



COMUNE DI ROSIGNANO M.MO  
PROVINCIA DI LIVORNO

Sindaco: *Alessandro Franchi*  
Assessore alla Programmazione del Territorio, Demanio Marittimo: *Margherita Pia*  
Dirigente del Settore Programmazione e Sviluppo del territorio: *Andrea Immorali*  
Responsabile del procedimento e dell'U.O. pianificazione: *Stefania Marcellini*  
Garante della comunicazione: *Daniela Ronconi*

Studi agronomici: **Dott. Agr. Paolo Gandi**  
*collaborazioni:*  
*dott. for. Alessandra Boretti*  
*per. agr. Fiammetta Gandi*  
*per. agr. Silvia Tammaro*

Studi ambientali: **Dott. Arch. Michela Chiti**  
*collaborazioni:*  
*dott. urb. Giacomo Rossi*  
*dott.ssa urb. Marina Visciano*

Studi geologici: **GEOTECNO Studio Associato**  
*dott. geol. Luciano Lazzeri*  
*dott. geol. Nicolò Sbolci*

Studi idraulici: **CHIARINI ASSOCIATI Ingegneria  
Civile e Ambientale**  
*dott. ing. Remo Chiarini*  
*dott. ing. Luigi Bigazzi*  
*dott. ing. Alessandro Berni*

RELAZIONE  
IDROLOGICO IDRAULICA



## Sommario

<b>1</b>	<b>Introduzione</b> .....	<b>4</b>
1.1	1.1 Criteri operativi e obiettivi dello studio.....	5
<b>2</b>	<b>Quadro normativo di riferimento</b> .....	<b>8</b>
2.1	2.1 Adempimenti rispetto alla D.P.G.R. del 25 Ottobre 2011, n. 53/R. “Regolamento di attuazione dell’art.62 della L.R. 3 Gennaio 2005, n.1 (Norme per il governo del territorio) in materia di indagini geologiche.....	8
2.2	2.2 Adempimenti rispetto la L.R. 41 del 24.07.2018. Disposizioni in materia di rischio di alluvioni e di tutela dei corsi d’acqua in attuazione del decreto legislativo 23 febbraio 2010, n. 49 (Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni). .....	8
<b>3</b>	<b>Interventi di mitigazione del rischio idraulico in corso di progettazione o in corso di realizzazione nel Comune di Rosignano Marittimo</b> .....	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Analisi idrologica</b> .....	<b>11</b>
4.1	4.1 Considerazioni generali circa la stima degli idrogrammi di piena .....	11
4.2	4.2 Definizione degli afflussi meteorici .....	12
4.3	4.3 Determinazione dello ietogramma di progetto .....	15
4.4	4.4 Stima delle perdite idrologiche mediante il metodo del Curve Number.....	17
4.4.1	4.4.1 Caratterizzazione del parametro di assorbimento CN per i bacini idrografici in esame .....	18
4.5	4.5 La trasformazione afflussi – deflussi .....	20
4.5.1	4.5.1 Il metodo dell'idrogramma unitario istantaneo (IUH).....	20
4.5.2	4.5.2 Il Metodo Cinematico (Kinematic Wave) .....	22
4.5.3	4.5.3 La propagazione delle onde di piena .....	22
4.6	4.6 Stima della portata di progetto, analisi preliminari e scelta del modello idrologico.....	24
4.6.1	4.6.1 Relazioni matematiche .....	24
4.6.2	4.6.2 Modelli matematici.....	27
<b>5</b>	<b>Risultati dell’analisi idrologica</b> .....	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>Analisi idraulica</b> .....	<b>35</b>
6.1	6.1 Il modello numerico di simulazione idraulica .....	35
6.2	6.2 Principi teorici della modellazione numerica.....	37
6.2.1	6.2.1 Assegnazione dei parametri di scabrezza .....	37
6.2.2	6.2.2 Condizioni al contorno .....	38
6.2.3	6.2.3 Taratura dei principali parametri inerenti l’implementazione del modello numerico in regime di moto vario .....	41
6.3	6.3 Modellazione idraulica bidimensionale con FLO-2D ver. Pro .....	42
<b>7</b>	<b>Risultati della modellazione idraulica 1D</b> .....	<b>49</b>
7.1	7.1 Botro Quercetano .....	49
7.1.1	7.1.1 Allestimento del modello geometrico dell'alveo.....	49
7.1.2	7.1.2 Risultati della simulazione .....	49
7.2	7.2 Botro delle Acacie.....	50
7.2.1	7.2.1 Risultati della simulazione .....	50
7.3	7.3 Botro Grande, botro Ginepraia e botro Condotti.....	53
7.3.1	7.3.1 Risultati della simulazione .....	53
7.4	7.4 Botro Iurco e botro Crocetta.....	55
7.4.1	7.4.1 Risultati della simulazione .....	55
7.5	7.5 Botro Cotone, botro Bargingo e botro Secco.....	56
7.5.1	7.5.1 Risultati della simulazione .....	57
7.6	7.6 Fosso dei Morti (o Pisano) .....	58



7.6.1	Risultati della simulazione .....	59
7.7	Fosso della Vallecorsa e fosso Mozzicone.....	61
7.7.1	Risultati della simulazione .....	61
7.8	Fosso dei Fichi e torrente Tripesce.....	63
7.8.1	Risultati della simulazione .....	63
<b>8</b>	<b>Risultati della modellazione idraulica 2D .....</b>	<b>65</b>
8.1	Modello FLO-2D “Rosignano Nord” (Rosignano Solvay).....	65
<b>9</b>	<b>Modello FLO-2D “Rosignano Sud” (Vada) .....</b>	<b>67</b>
<b>10</b>	<b>Stato di progetto (scenario TR200) e veriche di non aggravio di rischio in altre aree .....</b>	<b>68</b>
10.1	Rosignano Nord - PROGETTO.....	70
10.1.1	Comparto 3-1u.....	70
10.1.2	Comparto 3-28u.....	74
10.1.3	Comparto 3-38u.....	77
10.1.4	Comparto 3-19u e 3-30u .....	79
10.2	Rosignano Sud - PROGETTO .....	82
10.2.1	Comparto 2-4u e 2-10u .....	82
<b>11</b>	<b>Considerazioni conclusive .....</b>	<b>87</b>

- **APPENDICE 1** - Outputs grafici e numerici delle simulazioni effettuate in regime di moto vario con il software Hec-Ras

- **ALLEGATO SU CD-ROM** - Outputs grafici e numerici delle simulazioni effettuate in regime di moto vario con il software Flo-2D ver. Pro



## 1 Introduzione

La presente relazione documenta ed illustra lo studio idrologico – idraulico redatto per conto del Comune di Rosignano Marittimo a supporto del Piano Operativo Comunale (POC).

In particolare, nell'ambito dell'indagine svolta, sono state condotte analisi e verifiche di sussistenza del rischio idraulico di allagamento in relazione alle previsioni del nuovo strumento urbanistico in prossimità dei seguenti corsi d'acqua:

- *Botro Quercetano*
- *Botro delle Acacie*
- *Botro Grande*
- *Botro Ginepraia*
- *Botro dei Condotti*
- *Botro lurco*
- *Botro Crocetta*
- *Botro Bargingo*
- *Botro Secco*
- *Fosso dei Morti (o Pisano)*
- *Fosso della Vallecorsa*
- *Fosso Mozzicone*
- *Fosso dei Fichi*

Il presente studio idrologico è stato aggiornato (rispetto a quello depositato in data 10/08/2017 al n.160) in conformità a quanto prescritto dal Genio Civile Valdarno Inferiore e Costa negli incontri tecnici intercorsi (del 10/10/2018, del 28/11/2018 e del 14/12/2018) e formalmente trasmesso al Comune di Rosignano Marittimo con note n. 443293 del 19/09/2017, n. 617863 del 22/12/2017, n. 410901 del 29/08/2018, n.480233 del 16/10/2018 e n.0066671/2018 del 19/12/2018.

Pertanto alla luce delle considerazioni emerse nei predetti incontri e nel rispetto di quanto prescritto dal Genio Civile Valdarno Inferiore e Costa nelle note sopraindicate, nel presente studio si sono fatte le assunzioni di seguito descritte.

Innanzitutto le modifiche alle mappe di PGRA proposte non interessano le aree allagabili riferibili al Fiume Fine, al Torrente Tripesce, al fiume Cecina e al reticolo minore (fossi e capofossi) esistente nell'ambito territoriale denominato "Città al Mare" (località Mazzanta). Pertanto, la proposta di modifica alle mappe di P.G.R.A. si riferisce ai corsi d'acqua ricadenti nel territorio di Castiglioncello e Rosignano Solvay<sup>1</sup> (che fino ad oggi

<sup>1</sup> Botro Quercetano, botro delle Acacie, botro Grande, botro Ginepraia, botro dei Condotti, botro lurco, botro Crocetta, botro Bargingo, botro Secco, fosso dei Morti (o Pisano).



non disponevano di studi idrologici-idraulici di dettaglio) e a quelli in prossimità di Vada<sup>2</sup> limitatamente alle porzioni di territorio ed est della Via Aurelia (S.P. 39).

Per il Fiume Fine, il Torrente Tripesce e il reticolo minore nell'ambito territoriale denominato "Città al Mare" (Mazzanta) si è fatto riferimento alle vigenti perimetrazioni di P.G.R.A.

In secondo luogo (così come prescritto con nota n.0066671/2018 del 19/12/2018), la configurazione di pericolosità idraulica a Rosignano Solvay è stata definita senza tener conto del muro presente tra la via Aurelia e la linea ferroviaria nei pressi della stazione di Rosignano.

Infine (come prescritto nella nota n.0066671/2018 del 19/12/2018), per il livello medio del mare da prendere in considerazione quale condizione al contorno si è fatto riferimento a quanto contenuto nella pubblicazione *"Studio e ricerca per l'implementazione del quadro conoscitivo della costa toscana nell'ambito del Piano Regionale di Gestione integrata della Costa"*

## 1.1 Criteri operativi e obiettivi dello studio

Il presente studio idrologico-idraulico, conformemente a quanto prescritto dal quadro normativo di riferimento, dettagliatamente descritto nei paragrafi seguenti, si è posto l'obiettivo di valutare l'effettivo livello di rischio idraulico sussistente allo stato attuale nelle aree interessate da previsioni urbanistiche in relazione ai potenziali fronti di esondazione del reticolo idrografico circostante per eventi di piena con tempo di ritorno pari a 30 e 200 anni.

Laddove alcune previsioni urbanistiche risulteranno soggette a rischio idraulico, conformemente al disposto normativo vigente, saranno condizionate alla realizzazione di opere di riduzione del rischio che saranno specificatamente ubicate e dimensionate al prescritto mero livello della fattibilità tecnica.

Per poter redigere le carte delle aree allagabili, è stato necessario valutare preliminarmente gli idrogrammi di piena attesi nei tratti dei corsi d'acqua esaminati corrispondenti ad eventi meteorici estremi (rispettivamente con tempo di ritorno trentennale e duecentennale) di durata critica tale da massimizzare la portata al colmo nelle sezioni di interesse.

<sup>2</sup> Fosso della Vallecorsa, fosso Mozzicone, fosso dei Fichi



In base alle diverse configurazioni idrauliche, geomorfologiche e territoriali dei singoli corsi d'acqua, per effettuare le simulazioni numeriche inerenti agli eventi di piena considerati sono stati allestiti più modelli matematici in regime di moto vario, diversificati al fine di mantenere il più possibile un livello di significatività omogeneo dei risultati e di individuare il tasso di degrado delle stime.

A tale scopo è stato utilizzato il software HEC-RAS vers. 4.1, nella opzione relativa al regime di moto vario, con l'introduzione di idonee "*lateral structures*", in modo da poter tenere in conto gli effetti di "*laminazione della portata al colmo di piena*" legati alle aree di naturale esondazione del corso d'acqua.

Per sviluppare un'aderente simulazione dei fenomeni di esondazione e dei deflussi extra alveo (per tutte le aste idrografiche esaminate e per i tempi di ritorno  $T_r = 30$  e  $200$ ), anni sono state effettuate verifiche idrauliche in regime di moto vario monodimensionale per la propagazione in alveo della corrente di piena, mentre per la propagazione delle correnti extra-alveo, è stata condotta un'analisi in moto vario facendo ricorso ad una modellazione idraulica puramente 2-D condotta mediante il software FLO-2D ver. Pro.

Giova comunque precisare che la procedura adottata ha assunto alcune irrinunciabili ipotesi di lavoro circa la non trattazione di fenomeni collaterali che possono aver luogo contestualmente agli eventi di piena, ma aventi carattere di ulteriore eccezionalità rispetto al mero evento idrologico estremo.

In sostanza si assumono ipotesi di regolare operatività e comportamento della rete drenante, forzate dall'imponderabilità spaziale e temporale dei casi di anomalo funzionamento delle difese o delle altre infrastrutture idrauliche coinvolte, o addirittura di totale perdita di funzionalità (distruzione) delle stesse. Eventi, questi, che peraltro, non essendo in generale obbligatoriamente causati dal mero accadimento dell'evento meteorologico estremo, se considerati avvenire contestualmente ad esso determinerebbero una sicura diminuzione della probabilità congiunta dell'evento combinato<sup>3</sup> portando a risultati, in termini di allagabilità e di tiranti idraulici, corrispondenti in realtà ad eventi più rari di quelli di riferimento imposti dalla normativa. In ragione delle suddette considerazioni si assume dunque che:

<sup>3</sup> Ad esempio: piena e collasso arginale; piena e occlusione della luce di un ponte; piena e frana che limita una sezione di deflusso; ecc.



- a) le strutture idrauliche di contenimento (argini, muri di sponda, ecc.) siano considerate tracimabili ma senza collasso della struttura. Analogamente non si considerano fenomeni di collasso dovuti a processi di mobilità dell'alveo o a moti di filtrazione;
- b) per altre strutture di contenimento non idrauliche (rilevati stradali e ferroviari), non è previsto il collasso anche in caso di tracimazione, valutandone nel contempo il grado di permeabilità macroscopico dovuto agli attraversamenti;
- c) si esclude la possibilità di ostruzione delle opere d'arte interferenti per trasporto in flottazione;
- d) non si considera l'influenza di allagamenti o ristagni dal reticolo scolante minore o da altri sistemi di drenaggio.



## 2 Quadro normativo di riferimento

L'attività conoscitiva, di verifica e prescrittiva, sviluppata nel seguente lavoro è stata uniformata al quadro normativo di riferimento vigente a livello nazionale, regionale e comunale ed in particolare alle seguenti norme:

- Regolamento n. 53/R di cui al DPGR 25.10.11;
- L.R. 41 del 24.07.2018. Disposizioni in materia di rischio di alluvioni e di tutela dei corsi d'acqua in attuazione del decreto legislativo 23 febbraio 2010, n. 49

### 2.1 Adempimenti rispetto alla D.P.G.R. del 25 Ottobre 2011, n. 53/R. "Regolamento di attuazione dell'art.62 della L.R. 3 Gennaio 2005, n.1 (Norme per il governo del territorio) in materia di indagini geologiche.

Con D.P.G.R. del 25 Ottobre 2011, n. 53/R è stato approvato il "Regolamento di attuazione dell'art.62 della L.R. 3 Gennaio 2005 n.1 (Norme per il governo del territorio) in materia di indagini geologiche".

Poiché la propensione alla allagabilità comporta diverse condizioni d'uso del territorio, conformemente a quanto prescritto nelle Direttive per le Indagini Geologico-Tecniche (Allegato A), sono state definite, per gli ambiti territoriali potenzialmente interessati da previsioni insediative ed infrastrutturali, le aree interessate da allagamenti per eventi con  $Tr \leq 30$  anni (aree a pericolosità idraulica molto elevata I.4) e le aree interessate da allagamenti per eventi compresi tra  $30 < Tr \leq 200$  anni (aree a pericolosità idraulica elevata I.3).

