90 (massimo 1997). Si tratta quindi di studi e risultati sicuramente datati e non aggiornati, in relazione soprattutto alla odierna e forte sensibilità ed esigenza di perimetrazione della pericolosità idraulica.

L'aggiornamento del quadro pluviometrico e l'impiego di dati topografici di base di maggior dettaglio (Lidar invece che CTR) hanno consentito di definire un nuovo quadro delle esondazioni, in particolare per tutti quei corsi d'acqua che hanno forte interazione con l'ambiente urbano.

Dalle varie carte delle esondazioni sono state ricavate le pericolosità idrauliche che tengono conto delle richieste della normativa urbanistica (DPGR 53/R) che di quella della direttiva alluvioni. In particolare per il DPGR 53/R:

- P.I.4: Pericolosità idraulica molto elevata comprendente aree inondabili da eventi con tempo di ritorno $Tr \leq 30$ anni;
- P.I.3.: Pericolosità idraulica elevata comprendente aree inondabili da eventi con tempo di ritorno $Tr \leq 200$ anni
- P.I.2.: Pericolosità idraulica media comprendente aree inondabili da eventi con tempo di ritorno $Tr \leq 500$ anni

Per la classificazione in funzione del piano di gestione del rischio alluvioni si è fatto riferimento alla seguente classificazione:

- PI3.: a eventi con tempo di ritorno $Tr \leq 30$ anni;
- PI2: a eventi con tempo di ritorno $Tr \leq 200$ anni;
- PI1: a eventi con tempo di ritorno $Tr \leq 500$ anni;

Le P.I.2/PI1 sono state determinate solo per i corsi d'acqua analizzati. L'applicazione del criterio morfologico indicato infatti non aggiunge ulteriori aree rispetto a quelle individuate dalle pericolosità superiori. Per le aree urbane si è poi mantenuta la pericolosità PI1 di PGRA vigente.

A seguito dell'evento alluvionale sono state definite le aree allagate che in attesa dell'approvazione del presente studio vengono impiegate come misure di salvaguardia. In particolare si associa alle aree allagate vere e proprie (ovvero soggette ad esondazioni per insufficienza del reticolo principale) una pericolosità PI3 di PGRA/PI4 di DPGR53/R, mentre alle aree di ristagno (connesse a depressioni del territorio od insufficiente drenaggio un pericolosità PI1 di PGRA/PI2 di DPGR53R.

Le carte di pericolosità derivate dalla modellazione idraulica sono state sottoposte ad un controllo teso a semplificare l'andamento in base alla morfologia del terreno correggendo quelle situazioni "locali" di piccola estensione. Non sono state considerate le problematiche legate al drenaggio delle singole zone di territorio.

La cartografia risultante è stata ottenuta applicando il più alto valore di pericolosità derivato dai diversi scenari investigati che incidono sulla stessa porzione di territorio.

Sono state poi definite le carte di battente e di velocità secondo le indicazioni della LR41/2018 per $Tr=200$ anni.

7. CONCLUSIONI

Il presente studio ha preventivamente fornito un quadro di sintesi sui principali studi di indagine idraulica esistenti sul territorio, così da evidenziare le conoscenze pregresse dei corsi d'acqua del territorio comunale e la situazione di evidenti criticità dal punto di vista della messa in sicurezza idraulica del territorio stesso.

Allo stato attuale i corsi d'acqua che disponevano di mappe di esondazione ricavate da studi specifici sono solo quattro: Fosso della Cigna, Rio Maggiore, Rio Ardenza, Botro della Pugnoliccia. Per gli altri corsi d'acqua era presente la sola perimetrazione di pericolosità idraulica dell'Autorità di Bacino Toscana Costa.

Generalmente gli studi idrologici si basano su dati pluviometrici aggiornati agli anni '90 (massimo 1997). Si tratta quindi di studi e risultati sicuramente datati e non aggiornati, in relazione soprattutto alla odierna e forte sensibilità ed esigenza di perimetrazione della pericolosità idraulica.

Alcuni studi (per esempio Rio Ardenza e Botro della Prugnoliccia) non sono stati validati dagli uffici competenti che hanno richiesto integrazioni mai pervenute.

Altri ancora, pur oggetto di validazione, hanno consentito la definizione di opere che sono in fase di realizzazione ma non ancora completate.

Il quadro emerso risulta scarsamente compatibile con le esigenze della normativa di riferimento (in particolare DPGR 53/R del 2011).

Si è pertanto proceduto all'esecuzione di un complessivo studio idrologico idraulico completo di una serie di approfondimenti specifici per valutare il quadro delle esondazioni.

In particolare si è proceduto con:

- esecuzione di uno studio idrologico di tutti i bacini di interesse con le nuove carte pluviometriche predisposte dalla Regione toscana nel 2014 ed aggiornate a seguito dell'evento alluvionale del 2017;
- dove disponibili le informazioni, le portate dei vari corsi d'acqua sono state ricavate dallo studio idrologico del Prof. Castelli del gennaio 2018 che ha effettuato un'analisi delle varie aste fluviali del territorio a seguito dell'evento alluvionale del settembre 2017 per Tr30 e 200 anni oltre che ricostruendo l'evento stesso
- applicazione di modelli idraulici 1D/2D per i vari corsi d'acqua impiegando dati topografici rilevabili da progetti e lavori pregressi e rilievi specifici laddove non dai dati lidar implementati, dove riscontrati, dai dati degli studi esistenti. I modelli idraulici sono stati applicati per Tr=200, 30 e 500 anni;
- definizione delle mappe di pericolosità ai sensi della normativa vigente ed identificazione delle classi di battenti e velocità per Tr=200 anni

Livorno, gennaio 2019

Il tecnico consulente
Ing. Pietro Chiavaccini