### 2.2 Adempimenti rispetto la L.R. 41 del 24.07.2018. Disposizioni in materia di rischio di alluvioni e di tutela dei corsi d'acqua in attuazione del decreto legislativo 23 febbraio 2010, n. 49 (Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni).

Con la L.R. 41/2018 la Regione disciplina la gestione del rischio alluvione in relazione alle trasformazioni del territorio e la tutela dei corso d'acqua.

In particolare detta normativa regola gli interventi edilizi ammessi nelle aree a pericolosità idraulica e le eventuali opere di gestione del rischio alluvioni che devono essere realizzate prima o contestualmente all'attuazione delle trasformazioni urbanistico-edilizie.

L'inviluppo dei risultati ottenuti per ciascun tempo di ritorno (in particolare in termini di livelli idrometrici massimi raggiunti in alveo e nelle aree di potenziale esondazione) ha



costituito la base numerica di riferimento per il tracciamento delle aree a pericolosità idraulica con riferimento al DTM Lidar.

Pertanto sono state individuate:

- le aree a pericolosità per alluvioni frequenti ( $Tr \leq 30$  anni);
- le aree a pericolosità alluvioni poco frequenti ( $30 < Tr \leq 200$  anni);

Altresì, come richiesto dalla normativa vigente, si è determinata la "magnitudo idraulica" che, con riferimento allo scenario duecentennale, è definita attraverso la combinazione del battente e della velocità della corrente, così come di seguito indicato:

- "*magnitudo idraulica moderata*": valori di battente inferiore o uguale a 0,5 metri e velocità inferiore o uguale a 1 m/s. Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente uguale o inferiori a 0,3 m;
- "*magnitudo idraulica severa*": valori di battente inferiore o uguale a 0,5 metri e velocità superiore a 1 m/s oppure battente superiore a 0,5 m e inferiore o uguale a 1 m e velocità inferiore o uguale a 1 m/s. Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente superiore a 0,3 m e inferiore o uguale a 0,5 m;
- "*magnitudo idraulica molto severa*": battente superiore a 0,5 m e inferiore o uguale a 1 m e velocità superiore a 1 m/s oppure battente superiore a 1 m. Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battenti superiori a 0,5 metri.

In base alla pericolosità idraulica dell'area e alla magnitudo si sono individuate le opere per la gestione del rischio di alluvioni che risultano necessarie per l'attuazione delle trasformazioni urbanistico-edilizie.

Infine, come richiesto dalla normativa vigente, le nuove previsioni insediative sono state ubicate esternamente alla fascia dei 10 m dal piede esterno dell'argine o, in mancanza, ciglio di sponda dei corsi d'acqua del reticolo idrografico di cui all'articolo 22, comma 2, lettera e), della legge regionale 27 dicembre 2012, n. 79.



### **3 Interventi di mitigazione del rischio idraulico in corso di progettazione o in corso di realizzazione nel Comune di Rosignano Marittimo**

Relativamente alla mitigazione del rischio idraulico nel territorio del Comune di Rosignano Marittimo si segnala che presso gli uffici regionali del Genio Civile sono agli atti le seguenti progettazioni:

- Progetto definitivo di sistemazione idraulica dei fossi Vallecorsa e Mozzicone per la messa in sicurezza delle aree sottese;
- Interventi globali sul Torrente Tripesce per la messa in sicurezza idraulica delle aree a valle del ponte della ferrovia Pisa-Roma;
- Adeguamento idraulico del Torrente Fine. Realizzazione nuovi attraversamenti idraulici Linea Ferroviaria e SS 1 Aurelia. Realizzazione argine sinistro a valle della SP 39 Via Aurelia.

Inoltre si precisa che sono in via di ultimazione sia i lavori che interessano il fiume Fine a valle della S.P.39 (Aurelia), sia un primo stralcio dei lavori relativi al tratto terminale del fosso Vallecorsa sia un primo stralcio di lavori sul torrente Tripesce.

Ai fini delle fattibilità delle previsioni urbanistiche di cui al presente POC l'unico intervento di mitigazione preso in esame ai sensi dell'art. 11 e dell'art. 8 comma 1 lett. a) della LR41/2018 è quello degli interventi previsti sul fiume Fine nel progetto esecutivo di RFI "Adeguamento idraulico del Torrente Fine. Realizzazione nuovi attraversamenti idraulici Linea Ferroviaria e SS 1 Aurelia. Realizzazione argine sinistro a valle della SP 39 Via Aurelia" relativamente al comparto 2-1a.



## 4 Analisi idrologica

### 4.1 Considerazioni generali circa la stima degli idrogrammi di piena

Per individuare le previsioni urbanistiche soggette a rischio idraulico è stato necessario preliminarmente valutare gli idrogrammi di piena di riferimento per i corsi d'acqua elencati in premessa (analisi "idrologica").

Come meglio specificato nei paragrafi seguenti, gli idrogrammi stimati con riferimento ai tempi di ritorno 30 e 200 anni sono stati utilizzati come input idrologico nei successivi modelli di simulazione numerica delle correnti di piena.

La stima degli idrogrammi di progetto associati ai diversi tempi di ritorno per i bacini idrografici in esame, che risultano essere non strumentati, è stata eseguita mediante una modellistica idrologica afflussi-deflussi di tipo semidistribuito e considerando valida l'ipotesi che la portata defluente associata ad uno specifico tempo di ritorno sia determinata da una sollecitazione meteorica di pari probabilità di accadimento. In particolare, la trasformazione afflussi-deflussi, a meno del deflusso di base ritenuto trascurabile, viene descritta da un approccio idrologico costituito da tre componenti in serie: un modello di infiltrazione basato sul metodo SCS-CN, due modelli di formazione della piena basati sull'idrogramma unitario istantaneo (IUH) adimensionale e sul metodo cinematico ed, infine, il modello di Muskingum-Cunge (Cunge, 1969) per il trasferimento dell'onda di piena lungo i corsi d'acqua.

I passi per determinare l'idrogramma di piena di progetto per ogni assegnato tempo di ritorno sono:

- stima delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP);
- ragguglio all'area delle LSPP;
- determinazione dello ietogramma di progetto: scelta della durata critica dell'evento e della distribuzione temporale delle precipitazioni;
- stima della pioggia effettiva;
- stima della portata di progetto.

Di seguito verranno analizzati i seguenti elementi:

- a) **Definizione degli afflussi meteorici:** determinazione della relazione tra altezze e durata di pioggia di assegnato tempo di ritorno per i bacini idrografici in esame (LSPP) e operazione di ragguglio all'area;



- b) **Determinazione dello ietogramma di progetto:** scelta della durata critica dell'evento e della distribuzione temporale delle precipitazioni;
- c) **Stima delle perdite idrologiche:** determinazione della quantità di precipitazione trattenuta dal terreno (perdite), con la conseguente determinazione della pioggia effettiva (o pioggia netta) che rappresenta il volume d'acqua che raggiunge per ruscellamento superficiale la rete di drenaggio fino alla sezione di chiusura, determinando l'evento di piena;
- d) **Trasformazione afflussi-deflussi:** schematizzazione della risposta del singolo bacino idrografico alle sollecitazioni meteoriche, in funzione delle proprie caratteristiche fisiografiche e combinazione di tale risposta con la pioggia netta per stimare gli idrogrammi di piena.
- e) **Propagazione delle onde di piena:** modellazione del fenomeno di trasferimento dell'onda di piena lungo il corso d'acqua.

## 4.2 Definizione degli afflussi meteorici

La forzante data dall'evento meteorico è schematizzata attraverso uno ietogramma sintetico ad intensità costante nel tempo e nello spazio, la cui frequenza viene stimata a partire dalle curve di possibilità pluviometrica ricavate con l'adattamento delle serie storiche reali alla distribuzione TCEV ("Two Components Extreme Value").

Dette curve sono espresse, per ciascun tempo di ritorno, nella classica equazione di forma monomia nella quale l'altezza di pioggia totale  $h$  [mm] è espressa in funzione della durata  $d$  [ore] dell'evento:

$$h = a \cdot d^n$$

dove i parametri  $a$  e  $n$  sono desunti dallo studio promosso dalla Regione Toscana con DGRT 1133/2012 al fine di procedere ad un'implementazione e un aggiornamento del quadro conoscitivo idrologico del territorio toscano, con il quale si è provveduto ad aggiornare l'analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme fino all'anno 2012 compreso (Referente: Prof. Enrica caporali Dipartimento di Ingegneria civile e Ambientale UNI FI). I nuovi dati pluviometrici sono liberamente consultabili nel sito della Regione Toscana nella sezione dedicata alla Difesa del Suolo (Figura 4-1).

Ad oggi le nuove LSPP sono state ricavate per durate di precipitazione  $d \geq 1$  ora ma, secondo le indicazioni fornite dagli estensori dello studio, sono estrapolabili con buona attendibilità fino a  $d \geq 0.5$  ore.

The screenshot shows the website of the Regione Toscana. At the top left is the logo of the region, a white horse on a red background. Below it is a navigation menu with links for Home, Regione, Cittadini, Imprese, Enti e associazioni, and Uffici. On the right is a 'ServiziOnline' button. Below the menu is a breadcrumb trail: 'Sei in: Regione Toscana | Cittadini | Ambiente | Difesa del suolo'. The main content area is titled 'Cittadini | Ambiente' and features a sidebar menu with categories like Alimentazione, Ambiente (selected), Bandi, Cultura, Diritti e cittadinanza, Educazione, Istruzione e ricerca, Formazione, and Lavoro. The main content is under the heading 'Difesa del suolo' and contains a section titled 'Nuovi dati sulla regionalizzazione delle precipitazioni'. This section includes a text block explaining the collaboration between the Regione Toscana and the University of Florence, a map of the region showing precipitation contours, and a list of links for further information.

Figura 4-1: Sezione del sito della Regione Toscana dedicato ai nuovi dati di regionalizzazione delle precipitazioni.

Dal sito della Regione Toscana è possibile scaricare l'andamento spaziale dei parametri  $a$  e  $n$  con griglia di 1 km x 1 km per ciascuno dei tempi di ritorno 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 500 anni, desunto a partire dall'analisi TCEV delle altezze di pioggia osservate. I risultati resi disponibili in formato ASCII Grid. La Figura 4-2 mostra, a titolo di esempio, le griglie dei parametri  $a$  e  $n$  per il tempo di ritorno di 200 anni nell'intera regione.

I valori delle altezze di pioggia così calcolati sono validi, a rigore, solo per precipitazioni estreme puntuali, essendo stati calibrati a partire dai dati puntuali di pioggia (le LSPP sono tarate sulla base dei massimi annui misurati puntualmente in una determinata stazione pluviometrica).

All'aumentare dell'area interessata dalla precipitazione la probabilità di ottenere un'intensità media dell'evento estremo pari a quella puntuale diminuisce sensibilmente, soprattutto per eventi brevi che sono tendenzialmente più localizzati.

Solitamente risulta quindi opportuno introdurre un coefficiente riduttivo da applicare alle altezze di pioggia che prende il nome di coefficiente di ragguaglio areale, tuttavia nel presente studio si è cautelativamente assunto di non introdurre il predetto coefficiente.

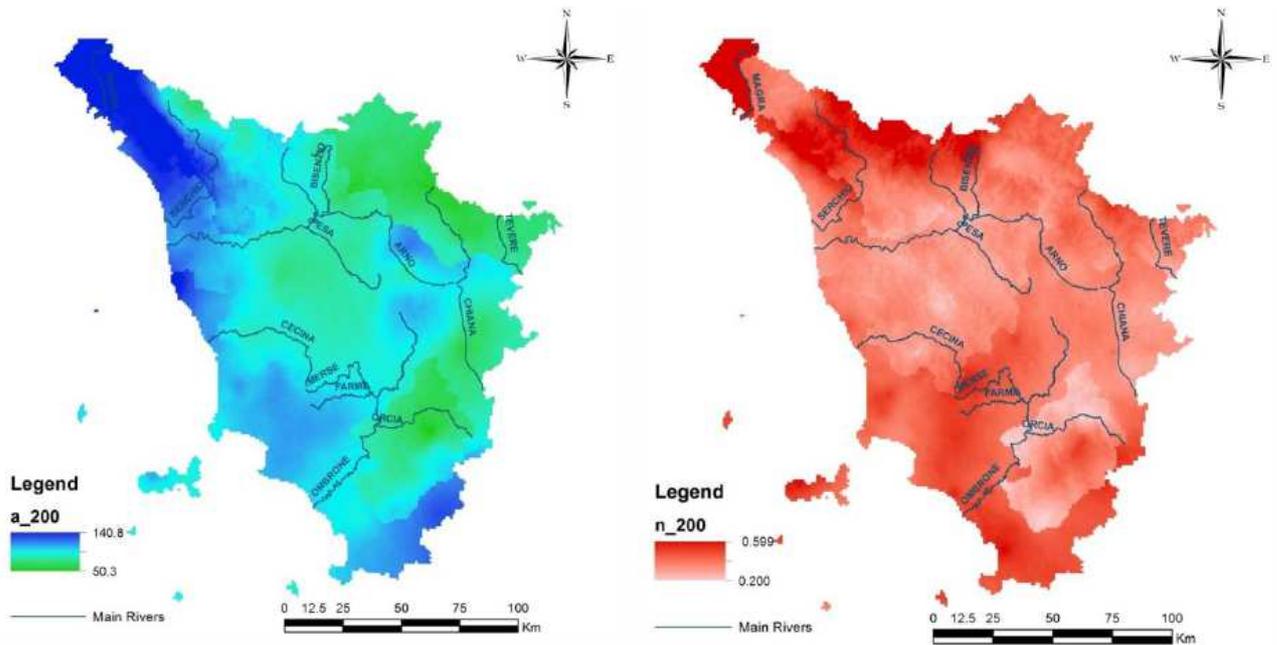


Figura 4-2: Spazializzazione sull'intera regione dei parametri "a" (a sinistra) e "n" (a destra) della Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica LSPP per il Tempo di ritorno 200 anni.

Per poter stimare gli afflussi meteorici sono stati innanzi tutto individuati i bacini idrografici (in particolare i sottobacini e gli interbacini del modello idrologico semidistribuito che sarà descritto in seguito) separati dalle linee di spartiacque desunte dal modello digitale del terreno.

Successivamente, l'analisi dei dati pluviometrici regionali precedentemente descritti ha portato gli scriventi a individuare due porzioni di territorio omogenee: l'area Nord comprendente i bacini idrografici di Quercetano, Acacie, Grande, Ginepraia, Condotti, Iurco, Crocetta, Bargingo, Secco dei Morti (o Pisano) l'area Sud comprendente i bacini idrografici di Vallecorsa, Mozzicone, Fichi. Sono stati quindi calcolati, per entrambe le aree omogenee e per i tempi di ritorno investigati (30 e 200 anni), i valori dei parametri  $a$  e  $n$  delle LSPP.

Nella tabella seguente si riportano i parametri delle curve di possibilità pluviometrica caratteristici dei corsi d'acqua di interesse.

Tabella 4-1: parametri delle curve di possibilità pluviometrica impiegate nel modello idrologico

Zona omogenea	TR 30 anni ( $d > 0.5$ ore)		TR 200 anni ( $d > 0.5$ ore)	
	$a$	$n$	$a$	$n$
<b>Area Nord</b>	<b>65.688375</b>	<b>0.2802925</b>	<b>91.369062</b>	<b>0.3437581</b>
<b>Area Sud</b>	<b>63.481001</b>	<b>0.2652022</b>	<b>88.298332</b>	<b>0.3286667</b>

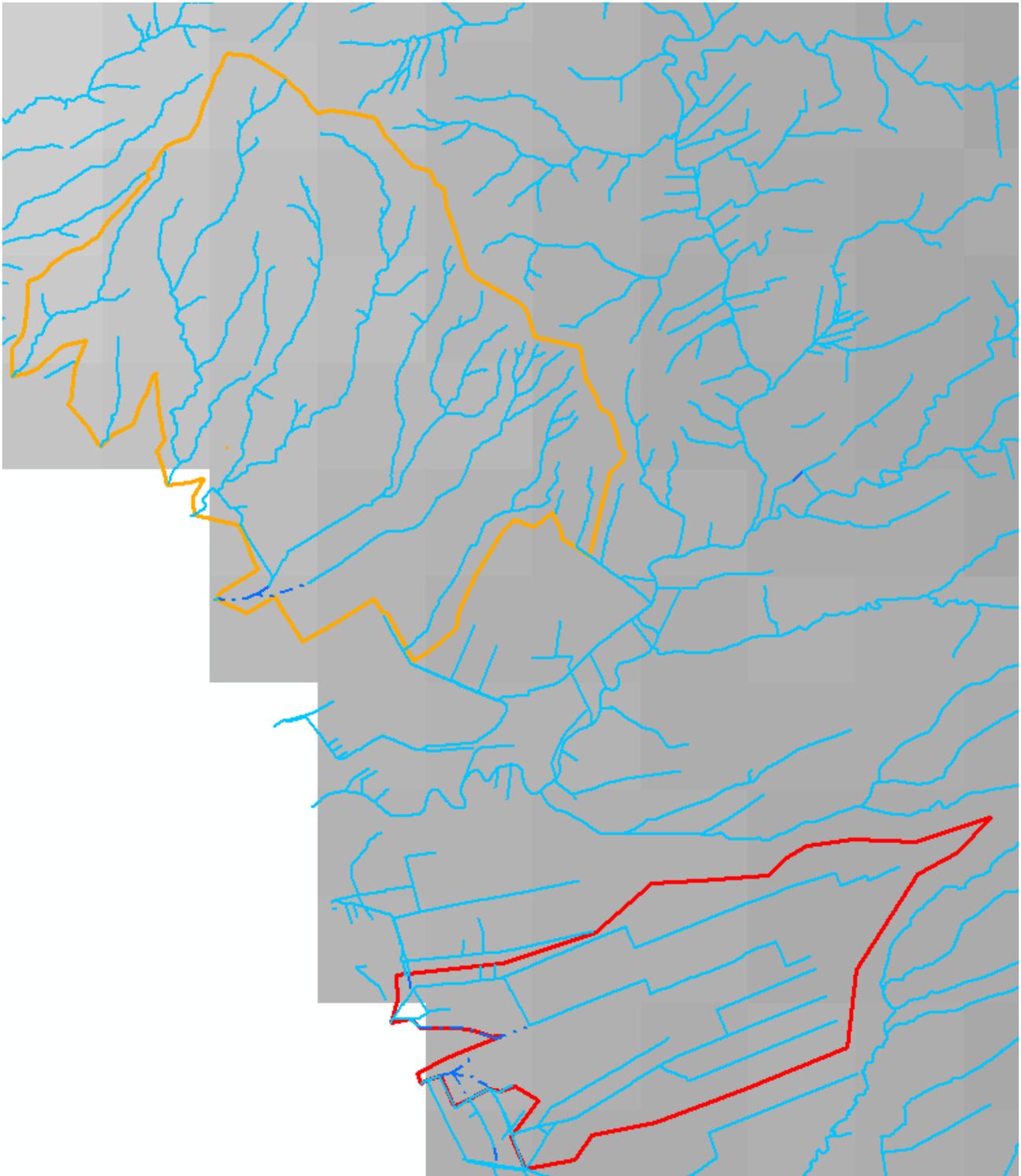


Figura 4-3: Individuazione delle porzioni Nord (perimetro arancio) e Sud (perimetro rosso) dei bacini idrografici e stima dei parametri delle LSPP a partire dai dati spaziali in formato raster forniti dalla Regione Toscana.

### 4.3 Determinazione dello ietogramma di progetto

La determinazione dello ietogramma di progetto per un prefissato tempo di ritorno richiede l'individuazione della durata dello ietogramma (durata critica) nonché della



distribuzione temporale degli spessori di pioggia stimati dalla corrispondente linea segnalatrice di possibilità pluviometrica areale.

La durata della pioggia viene determinata assumendo che la portata al colmo con assegnato tempo di ritorno,  $T_r$ , sia la maggiore tra le portate al colmo determinate da tutti gli eventi di pioggia a intensità costante ricavati dalla linea di possibilità pluviometrica areale. E' possibile determinare la durata critica utilizzando diverse metodologie in funzione della modellistica afflussi-deflussi impiegata. In particolare, nel caso dei metodi empirici tradizionali che si basano sul metodo razionale tale durata è data dal tempo di corrivazione del bacino, mentre nel caso di uso di modelli idrologici in grado di descrivere la trasformazione afflussi-deflussi, essa può essere stimata mediante un insieme di simulazioni. Nel presente studio è stato seguito il secondo approccio, utilizzando il primo, per una prima stima attorno alla quale determinare il corretto valore di durata critica.

In particolare, sulla base del concetto di evento critico, la determinazione della durata critica mediante simulazione idrologica consiste nell'effettuare un insieme di simulazioni con un modello afflussi-deflussi avente come dati di ingresso una serie di ietogrammi di pioggia di durata crescente, ottenuti distribuendo in modo uniforme nel tempo lo spessore di pioggia ricavato dalla LSPP areale relativa ad un determinato tempo di ritorno. All'aumentare della durata dell'evento, si ottengono idrogrammi di piena il cui picco assume valori crescenti fino ad un valore massimo, per poi decrescere. La durata dell'evento che corrisponde all'idrogramma con il massimo valore della portata di picco viene assunta come durata critica.

A titolo di esempio, vengono di seguito riportati i risultati delle simulazioni effettuate per un generico bacino idrografico, considerando, a parità di tempo di ritorno, ietogrammi di pioggia uniforme di differenti durate. Come si può vedere dalla Figura 4-4, la durata che massimizza la portata al colmo è quella pari a 1.5 ore che pertanto è assunta come durata critica del bacino.

Nota la pioggia areale, per la determinazione del deflusso diretto è necessario valutare la pioggia effettiva e, quindi, la quantità di pioggia che viene assorbita dal suolo e quella intercettata dalla vegetazione, mentre la quantità di pioggia persa per evapotraspirazione è trascurabile per eventi meteorici particolarmente intensi (Maione, 1977). Per effettuare tale stima, è stato applicato il metodo del Curve Number proposto dal Soil Conservation Service (1972).

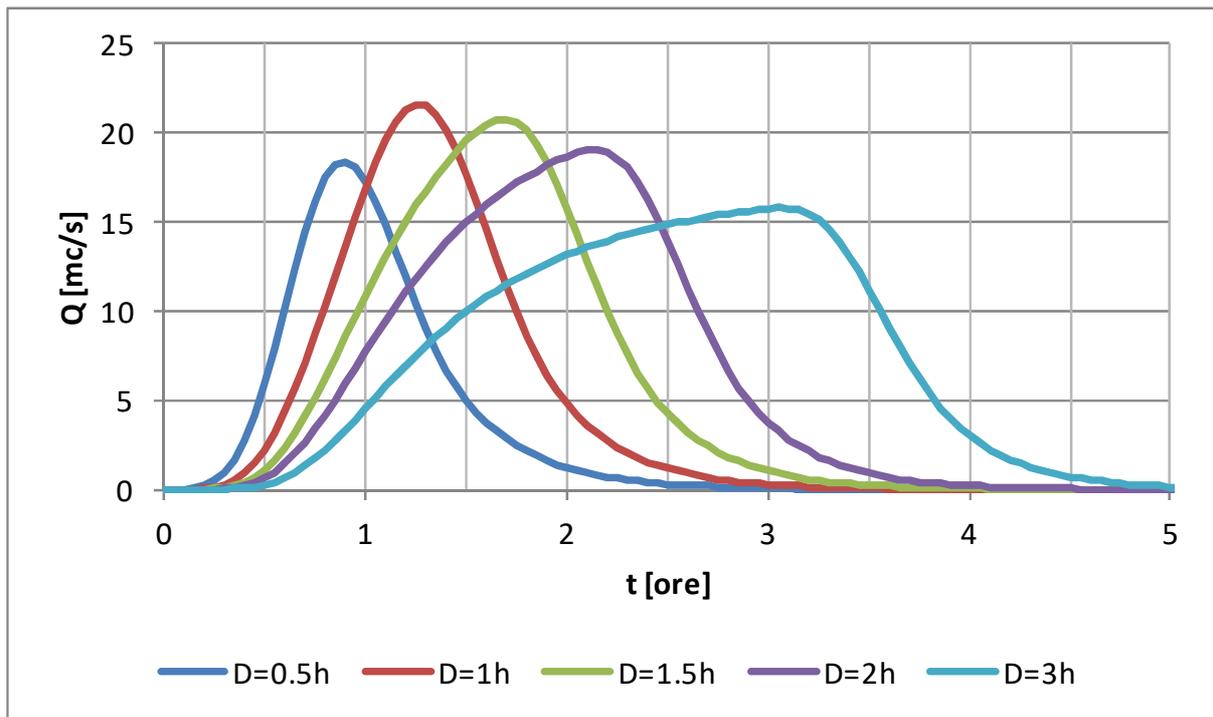


Figura 4-4: Simulazioni con ietogramma costante e diverse durate per la scelta della durata critica di un generico bacino idrografico

#### 4.4 Stima delle perdite idrologiche mediante il metodo del Curve Number

La stima delle perdite idrologiche è stata effettuata con il metodo del Curve Number del SCS (*Soil Conservation Service*).

Questo metodo considera il deflusso superficiale come differenza fra le precipitazioni e le perdite, dove in queste ultime si inglobano, oltre alle perdite per infiltrazione, anche quelle per intercettazione da parte delle piante, quelle per accumulo sulle depressioni superficiali e quelle per l'imbibizione iniziale del terreno. L'ipotesi di base del metodo è che il rapporto fra il volume defluito ed il volume di pioggia depurato delle perdite iniziali rimanga, in ogni istante, uguale al rapporto fra il volume infiltrato ed il volume massimo teorico delle perdite:

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

dove  $P_e$  è la precipitazione efficace per il deflusso,  $P$  la precipitazione lorda,  $I_a$  le perdite iniziali,  $F_a$  il volume specifico infiltrato ed  $S$  il volume specifico di saturazione del terreno. L'equazione di continuità si può riscrivere per questo modello come segue:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

nella quale le perdite iniziali (o *Initial Abstraction*) è possibile stimarle in funzione del volume specifico di saturazione tramite la relazione:

$$I_a = \beta \cdot S$$

dove si pone normalmente  $\beta = 0.2$ . Dalla combinazione delle due equazioni di continuità precedentemente scritte si ottiene l'espressione della precipitazione efficace:

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

nella quale il volume specifico di saturazione  $S$  dipende dalla natura geologica del terreno e dall'uso del suolo, caratteristiche esprimibili in funzione del coefficiente Curve Number  $CN$  secondo la relazione:

$$S = 254 \cdot \left( \frac{100}{CN} - 1 \right)$$

Il coefficiente  $CN$  può assumere valori compresi tra 0 (suolo completamente permeabile) e 100 (suolo completamente impermeabile) ed è stimabile tramite delle tabelle elaborate dalla US Soil Conservation Service a partire dalle caratteristiche geologiche, di uso del suolo e del livello di umidità antecedente l'inizio delle precipitazioni. Quest'ultimo fattore è schematizzabile in tre condizioni: terreno ben asciutto ( $CN I$ ), terreno mediamente umido ( $CN II$ ) e terreno molto umido ( $CN III$ ).

Nel presente studio, si è fatto riferimento alle condizioni di terreno molto umido ( $CN III$ ), con il parametro  $CN II$  determinato, per i bacini di interesse, mediante la procedura descritta al paragrafo seguente.

#### **4.4.1 Caratterizzazione del parametro di assorbimento $CN$ per i bacini idrografici in esame**

La determinazione del parametro di assorbimento  $CN$  (U.S. Dept. Agric., Soil Conservation Service, 1972) è stata raggiunta attraverso l'analisi degli aspetti litologici, pedologici, vegetazionali e di uso del suolo del bacino.

Per la determinazione del  $CN$  si è utilizzato lo shape file predisposto per l'intero territorio regionale dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli studi di Firenze (DICEA).

Nel caso in cui nel bacino siano presenti differenti tipi di terreno o questo sia utilizzato in differenti modi, si ricorre ad un valore medio di  $CN$ . Come suggerito da Mancini e Rosso (1989), si utilizza il valore medio a scala di bacino del parametro  $S$ , mediante un'integrazione spaziale dei valori puntuali, anziché un'integrazione dei valori di  $CN$  a causa della non linearità dell'equazione che lega i due parametri.

Quindi si ha:

$$\bar{S} = \frac{S_1 A_1 + S_2 A_2 + \dots + S_i A_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_i} \quad (3.6)$$

dove  $S_i$  rappresenta il valore di  $S$  per l'area omogenea  $A_i$

La Figura 4-5 mostra l'andamento spaziale del parametro  $CN-II$  nell'area di interesse.

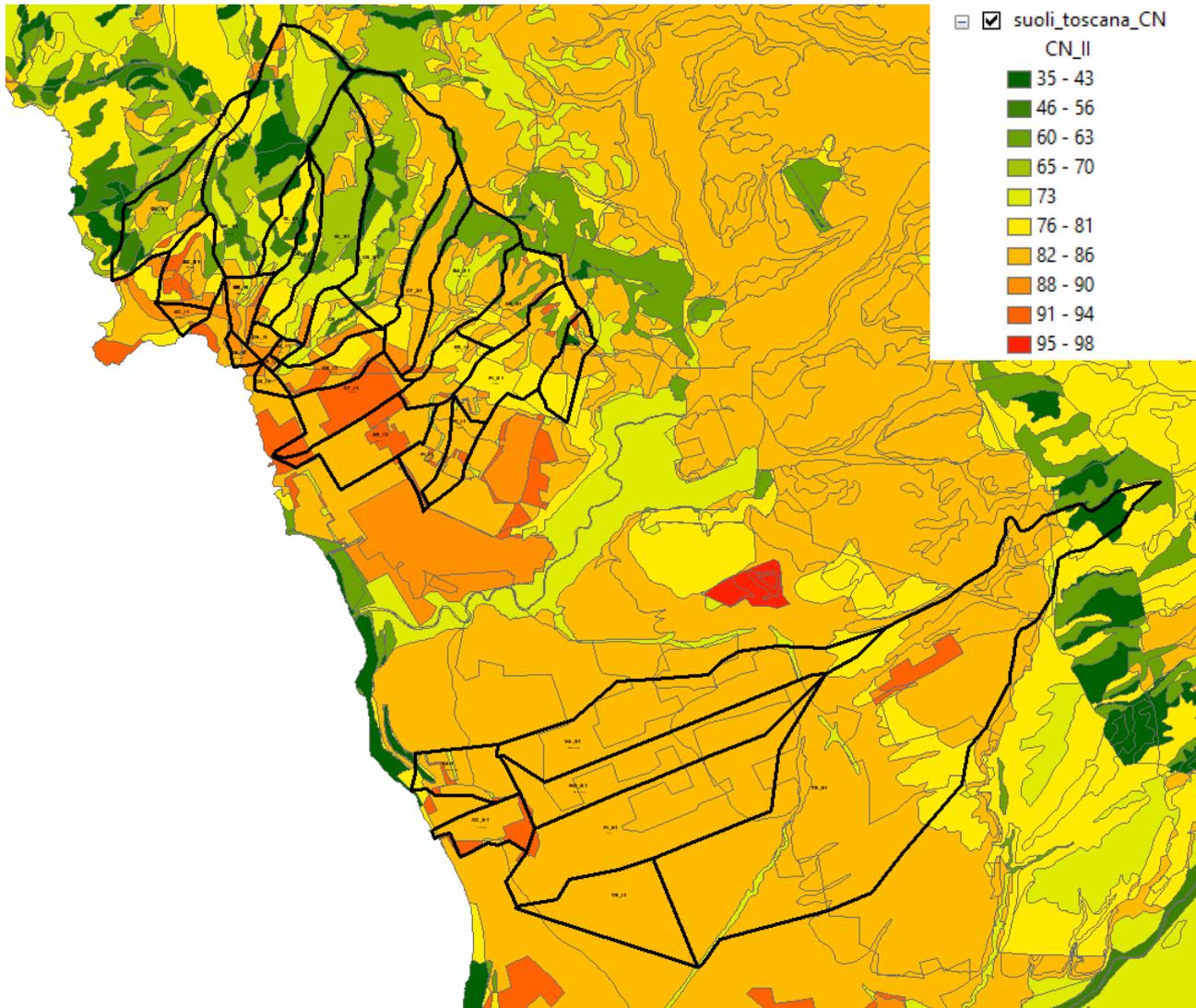


Figura 4-5: Andamento spaziale del parametro  $CN-II$  nell'area di interesse: la gradazione cromatica da verde a rosso indica aree rispettivamente da molto permeabili a sostanzialmente impermeabili. Le linee di colore nero indicano i bacini idrografici di interesse.

In Tabella 4-2, per ciascun bacino di interesse, è indicato il valore del parametro  $CN-III$ .

Tabella 4-2: valori del parametro CN III per i sottobacini e gli interbacini di interesse.

Sottobacini	Superficie [kmq]	CN III	Interbacini	Superficie [kmq]	CN III
AC_S1	0.56	91.5	CR_S1	2.25	85.3
QU_S1	1.04	83.9	CT_S1	0.85	89.8
GR_S1	2.52	79.0	SE_S1	0.68	89.22
GI_S1	0.39	80.2	BA_S1	1.16	88.2
CN_S1	0.47	83.7	PI_S1	1.00	90.6
IU_I1	1.43	85.5	AC_I1	0.13	93.8
GR_I1	0.27	93.0	SE_I1	0.46	92.5
CN_I1	0.11	94.1	SE_I2	0.83	94.2
CN_I2	0.09	95.1	PI_I1	0.33	93.2
CR_I3	0.02	94.9	PI_I2	0.35	93.1
CR_I4	0.09	93.6	VA_S1	2.39	92.7
CR_I2	0.48	93.5	VA_I1	0.62	91.2
CR_I1	0.47	89.5	MO_I1	1.62	92.9
CT_I1	0.73	95.7	FI_S1	2.85	92.9
Tr_S1	9.59	91.5	Tr_I1	1.22	92.9

## 4.5 La trasformazione afflussi – deflussi

### 4.5.1 Il metodo dell'idrogramma unitario istantaneo (IUH)

Nel vasto panorama dei modelli di formazione dei deflussi, che si propongono di rappresentare matematicamente i processi idrologici che si manifestano in un bacino idrografico descrivendone il comportamento con un operatore che lega la funzione di distribuzione temporale delle piogge effettive (ingresso al sistema) ed il corrispondente idrogramma dei deflussi diretti (risposta del sistema), è stata scelta la metodologia basata sull'idrogramma unitario istantaneo (IUH). Il metodo si basa sulle ipotesi di linearità e stazionarietà del bacino ed effettua la combinazione tra pioggia in ingresso e IUH per il calcolo della portata diretta. In altre parole, la risposta  $Q(t)$  ad una sollecitazione meteorica di intensità  $p(t)$  variabile nel tempo, ma supposta costante su tutti i punti del bacino, è data dall'integrale di convoluzione:

$$Q(t) = \int_0^t p(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

dove  $p(t)=A i(t)$  è la portata di afflusso meteorico al generico tempo  $t$  e la funzione  $h(t)$ , che prende il nome di IUH, è definita come l'idrogramma dei deflussi generato da un'ipotetica pioggia efficace di altezza unitaria ed intensità costante, distribuita uniformemente sul bacino, e caduta in un intervallo di tempo unitario (immissione di tipo impulsivo).

La funzione  $h(t)$  può essere stimata mediante numerosi approcci, tra cui il metodo dell'invaso lineare, il metodo di Nash, il metodo geomorfologico oppure facendo ricorso all'idrogramma unitario del SCS.

#### 4.5.1.1 L'idrogramma unitario del Soil Conservation Service (IUH-SCS)

L'idrogramma SCS è un idrogramma adimensionale definito dal SCS in base all'analisi di idrogrammi di piena in uscita dalla sezione di chiusura di numerosi bacini idrografici strumentati, di dimensioni grandi e piccole. Esso ha un vasto campo di applicazioni pratiche nel campo delle trasformazioni afflussi deflussi per la sua semplicità d'uso e per la sua generalità. Questo IUH presenta il 37.5% del suo volume prima dell'istante di picco; inoltre, i valori della portata di picco e dell'istante  $T_p$  sono stati ricavati adottando un modello semplificato di idrogramma triangolare di base  $2.67 T_p$  (Figura 4-6).

Per la definizione dell'idrogramma unitario adimensionale del SCS per è necessario specificare il tempo di ritardo  $T_l$  del bacino idrografico, che può essere valutato separatamente mediante relazioni empiriche valide per l'area in esame oppure, in assenza di esse, a partire dal tempo di corrivazione secondo la relazione:

$$T_l = \frac{3}{5} T_c$$

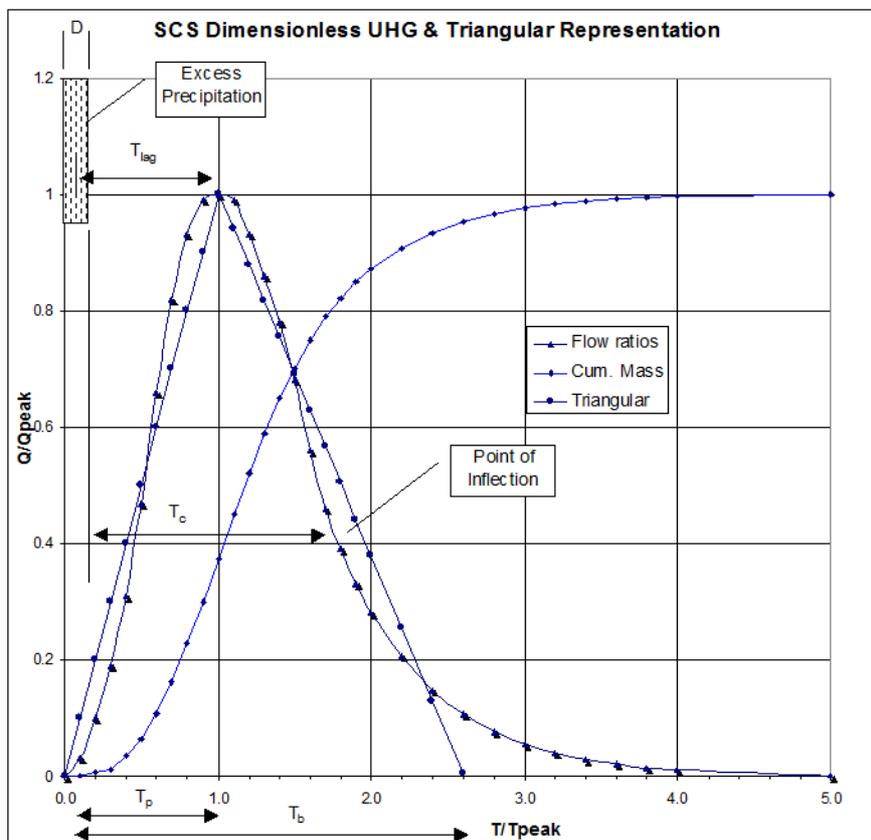


Figura 4-6: IUH-SCS

#### 4.5.2 Il Metodo Cinematico (Kinematic Wave)

Il metodo cinematico utilizza l'equazione di continuità e l'approssimazione cinematica delle equazioni complete di De Saint Venant per trasformare la precipitazione efficace in deflusso superficiale. Il bacino viene rappresentato tramite un modello concettuale in cui possono essere definiti due piani rettangolari, percorsi dal deflusso superficiale (*overland flow planes*) e canali che raccolgono il deflusso proveniente dai piani rettangolari (Figura 4-7).

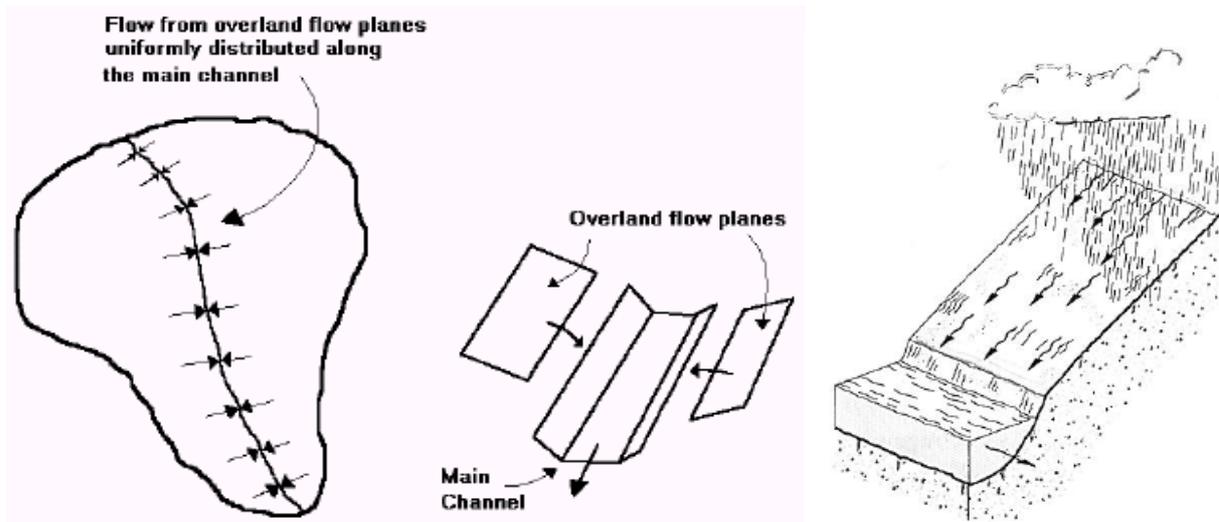


Figura 4-7: schematizzazione cinematica di un interbacino in canali e aree di drenaggio

L'equazione che modella il fenomeno di trasferimento della massa liquida sia sui versanti che nell'alveo del corso d'acqua è l'equazione dell'onda cinematica:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \alpha mA^{(m-1)} \frac{\partial A}{\partial x} = q$$

dove  $A$  è l'area liquida della sezione di deflusso,  $q$  la portata continua in ingresso lungo l'ascissa  $x$  del corso d'acqua,  $a$  ed  $m$  due parametri univocamente determinati dalla geometria e dalla scabrezza della sezione di deflusso, essendo per ipotesi, nel metodo cinematico,  $Q = aA^m$ .

Il coefficiente di scabrezza di Manning relativo al moto sui versanti è maggiore rispetto quello utilizzato negli alvei naturali e può essere ricavato da specifiche tabelle disponibili in letteratura.

#### 4.5.3 La propagazione delle onde di piena

Una onda di piena che percorre un corso d'acqua viene laminata per effetto degli attriti e dei fenomeni di invaso nell'alveo e nelle zone golenali.



Il tempo di percorrenza e le caratteristiche di laminazione della portata al colmo variano a seconda del tipo di corso d'acqua considerato. In particolare, il processo di propagazione dipende dalla pendenza, dalla lunghezza del tratto, dalla scabrezza e dall'altezza d'acqua. In generale lo studio della propagazione dei deflussi può essere effettuato mediante:

- **modelli idraulici**, basati sulle equazioni di De Saint Venant , in forma completa o semplificata.
- **modelli idrologici**, basati sull'equazione di continuità e su relazioni tra portata e volumi liquidi invasati in un dato tratto di un corso d'acqua.

#### **4.5.3.1 Il Metodo di Muskingum**

Nel presente metodo l'invaso in un tratto di corso d'acqua viene considerato come somma di un termine di immagazzinamento prismatico e di un termine di immagazzinamento a cuneo. Durante la fase di crescita della portata defluente l'invaso a cuneo è positivo e viene aggiunto all'invaso prismatico, mentre durante la fase calante dell'onda di piena l'invaso a cuneo è negativo e viene sottratto dall'invaso prismatico.

Nel metodo di Muskingum si pone:

$$V = K[XQ_i + (1 - X)Q_u]$$

dove  $Q_i$  rappresenta la portata in ingresso,  $Q_u$  la portata in uscita,  $K$  il tempo che impiega l'acqua a propagarsi nel tratto di corso d'acqua in esame (cioè tra la sezione di monte e quella di valle) ed  $X$  è un fattore peso, variabile tra 0 e 0.5. Generalmente i valori di  $X$  sono prossimi a 0 per canali con ampie aree golenali, prossimi a 0.5, invece, per canali a forte pendenza. Valori tipici di  $X$  sono compresi tra 0.2 e 0.3.

#### **4.5.3.2 Il Metodo di Muskingum-Cunge**

Il metodo di Muskingum-Cunge è basato sull'equazione di continuità e sull'approssimazione parabolica delle equazioni complete di De Saint Venant. Cunge (1969) dimostrò che quando  $K$  e  $\Delta t$  sono assunti come costanti, rappresentano un'approssimazione dell'equazione dell'onda cinematica, ed in particolare dell'equazione di diffusione del momento. Definita  $c$  la celerità di traslazione dell'onda corrispondente a  $Q$  e  $B$  ( $c = \frac{dQ}{dA} = \frac{dx}{dt}$ ) dove  $B$  è la larghezza dell'alveo in superficie ed  $A$  l'area liquida, i coefficienti del metodo di Muskingum vengono calcolati in base alle caratteristiche del corso d'acqua mediante le relazioni:

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{BS_0 c \Delta x} \right)$$

in cui  $\Delta x$  è l'intervallo di discretizzazione spaziale,  $\Delta t$  il passo temporale di calcolo e  $S_0$  la pendenza di fondo.

## 4.6 Stima della portata di progetto, analisi preliminari e scelta del modello idrologico

La scelta del tipo di schematizzazione per rappresentare la risposta di un bacino idrografico sollecitato da un evento meteorico è condizionata sia dall'obiettivo dell'analisi che si vuole effettuare sia dalla disponibilità dei dati. Le metodologie comunemente utilizzate per rappresentare la trasformazione afflussi-deflussi possono essere distinte in relazioni matematiche e modelli matematici. Le relazioni matematiche, nelle quali il tempo non compare come variabile, sono comunemente usate quando non è necessario descrivere l'andamento temporale delle grandezze. I modelli matematici, viceversa, si usano quando le quantità in gioco sono funzioni del tempo e non è possibile trascurare l'influenza esercitata sui valori di una grandezza da quelli che la stessa ha assunto in precedenza.

### 4.6.1 Relazioni matematiche

Le relazioni matematiche forniscono solo alcune caratteristiche dell'idrogramma di progetto quali l'istante della portata al colmo, la portata al colmo o la durata. I vari metodi utilizzati nella pratica idrologica per la schematizzazione della trasformazione afflussi-deflussi si basano su alcune ipotesi semplificative che sono quelle su cui si fonda il metodo razionale e, in particolare, sono:

- per un fissato tempo di ritorno il massimo della portata al colmo di piena è prodotto dall'evento di pioggia, uniforme nello spazio e nel tempo, ricavato dalla corrispondente curva di possibilità pluviometrica ed avente una durata uguale al tempo di corrivazione del bacino;
- il picco dell'idrogramma di piena si osserva all'istante in cui cessa la pioggia;
- il picco di piena ha il medesimo tempo di ritorno della precipitazione che lo ha generato;
- la formazione della piena nel bacino ed il suo trasferimento lungo il reticolo idrografico avviene senza la formazione di significativi invasi.

Tra le varie relazioni matematiche, si ricorda quella di Ghirardelli che assume l'idrogramma di piena di forma triangolare, con tempo di risalita e di discesa pari al tempo di corrivazione. Il valore della portata al colmo è quindi dato da:

$$Q_c = \frac{1}{3.6} \frac{EA}{T_c}$$

dove  $E$  è la pioggia areale netta, denominata anche eccesso di pioggia, espressa in mm;  $T_c$  è il tempo di corrivazione, espresso in ore; e  $A$  è la superficie del bacino espressa in km<sup>2</sup>.

Nel caso di bacini idrografici strumentati, se si dispone delle osservazione relative ad alcuni idrogrammi di piena salienti, il calcolo del tempo di corrivazione,  $T_c$ , può essere effettuato mediante lo ietogramma di pioggia effettiva e l'idrogramma di deflusso diretto. In particolare, i metodi di stima più ricorrenti per  $T_c$  sono (Singh, 1988):

- il tempo che intercorre tra il centroide della pioggia effettiva e il punto di inflessione del ramo decrescente dell'idrogramma di portata diretta;
- il tempo tra la fine della pioggia effettiva e il punto di inflessione del ramo decrescente dell'idrogramma di portata diretta.

Per bacini idrografici non strumentati, invece, la stima del tempo di corrivazione dipende da relazioni empiriche che esprimono il legame tra  $T_c$  ed alcune grandezze caratteristiche del bacino di facile determinazione. Tra le relazioni empiriche maggiormente utilizzate, ricordiamo la formula di Giandotti (1934), ricavata attraverso dati relativi a diversi bacini italiani (Dora Baltea, Trebbia, Taro, Panaro, Reno Tevere, Arno, Po), che stima  $T_c$  in ore come:

$$T_c = \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{0.8H^{0.5}}$$

con  $A$  area del bacino in km<sup>2</sup>,  $L$  lunghezza dell'asta fluviale principale in km e  $H$  altezza media del bacino rispetto alla sezione di chiusura espressa in metri. L'altezza media del bacino può essere stimata mediante un modello digitale del terreno.

Altre formule disponibili per la stima del tempo di corrivazione e ottenute su bacini aventi diverse caratteristiche fisiografiche sono quelle di Kirpich, Viparelli, Pezzoli, Aronica e Paltrinieri, Watt & Chow, Chow, NCRS-Lag method.

- **Kirpich**, analizzando sei piccoli bacini americani di area compresa tra 0.0051 e 0.433 Km<sup>2</sup>, ha ricavato la seguente relazione, successivamente corretta da Rowe e Thomas:

$$t_c = 0.000325 \left( \frac{L}{\sqrt{i_a}} \right)^{0.77}$$

in cui  $t_c$  è espresso in ore, e  $L$  è la lunghezza dell'asta principale, a partire dallo spartiacque, espressa in metri e  $i_a$  è la sua pendenza.

- **Viparelli** calcola il tempo di corrivazione  $t_c$  come il rapporto tra la lunghezza del percorso idraulicamente più lungo che deve seguire la particella d'acqua per raggiungere la sezione di chiusura e stabilire una velocità media di trasferimento  $V$  della particella nel suddetto percorso:

$$t_c = \frac{L}{V}$$

e suggerisce di utilizzare valori della velocità  $V$  caratteristica per correnti di piena variabili tra 1 e 1.3 m/s, specie per corsi d'acqua pedemontani.

- **Pezzoli** propone invece la seguente espressione del tempo di corrivazione, dedotta da misure su piccoli bacini piemontesi:

$$t_c = 0.055 \frac{L}{\sqrt{i_a}}$$

in cui  $t_c$  è espresso in ore,  $L$  è la lunghezza dell'asta principale espressa in Km e  $i_a$  è la pendenza media (m/m) dell'asta principale.

- Una formula analoga è quella di **Watt e Chow**, ottenuta utilizzando dati relativi a 44 bacini canadesi di area compresa tra 0.01 e 5840 Km<sup>2</sup> e caratterizzati da valori della pendenza  $i_a$  variabili tra 0.00121 e 0.0978:

$$t_L = a \left( \frac{L}{\sqrt{i_a}} \right)^b$$

in cui  $t_L$  è espresso in ore,  $L$  è la lunghezza dell'asta principale espressa in m, e le costanti  $a$  e  $b$  assumono rispettivamente il valore 0.000326 e 0.79.

- **Chow** ha proposto anche la stessa formula con i coefficienti  $a=0.00116$  e  $b=0.64$ , studiando venti piccoli bacini americani di superficie variabile tra  $0.0051$  e  $18.5$   $\text{Km}^2$ .
- la formula del **NCRS – Lag method** propone, per bacini con superficie compresa tra  $0.004$  e  $8.1$   $\text{km}^2$ :

$$t_c = \frac{l^{0.8} (S + 1)^{0.7}}{0.6 \cdot 1900 \sqrt{i_v}}$$

in cui  $t_c$  è espresso in ore,  $l$  è la lunghezza idraulica del bacino in piedi,  $S$  è la ritenzione potenziale espressa in mm e  $i_v$  è la pendenza media dei versanti in percentuale.

#### 4.6.2 Modelli matematici

La modellistica idrologica si prefigge di creare modelli matematici di tipo afflussi-deflussi, capaci di riprodurre l'andamento della portata in una o più sezioni del reticolo idrografico di un bacino, in funzione della distribuzione sia spaziale che temporale delle piogge. In letteratura sono descritti differenti tipi di modelli idrologici, che possono essere classificati in funzione della complessità della trattazione del problema (Maione, 1977). Tra questi, i più appropriati per gli scopi del presente studio sono i cosiddetti modelli di piena di tipo concettuale che utilizzano rappresentazioni semplificate dei processi fisici in gioco, che vengono comunque esplicitamente presi in considerazione. Inoltre, tali modelli incorporano parametri che sono fisicamente basati riducendo così l'arbitrarietà in fase di calibrazione del modello stesso. In particolare, essi rappresentano con semplicità le perdite, mentre cercano di descrivere in modo più dettagliato la trasformazione della pioggia netta in portata diretta. Quest'ultima viene assunta pari alla portata totale, poiché in eventi salienti di piena il deflusso di base è tipicamente trascurabile.

Possono essere sviluppati modelli aventi diversi gradi di complessità, da particolarmente semplici a molto dettagliati; tuttavia, per scopi di tipo ingegneristico, è consigliabile l'uso di modelli che rispondano ad alcune particolari esigenze, quali:

- la dipendenza da un numero limitato di parametri, che ne consenta il controllo in fase di calibrazione;
- la semplicità di schematizzazione dei processi fisici, che permetta un'agevole implementazione;
- la sensibilità sufficientemente limitata alla variabilità dei parametri stessi.



I **modelli semi-distribuiti** consentono di soddisfare l'esigenza di impiegare un numero limitato di parametri che ne permetta il controllo in fase di calibrazione e nello stesso tempo utilizzano l'informazione geomorfologica distribuita, la variabilità spaziale delle piogge e delle caratteristiche del suolo, che costituiscono gli aspetti fondamentali nell'analisi della risposta idrologica a scala di bacino. I modelli semi-distribuiti si possono, quindi, considerare come una valida alternativa sia ai modelli a parametri concentrati che incorporano un numero ridotto di parametri a scapito della descrizione dei processi fisici, sia ai modelli distribuiti che, pur effettuando una schematizzazione dettagliata dei fenomeni, restano vincolati a troppi parametri. La scelta è stata quindi dettata dalla necessità di utilizzare un numero limitato di parametri, da stimare attraverso pochi eventi di piena deducibili da bacini "simili" appartenenti alla stessa area geografica, e che sia in grado di fornire gli idrogrammi di piena in qualsiasi sezione del tratto fluviale investigato.

Nel presente studio è stato utilizzato un modello idrologico di tipo concettuale e semidistribuito, implementato mediante il software americano HEC-HMS (Figura 4-10).

La Figura 4-8 illustra in maniera schematica e concettuale gli elementi del modello e le loro connessioni per il j-esimo segmento fluviale.

Le caratteristiche morfometriche dei bacini per le analisi idrologiche sono state estratte dal DEM costruito a partire dalla cartografia numerica CTR in scala 1:10000 (Figura 4-9).

Il modello idrologico scelto è in sintesi un **modello di simulazione dell'evento critico** avente le seguenti caratteristiche:

- dati di pioggia da LSPP Regione Toscana (agg. dati 2012);
- durata critica assunta in prima istanza pari al tempo di corrivazione e infine determinata con procedimento iterativo in modo da massimizzare il valore della portata al colmo;
- riduzione del tasso di pioggia in base alla superficie del bacino sotteso e della durata dello scroscio secondo la formulazione di Raudkivi (1970) modificata;
- ietogramma costante;
- stima dell'infiltrazione mediante metodo SCS-CN assumendo il valore CN (II) relativo allo stato iniziale di bacino mediamente imbibito;
- trasformazione afflussi deflussi basata sull'IUH del SCS per i sottobacini (con tempo di ritardo valutato a partire dal tempo di corrivazione) e sul metodo dell'onda cinematica per gli interbacini.

È opportuno sottolineare che tramite il predetto modello idrologico ed in particolare tramite lo strumento "Reservoir" presente nel software Hec-Hms, è stato altresì possibile stimare la laminazione del colmo di piena determinata dalle bocche tarate presenti sul botro Secco e botro Crocetta previo inserimento dei dati relativi alla curva quota-volumi invasati, al culvert costituente la bocca tarata, la geometria della gaveta soprastante e del rilevato arginale.

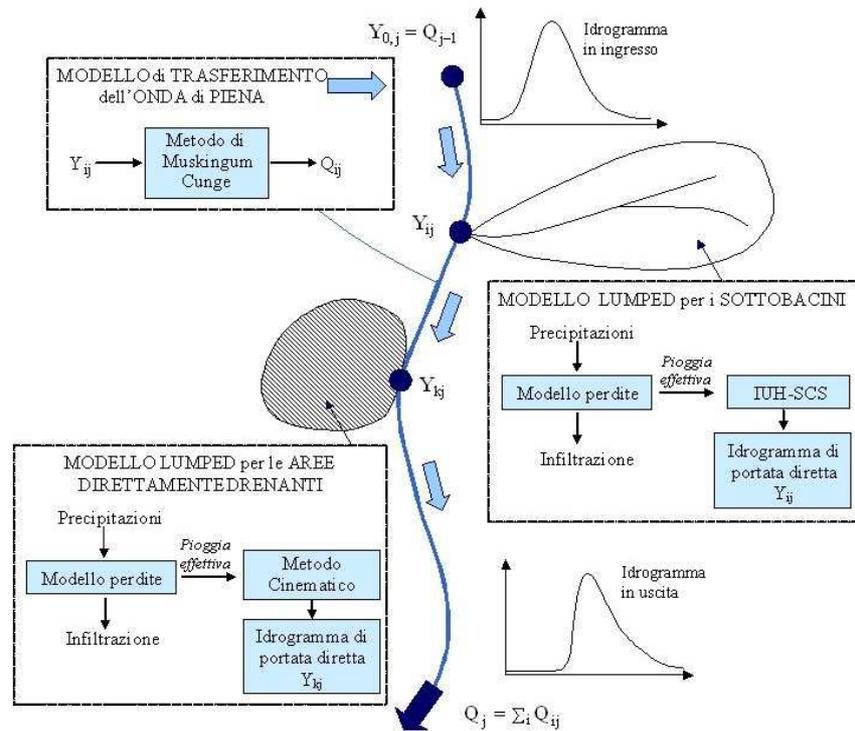


Figura 4-8: Diagramma schematico degli elementi del modello idrologico e delle loro connessioni.

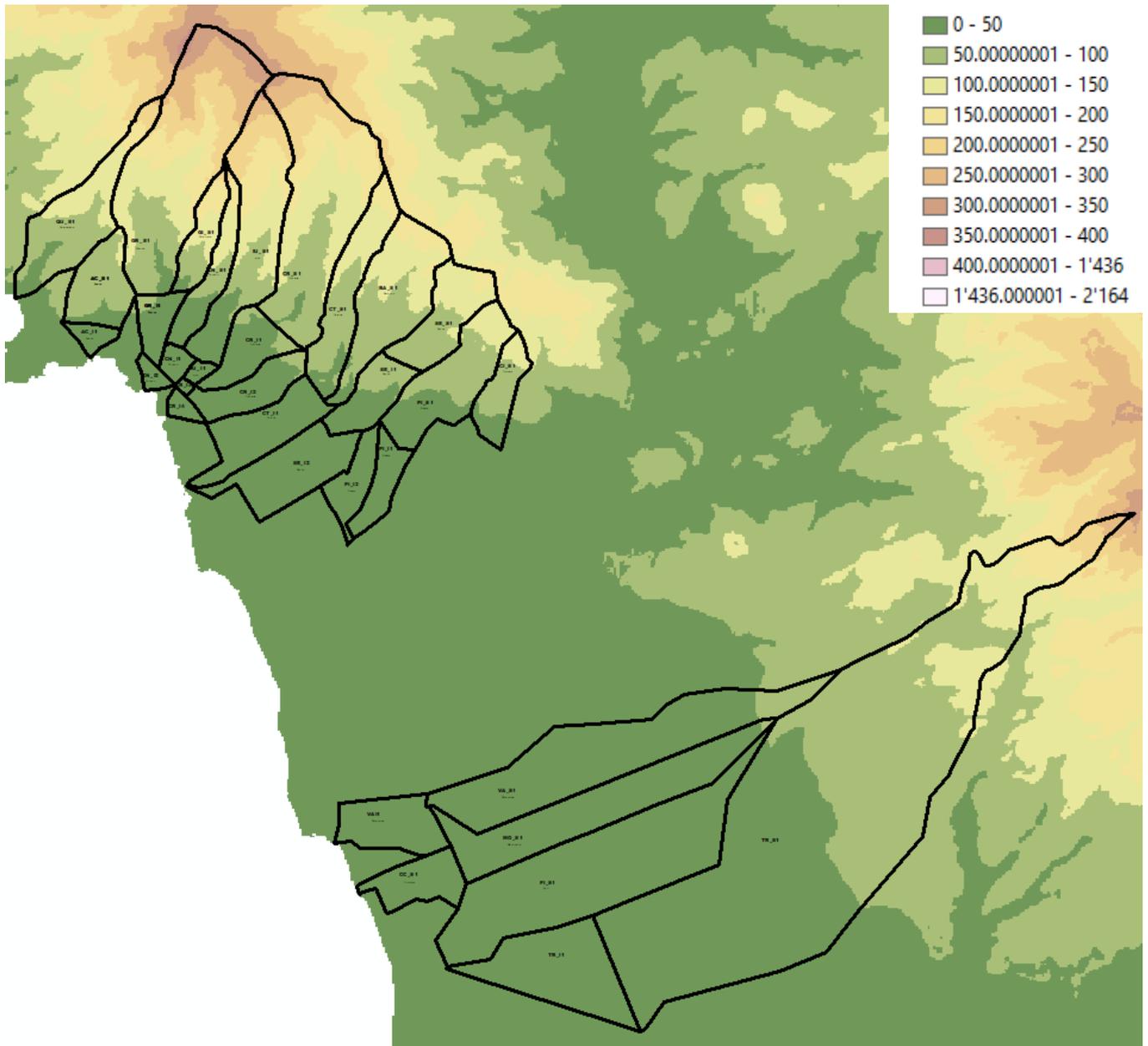


Figura 4-9: Morfologia del territorio di interesse.

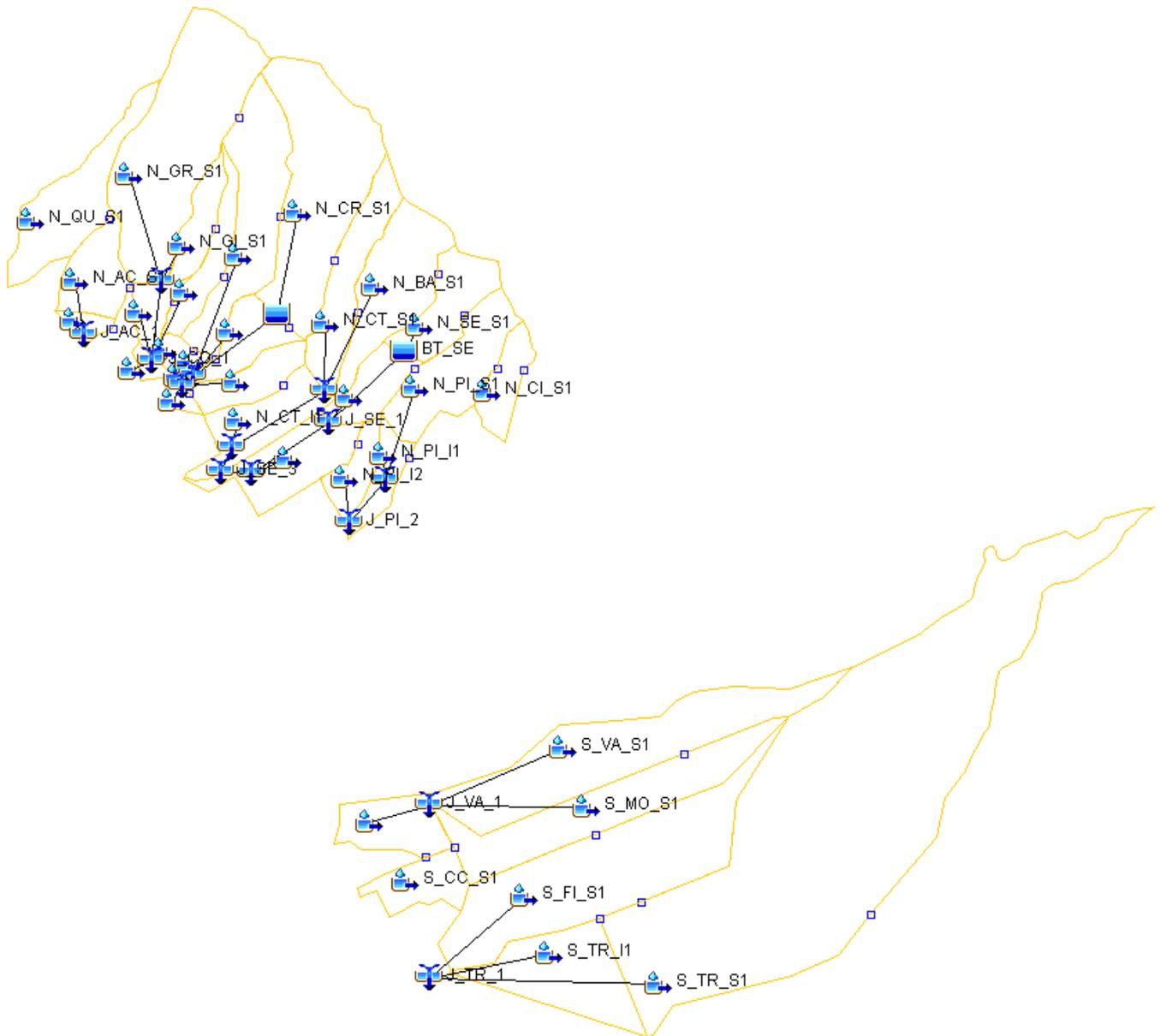


Figura 4-10: Modello idrologico semidistribuito implementato mediante il software HEC-HMS.

Per ciascun sottobacino, in Tabella 4-3 sono riportati i valori dei parametri caratteristici per il calcolo del tempo di corrivazione  $t_c$ : area del bacino  $S$ , lunghezza dell'asta principale  $L$ ,  $L_b$  lunghezza idraulica del bacino,  $h_m$  altezza media su sezione di chiusura del bacino,  $H_{max}$  quota massima del bacino,  $H_{min}$  quota minima del bacino,  $CN(II)$ ,  $i_v$  pendenza media dei versanti,  $i$  pendenza media<sup>4</sup> dell'asta principale, ritenzione potenziale.

<sup>4</sup> Calcolata come media armonica delle radici delle pendenze medie dei sottotratti che la compongono, pesate per la lunghezza dei rispettivi sottotratti. (vedi Da Deppo, Datei, Salandin *Sistemazione dei corsi d'acqua Quarta edizione*, Libreria Internazionale Cortina, Padova, 2002, pag 178) La media armonica è l'inverso della media aritmetica degli inversi:

Tabella 4-4 per ciascun sottobacino è indicato il valore del tempo di corrivazione  $t_c$  stimato con varie formulazioni disponibili in letteratura e precedentemente descritte, il valore medio e il tempo di ritardo  $T_r$  (il cosiddetto "Lag").

Tabella 4-3: parametri caratteristici per il calcolo del tempo di corrivazione

bacino	S	L	L <sub>b</sub>	h <sub>m</sub>	Hmax	Hmin	CN (III)	i <sub>v</sub>	i	S
	[Km <sup>2</sup> ]	[Km]	[Km]	[m]	[ms.l.m.]	[ms.l.m.]	[-]	[%]	[%]	[mm]
AC_S1	0.56	0.00	0.15	46.63	112.00	25.00	91.46	0.09	0.00	2.31
QU_S1	1.04	2.96	3.13	101.94	276.80	0.00	83.87	0.13	0.07	4.76
GR_S1	2.52	3.40	3.47	154.55	375.30	27.00	79.00	0.21	0.08	6.58
GI_S1	0.39	1.54	1.77	96.98	251.50	27.00	80.18	0.16	0.12	6.12
CN_S1	0.47	1.93	2.49	74.94	251.50	15.00	83.70	0.11	0.07	4.82
IU_I1	1.43	3.24	3.43	118.99	315.00	15.00	85.50	0.15	0.07	4.20
CR_S1	2.25	3.32	3.69	110.21	316.00	36.00	85.26	0.17	0.01	4.28
CT_S1	0.85	2.44	2.84	67.88	215.30	31.00	89.79	0.09	0.04	2.82
BA_S1	1.16	2.48	2.70	74.11	180.10	31.00	88.18	0.11	0.04	3.32
SE_S1	0.68	1.28	1.45	54.68	160.00	52.00	89.22	0.09	0.06	2.99
PI_S1	1.00	2.01	2.14	37.22	149.50	32.00	90.63	0.07	0.03	2.56
TR_S1	9.59	8.92	9.26	54.43	325.00	7.50	91.50	0.03	0.01	2.30

Tabella 4-4: indicazione per ciascun sottobacino del tempo di corrivazione calcolato con le predette formule, di quello medio nonché del tempo di ritardo  $T_r$

bacino	$t_c$ [ore]							$T_r$ [min]
	Kirpich	Vipparelli	Pezzoli	Watt	Chow	NCRS	$t_{cmed}$	
AC_S1		0.33	0.21	0.37	0.38	0.50	0.36	12.86
QU_S1		0.87	0.60	0.84	0.74	1.34	0.88	31.62
GR_S1		0.96	0.66	0.91	0.79	1.40	0.94	33.97
GI_S1	0.23	0.49	0.24	0.41	0.42	0.90	0.45	16.17
CN_S1	0.38	0.69	0.41	0.63	0.58	1.24	0.66	23.62
IU_I1		0.95	0.69	0.94	0.81	1.25	0.93	33.46
CR_S1		1.02	1.82	2.02	1.51	1.27	1.53	55.01
CT_S1		0.79	0.64	0.89	0.78	1.09	0.84	30.20
BA_S1		0.75	0.72	0.97	0.83	1.06	0.87	31.22
SE_S1		0.40	0.30	0.49	0.48	0.69	0.47	16.94
PI_S1		0.59	0.59	0.83	0.74	0.99	0.75	27.01
TR_S1			4.22	3.93				147

Per ciascun interbacino, in Tabella 4-5 sono riportati i valori dei parametri caratteristici per l'applicazione del modello Kinematic Wave (onda cinematica) accoppiato al modello di propagazione di Muskingum- Cunge: la superficie ideale rettangolare inclinata è definita dai parametri Area (A), lunghezza (L), scabrezza (R) e pendenza (i); il deflusso nel canale (channel flow) da lunghezza (l) e pendenza (i<sub>c</sub>) del corso d'acqua,

$$i^{0.5} = \frac{\sum_j L_j}{\sum_j L_j \cdot i_j^{-0.5}}$$



larghezza al fondo ( $b$ ) e pendenza delle sponde ( $i_s$ ) della sezione trasversale, scabrezza di Manning ( $n$ ).

Tabella 4-5: grandezze per la caratterizzazione del modello Kinematic Wave

bacino	L	i	R	A	l	$i_c$	n	b	$i_s$
	[m]	[m/m]	$m^{-1/3}s$	[Km <sup>2</sup> ]	[m]	[-]	$m^{-1/3}s$	[m]	[m/m]
AC_I1SX	77.05	0.06	0.10	0.04	441.42	0.07	0.03	3.00	0.01
AC_I1DX	141.55	0.09	0.10	0.09	441.42	0.07	0.03	3.00	0.01
GC_I1SX	83.51	0.04	0.10	0.11	1009.33	0.02	0.03	3.70	1.00
GC_I1DX	116.27	0.10	0.10	0.16	1009.33	0.02	0.03	3.70	1.00
CN_I1SX	105.78	0.03	0.10	0.09	347.50	0.03	0.03	3.00	1.30
CN_I1DX	43.07	0.03	0.10	0.02	347.50	0.03	0.03	3.00	1.30
CN_I2SX	121.83	0.04	0.10	0.04	299.35	0.01	0.03	4.90	1.10
CN_I2DX	105.07	0.03	0.10	0.05	299.35	0.01	0.03	4.90	1.10
IU_I1SX	36.12	0.03	0.20	0.02	300.00	0.02	0.03	3.30	0.85
IU_I1DX	93.51	0.03	0.10	0.04	300.00	0.02	0.03	3.30	0.85
CR_I1SX	138.92	0.07	0.20	0.24	1354.90	0.02	0.03	3.50	1.30
CR_I1DX	102.92	0.07	0.15	0.23	1354.90	0.02	0.03	3.50	1.30
CR_I2	646.49	0.04	0.15	0.48	352.37	0.002	0.03	4.00	1.00
CR_I3	95.52	0.02	0.10	0.02	194.62	0.01	0.03	4.30	1.37
CR_I4SX	111.07	0.02	0.10	0.06	340.50	0.01	0.03	8.20	0.01
CR_I4DX	124.54	0.02	0.10	0.03	340.50	0.01	0.03	8.20	0.01
CT_I1SX	97.19	0.03	0.10	0.21	1366.46	0.02	0.04	3.00	0.13
CT_I1DX	120.57	0.03	0.10	0.52	1366.46	0.02	0.04	3.00	0.13
SE_I1SX	281.62	0.05	0.15	0.15	1200.69	0.02	0.04	2.70	0.96
SE_I1DX	197.46	0.05	0.15	0.30	1200.69	0.02	0.04	2.70	0.96
SE_I2SX	193.10	0.02	0.10	0.65	1355.06	0.02	0.04	2.40	0.93
SE_I2DX	91.82	0.02	0.10	0.18	1355.06	0.02	0.04	2.40	0.93
PI_I1SX	255.69	0.02	0.15	0.21	1126.00	0.02	0.03	1.30	1.14
PI_I1DX	289.11	0.02	0.20	0.12	1126.00	0.02	0.03	1.30	1.14
PI_I2	539.41	0.02	0.15	0.35	275.15	0.01	0.03	1.70	0.88
VA_S1SX	1750.00	0.04	0.30	1.74	2103.58	0.01	0.03	1.10	1.16
VA_S1DX	255.00	0.04	0.30	0.64	2103.58	0.01	0.03	1.10	1.16
VA_I1SX	500.00	0.05	0.20	0.46	1193.85	0.002	0.03	1.40	1.32
VA_I1DX	485.00	0.05	0.20	0.15	1193.85	0.002	0.03	1.40	1.32
MO_I1SX	1350.00	0.05	0.30	1.10	1791.77	0.004	0.03	1.40	1.00
MO_I1DX	220.00	0.05	0.30	0.52	1791.77	0.004	0.03	1.40	1.00
FI_S1SX	1050.00	0.05	0.30	1.59	1658.93	0.005	0.03	1.00	1.30
FI_S1DX	480.00	0.05	0.30	1.25	1658.93	0.005	0.03	1.00	1.30
Tr_I1	345.00	0.012	0.10	1.222	1124.02	0.002	0.03	1.00	1.00



## 5 Risultati dell'analisi idrologica

La procedura descritta ha permesso di ricavare, per ogni corso d'acqua analizzato, nelle sezioni di chiusura di interesse ed al variare del tempo di ritorno, le portate di progetto riassunte in Tabella 5-1 e Tabella 5-2.

Le tabelle mostrano inoltre le diverse durate critiche, ottenute mediante la procedura precedentemente descritta.

Tabella 5-1: portate di picco di progetto per tempo di ritorno TR = 30 anni ricavate dall'analisi idrologica

N°	Nome	Codice	Sezione chiusura HMS	S (kmq)	Q picco (mc/s) - TR30								
					0.5h	1h	1.5h	2h	3h	4h	6h	8h	12h
1	Botro Quercetano	QU	N_QU_S1	1.04	7.76	9.14	8.85	8.17	6.82	5.82	4.54	3.78	2.89
2	Botro delle Acacie	AC	N_AC_S1	0.56	11.22	8.73	6.91	5.74	4.37	3.59	2.71	2.22	1.66
3	Botro Grande	GR	J_GR_1	2.91	14.63	19.31	20.01	19.26	16.79	14.64	11.68	9.83	7.62
4	Botro dei Condotti	CO	J_CO_1	3.85	20.3	27.09	28.58	27.31	23.52	20.31	16.02	13.42	10.33
5	Botro Crocetta	CR	N_CR_S1	2.25	11.27	14.63	15.61	15.41	13.92	12.3	9.83	8.22	6.31
6	Botro Crocetta	CR	J_CR_1	4.21	19.49	24.13	26.41	26.4	24.48	22.28	18.37	15.5	11.89
7	Botro Crocetta	CR	J_CR_2	4.8	23.81	31.74	33.51	32.4	29.16	26.11	21.26	17.85	13.66
8	Botro Secco	SE	N_SE_S1	0.68	10.77	9.44	7.82	6.62	5.12	4.23	3.21	2.64	1.99
9	Fosso Cotone	CT	J_CT_2	2.74	29.56	32.08	29.38	25.94	20.59	17.1	13.02	10.69	8.06
10	Botro Secco	SE	J_SE_1	1.14	13.42	15.15	13.23	11.26	8.69	7.15	5.34	4.44	3.36
11	Botro Secco	SE	J_SE_2	1.97	29.26	28.26	23.85	20.07	15.35	12.58	9.43	7.78	5.86
12	Botro Secco	SE	J_SE_3	4.71	58.82	60.34	53.11	46.01	35.93	29.68	22.44	18.47	13.92
13	Fosso Pisano (dei Morti)	PI	N_PI_S1	1	12.57	12.63	11.12	9.67	7.59	6.29	4.77	3.92	2.95
14	Fosso Pisano (dei Morti)	PI	J_PI_1	1.33	16.32	17.1	15.1	13.05	10.2	8.43	6.39	5.24	3.94
15	Fosso "del cimitero" (TC3120)	CI	N_CI_S1	0.4	6.88	5.79	4.69	3.95	3.04	2.51	1.9	1.56	1.17
16	Fosso della Vallecorsa	VA	S_VA_S1	2.39	9.13	12.43	12.1	11.78	11.87	12.32	10.7	8.79	6.6
17	Fosso Mozzicone	MO	S_MO_S1	1.62	8.4	10.47	9.95	9.7	9.82	9.59	7.33	5.99	4.48
18	Fosso della Vallecorsa	VA	J_VA_1	4.63	21.97	29.4	28.86	27.28	26.14	25.53	20.81	17.04	12.78
19	Fosso dei Fichi	FI	S_FI_S1	2.85	11.19	16.98	20.72	20.88	20.29	17.09	12.93	10.55	7.9
20	Fosso Tripesce	TR	J_TR_1	13.67	31.6	39.9	44.8	48.3	55.4	58	54.3	47.6	37.1
21	Fosso Tripesce	TR	S_TR_S1	9.59	26	33.4	37.8	40.6	42.8	42	37.6	33	25.8
	Bacini NORD												
	Bacini SUD												

Tabella 5-2: portate di picco di progetto per tempo di ritorno TR = 200 anni ricavate dall'analisi idrologica

N°	Nome	Codice	Sezione chiusura HMS	S (kmq)	Q picco (mc/s) - TR200								
					0.5h	1h	1.5h	2h	3h	4h	6h	8h	12h
1	Botro Quercetano	QU	N_QU_S1	1.04	12.68	15.16	14.64	13.47	11.25	9.63	7.6	6.37	4.96
2	Botro delle Acacie	AC	N_AC_S1	0.56	16.22	12.89	10.3	8.65	6.71	5.59	4.31	3.58	2.75
3	Botro Grande	GR	J_GR_1	2.91	25.85	34.29	35.3	33.67	29.1	25.33	20.3	17.17	13.47
4	Botro dei Condotti	CO	J_CO_1	3.85	33.98	46.38	48.83	46.57	39.82	34.4	27.37	23.06	18.03
5	Botro Crocetta	CR	N_CR_S1	2.25	18.21	24.26	25.98	25.66	23.16	20.47	16.43	13.83	10.77
6	Botro Crocetta	CR	J_CR_1	4.21	28.57	37.48	40.1	43.48	43.81	38.8	30.95	25.9	20.14
7	Botro Crocetta	CR	J_CR_2	4.8	37.49	50.48	51.01	49.12	50.94	44.71	35.51	29.67	23.06
8	Botro Secco	SE	N_SE_S1	0.68	16.16	14.38	11.95	10.19	7.99	6.69	5.18	4.31	3.32
9	Fosso Cotone	CT	J_CT_2	2.74	42.74	48.93	45.14	40.15	32.1	26.97	20.9	17.4	13.41
10	Botro Secco	SE	J_SE_1	1.14	23.33	24.22	20.27	17.26	13.49	11.28	8.72	7.25	5.57
11	Botro Secco	SE	J_SE_2	1.97	47.07	44.07	36	30.33	23.59	19.67	15.17	12.59	9.67
12	Botro Secco	SE	J_SE_3	4.71	89.47	92.62	81.14	70.48	55.67	46.62	36.07	29.99	23.08
13	Fosso Pisano (dei Morti)	PI	N_PI_S1	1	18.74	19.2	17.02	14.88	11.8	9.88	7.65	6.36	4.9
14	Fosso Pisano (dei Morti)	PI	J_PI_1	1.33	24.52	25.94	22.96	19.99	15.78	13.2	10.2	8.48	6.53
15	Fosso "del cimitero" (TC3120)	CI	N_CI_S1	0.4	10.28	8.72	7.13	6.05	4.72	3.95	3.05	2.54	1.96
16	Fosso della Vallecorsa	VA	S_VA_S1	2.39	17.14	21.51	21.18	21.59	23.41	22.27	17.23	14.28	10.93
17	Fosso Mozzicone	MO	S_MO_S1	1.62	15.28	17.61	17.38	17.8	18.12	15.22	11.71	9.7	7.42
18	Fosso della Vallecorsa	VA	J_VA_1	4.63	41.16	51.49	49.11	48.29	48.31	43.29	33.4	27.68	21.18
19	Fosso dei Fichi	FI	S_FI_S1	2.85	21.22	34.06	37.54	37.7	32.24	26.86	20.63	17.07	13.05
20	Fosso Tripesce	TR	J_TR_1	13.67	49.9	65.1	71.6	79.1	90.2	95.5	89.4	78.7	61.9
21	Fosso Tripesce	TR	S_TR_S1	9.59	38.8	51.9	60	65.2	69.6	68.7	62.1	54.7	43.3
	Bacini NORD												
	Bacini SUD												



## 6 Analisi idraulica

### 6.1 Il modello numerico di simulazione idraulica

Come già anticipato, il presente studio idrologico - idraulico persegue l'obiettivo di individuare allo stato attuale i potenziali fronti di esondazione che potrebbero interessare le previsioni urbanistiche.

Le modalità di allagamento delle aree golenali di un corso d'acqua possono risultare molto differenti da caso a caso. Un allagamento può, infatti, verificarsi per libera espansione nelle golene non protette da difese spondali o per tracimazione degli argini o dei muri di sponda. Il volume esondato può, a sua volta, accumularsi in una determinata area oppure può trasferirsi più a valle, allagando, magari, un territorio non interessato da un fronte di esondazione diretto.

Per definire le modalità di allagamento si sono preliminarmente individuati le potenziali aree di trasferimento e i possibili fronti di esondazione. L'indagine morfologica e topografica su tali aree è stata condotta sulla scorta delle seguenti fonti:

- analisi della cartografia CTR in scala 1:10000 e 1:2000;
- sopralluoghi e riprese fotografiche;
- modello Digitale del Terreno (DTM) derivato dal rilievo realizzato con laser altimetro aviotrasportato;
- rilievi di dettaglio effettuati con strumentazione GPS o stazione totale.

Occorre precisare che in caso di sormonto arginale qualunque programma di simulazione numerica del tipo monodimensionale gestisce il fenomeno estendendo orizzontalmente ed istantaneamente il pelo libero fino all'estremo della sezione posto sul medesimo lato e procede poi nelle iterazioni calcolando tutte le grandezze idrauliche di interesse (area bagnata, perimetro bagnato ecc..) in funzione della quota e dell'estensione del suddetto pelo libero (vedasi caso b) di Figura 6-1): in tal caso l'area golenale risulta partecipe del moto.

Può però accadere che la propagazione dell'onda di piena nell'area golenale, avvenga con un tirante idraulico variabile nel tempo ma indipendente da quello simultaneo nella sezione più prossima dell'alveo principale (vedi caso c) di Figura 6-1). Anche in questo caso il programma di simulazione numerica gestirebbe il fenomeno estendendo orizzontalmente ed istantaneamente il pelo libero sovrastimando così sia il battente che l'estensione delle aree allagate golenali.

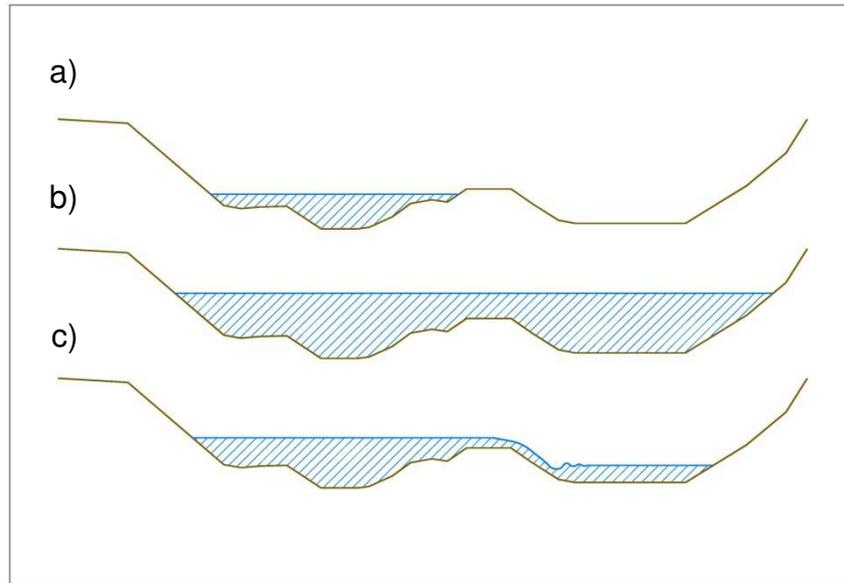


Figura 6-1: schematizzazione del moto nelle golene nei modelli monodimensionali

Per meglio approssimare quest'ultimo fenomeno si è utilizzato l'artificio "Levee"<sup>5</sup> associato agli elementi "Lateral structures".

Così facendo, il campo di moto è stato limitato all'alveo inciso del torrente principale mentre i relativi volumi esondati che si propagano nelle aree golenali circostanti sono stati stimati con lo strumento "Lateral structure".

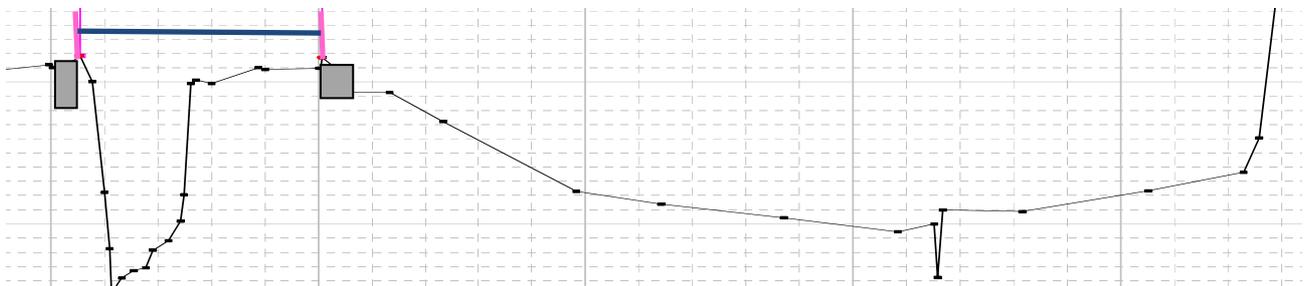


Figura 6-2: schema del modello di calcolo adottato per descrivere il fenomeno di sormonto arginale.

Pertanto per descrivere compiutamente il fenomeno è stato allestito un modello matematico monodimensionale implementato mediante il software Hec-Ras<sup>6</sup> (rel.4.1.0) per la propagazione dell'onda di piena nell'alveo e la determinazione dei volumi esondati. In caso di esondazione, al fine di individuare e perimetrare le aree allagabili è stato allestito un modello puramente bidimensionale con il software FLO-2D ver. Pro.

<sup>5</sup> In Hec-Ras lo strumento "levee" (argine) consente l'introduzione di un limite laterale all'estensione della sezione di deflusso occupata dalla corrente unidirezionale. Senza tale limite aree, perimetri bagnati, raggi idraulici e velocità medie risulterebbero notevolmente falsati.

<sup>6</sup> Hydrologic Engineering Center – River Analysis System – US Army Corps of Engineers, Davis CA, 2005.



## 6.2 Principi teorici della modellazione numerica

Si omette in questa sede l'illustrazione dei principi teorici sui quali si basa la soluzione numerica delle equazioni di moto e di continuità che regolano il processo di moto permanente e di moto vario, in quanto una esaustiva trattazione degli stessi argomenti è liberamente disponibile in rete all'indirizzo <http://www.hec.usace.army.mil>.

Pertanto, per ogni dettaglio riguardante il Package Hec-Ras rel.4.1.0 si rimanda alle due pubblicazioni "Hydraulic Reference Manual" e "User's Manual".

### 6.2.1 Assegnazione dei parametri di scabrezza

Per quanto riguarda le scabrezze medie attribuibili al corso d'acqua, rimandando all'Appendice 1 per i dettagli relativi a ciascun corso d'acqua, si sono assunti valori medi del coefficiente  $n$  di Manning rappresentativi della regolarità dei corsi d'acqua e della presenza di vegetazione, coerentemente ai normali valori proposti in letteratura<sup>7</sup>:

- $0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  corrisponde a :*"terra con erba sul fondo. Corsi d'acqua naturali regolari"*.
- $0.030 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  corrisponde a :*"terra in cattive condizioni. Corsi d'acqua naturali con ciottoli e ghiaia"*.
- $0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  corrisponde a :*"Canali in abbandono con grande vegetazione"*

Analogamente, per quanto riguarda la scabrezza extra-alveo da utilizzare per la modellazione idraulica bidimensionale del cosiddetto "overland flow", si è fatto riferimento alla tabella seguente, sempre tratta dalla letteratura di settore.

In particolare, è stata adottata una scabrezza di Manning pari a  $0.1 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  nelle aree urbanizzate (modello Nord) e  $0.2 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  nelle aree prevalentemente agricole (modello Sud).

<sup>7</sup> Manuale di Ingegneria Civile - Volume I .Ed.Zanichelli/Esac.

Tabella 6-1: valori di scabrezza al variare del tipo di copertura per "overland flow"

Table 1. Overland Flow Manning's n Roughness Values <sup>1</sup>	
Surface	n-value
Dense turf	0.17 - 0.80
Bermuda and dense grass, dense vegetation	0.17 - 0.48
Shrubs and forest litter, pasture	0.30 - 0.40
Average grass cover	0.20 - 0.40
Poor grass cover on rough surface	0.20 - 0.30
Short prairie grass	0.10 - 0.20
Sparse vegetation	0.05 - 0.13
Sparse rangeland with debris	
0% cover	0.09 - 0.34
20 % cover	0.05 - 0.25
Plowed or tilled fields	
Fallow - no residue	0.008 - 0.012
Conventional tillage	0.06 - 0.22
Chisel plow	0.06 - 0.16
Fall disking	0.30 - 0.50
No till - no residue	0.04 - 0.10
No till (20 - 40% residue cover)	0.07 - 0.17
No till (60 - 100% residue cover)	0.17 - 0.47
Open ground with debris	0.10 - 0.20
Shallow glow on asphalt or concrete (0.25" to 1.0")	0.10 - 0.15
Fallow fields	0.08 - 0.12
Open ground, no debris	0.04 - 0.10
Asphalt or concrete	0.02 - 0.05

<sup>1</sup>Adapted from COE, HEC-1 Manual, 1990 and the COE, Technical Engineering and Design Guide, No. 19, 1997 with modifications.

### 6.2.2 Condizioni al contorno

Per svolgere la simulazione e calcolare il livello del pelo libero in una data sezione, è necessario conoscere la medesima grandezza in una sezione prossima a questa, a monte o a valle a seconda del regime di corrente.

Il programma provvede automaticamente al riconoscimento per tratti del regime di corrente che si può effettivamente instaurare per la portata assegnata e, se in un tratto la corrente ad esempio è veloce, esso adotterà quale altezza di riferimento quella fornita in input per l'estremo di monte; viceversa, se la corrente del tratto è lenta, quale altezza di controllo sarà adottata quella fornita in input per la sezione terminale di valle. Nei tratti intermedi il programma adotta analoghi criteri ed è in grado di processare situazioni in cui i due regimi si susseguono in qualsiasi ordine.



Per effettuare la simulazione è quindi necessario imporre delle condizioni al contorno a monte e a valle dei tratti in esame. Com'è noto questa condizione può essere imposta in vari modi: livello idrico noto, altezza critica, altezza di moto uniforme, scala di deflusso.

A questo proposito va tuttavia osservato che il metodo d'integrazione numerica adottato dal software ("Standard step method") è intrinsecamente autoregolante, ovvero, dopo pochi step spaziali (sezioni), l'altezza della corrente risulta invariante rispetto alla condizione al contorno adottata. Per questo motivo, eventuali imprecisioni nella valutazione delle altezze di controllo diventano inessenziali se si dispone di un numero di sezioni in eccesso rispetto a quelle strettamente occorrenti per l'estensione del tratto da indagare.

Trattandosi di analisi in regime di moto vario, quale condizioni al contorno di monte sono stati assunti gli idrogrammi di piena per la condizione di valle, invece, si è generalmente optato per l'altezza di moto uniforme. Per il fosso vallecorsa e il fosso tripesce si è assunto a livello medio del mare pari a 1.5 m desunto dalla pubblicazione *"Studio e ricerca per l'implementazione del quadro conoscitivo della costa toscana nell'ambito del Piano Regionale di Gestione integrata della Costa"*.

In particolare la condizione al contorno di moto uniforme è stata assunta dagli scriventi per i seguenti corsi d'acqua con recapito a mare: botro Quercetano, borro delle Acacie, botro Iurco, botro Cotone, botro Grande.

Al fine di valutare la cautelatività o meno della condizione di moto uniforme rispetto all'alternativa condizione al contorno che si avrebbe imponendo al livello del mare la quota di 1.5 m.s.l.m., sono state effettuate simulazione numeriche per l'evento duecentennale confrontando l'influenza sui risultati delle predette condizioni al contorno di valle.

Nelle immagini che seguono sono mostrati in blu il profilo del pelo libero relativo alla condizione al contorno di moto uniforme e in rosso quello relativo alla condizione di livello medio del mari pari a 1.5 m, come si evince dalle figure sottoriportare l'influenza delle consizioni al controno di valle è sempre limitata al tratto terminale dei corsi d'acqua prima dell'immissioni in mare.

Per i botri Iurco, Grande e Quercetano l'adozione della condizione di moto uniforme quale condizione al controno di valle risulta essere più cautelativa rispetto a quella che si ha imponendo una quota media livello del mare la quota di 1.5 m.s.l.m.

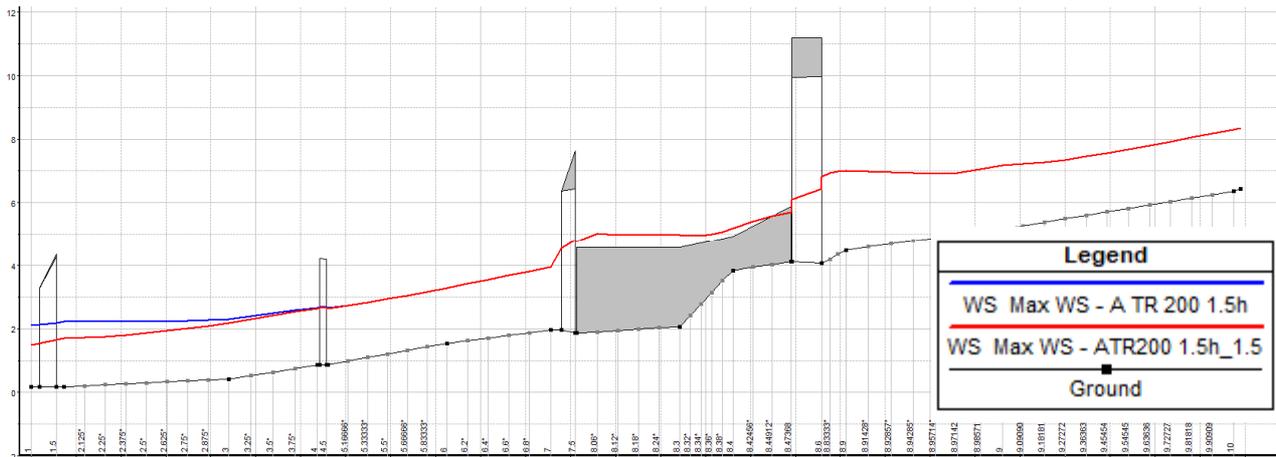


Figura 6-3: botro lurco In blu il profilo del pelo libero relativo alla condizione al contorno di moto uniforme; in rosso quello relativo alla condizione al contorno corrispondente ad un livello medio del mare pari a 1.5 m.

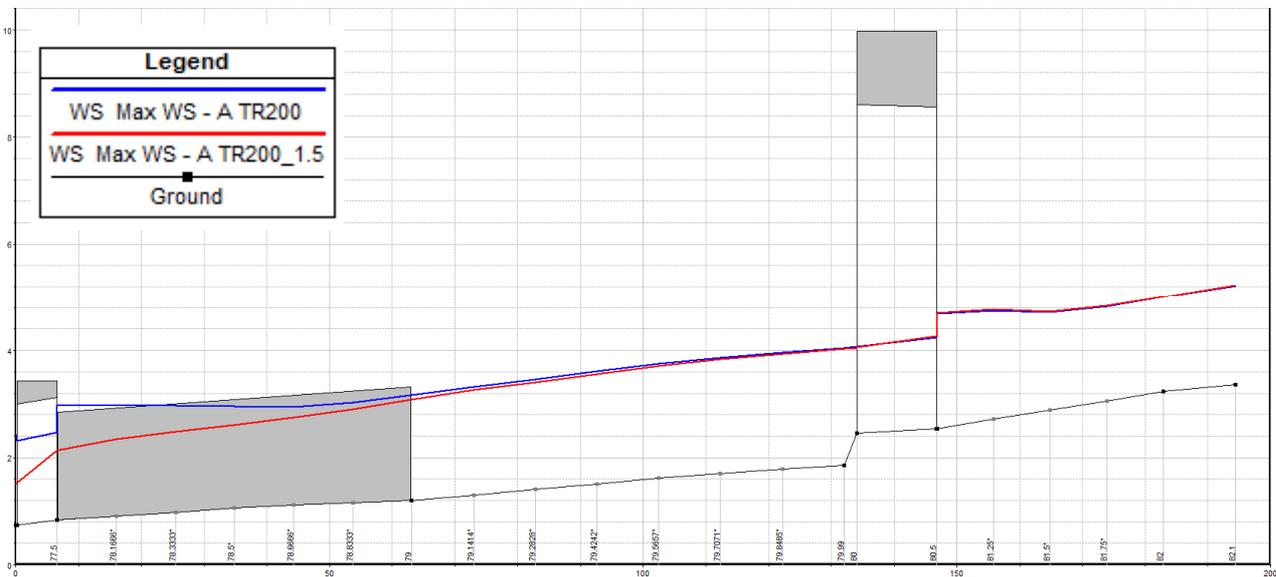


Figura 6-4 botro Grande, in blu il profilo del pelo libero relativo alla condizione al contorno di moto uniforme, in rosso quello relativo alla condizione al contorno corrispondente ad un livello medio del mare pari a 1.5 m.

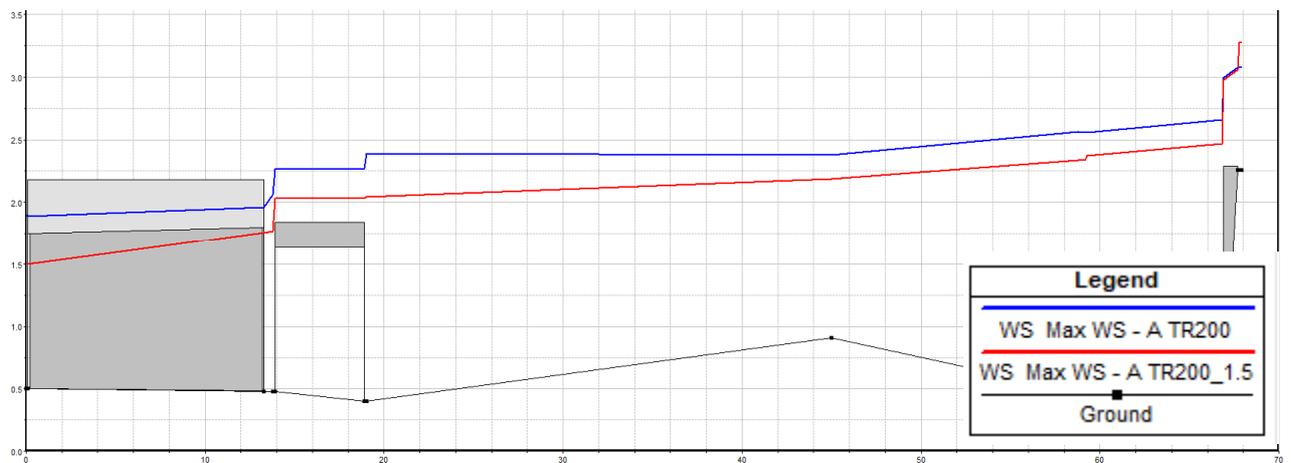


Figura 6-5: botro Quercetano In blu il profilo del pelo libero relativo alla condizione al contorno di moto uniforme, in rosso quello relativo alla condizione al contorno corrispondente ad un livello medio del mare pari a 1.5 m.

Per i botri Acacie e Cotone l'adozione di una quota media del livello del mare pari 1.5 m.s.l.m determina un incremento del pelo libero esclusivamente nel tratto terminale dei

predetti corsi d'acqua (ultimi 50 m circa). Tuttavia è opportuno precisare che ciò non ha alcuna influenza sulla pericolosità idraulica dato che il botro Cotone non esonda in tale tratto mentre nel botro delle Acacie il predetto incremento del pelo libero si verifica nel tratto a valle della viabilità di lungomare.

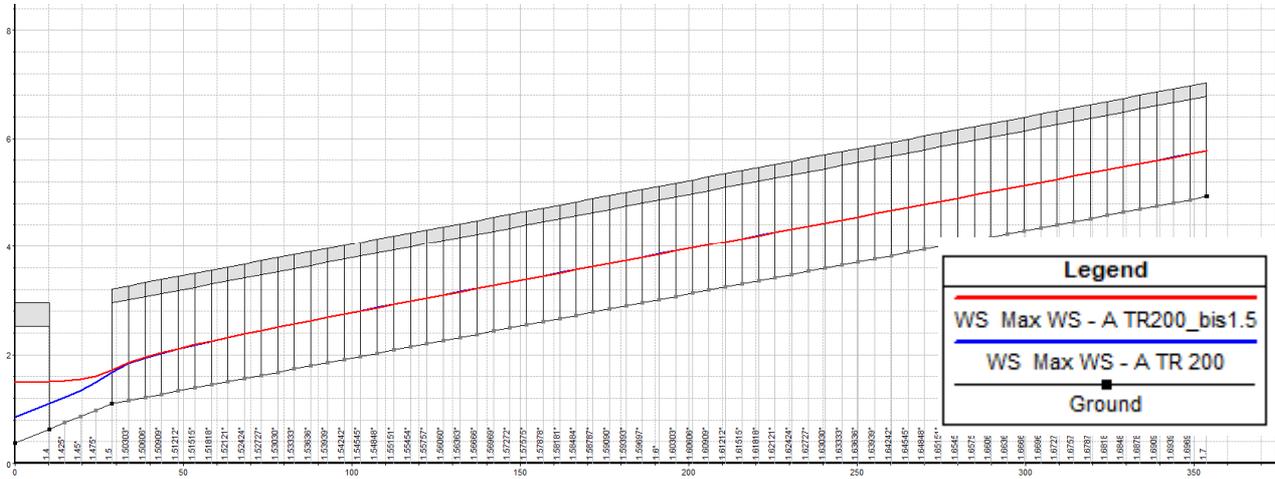


Figura 6-6: botro Cotone In blu il profilo del pelo libero relativo alla condizione al contorno di moto uniforme; in rosso quello relativo alla condizione al contorno di livello medio del mare pari a 1.5 m.

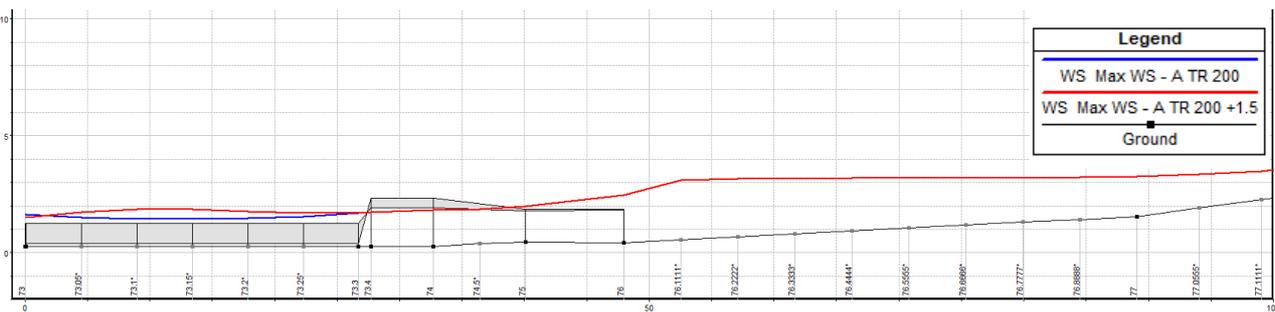


Figura 6-7: botro delle Acacie In blu il profilo del pelo libero relativo alla condizione al contorno di moto uniforme, in rosso quello relativo alla condizione al contorno corrispondente ad un livello medio del mare pari a 1.5 m.

### 6.2.3 Taratura dei principali parametri inerenti l'implementazione del modello numerico in regime di moto vario

Il corretto impiego del software Hec-Ras in regime di moto vario richiede un'adeguata comprensione delle equazioni che reggono il processo al fine di conseguire una giusta messa a punto dei parametri di calcolo del modello, così da raggiungere un buon compromesso tra stabilità ed accuratezza della soluzione.

Uno dei parametri più critici nella taratura del modello è costituito dal passo temporale di calcolo. Si può ottenere una buona stabilità ed accuratezza del modello selezionando un valore dell'intervallo di calcolo che rispetti la condizione di Levi Courant. In alternativa può essere usato un altro criterio indicato dagli autori come più speditivo  $\Delta t \leq T_r / 20$ , in cui  $T_r$  rappresenta la durata del ramo crescente dell'idrogramma di piena.

Come però segnalato nel manuale utente la presenza di “*Weir/spillways*” e “*hydraulic connections*” rende spesso necessario ridurre il valore di tale parametro fino a  $\Delta t$  di pochi secondi: nel caso specifico, considerando tutte le simulazioni, abbiamo ottenuto  $1 \leq \Delta t \leq 15$  sec. In Figura 6-8 sono riportate le opzioni impostate e le tolleranze di calcolo utilizzate.

HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances

Geometry Preprocessor Options	
<input type="checkbox"/> Convert Energy Method Bridges to Cross Sections with Lids	
Family of Rating Curves for Internal Boundaries	
<input checked="" type="radio"/> Use existing internal boundary tables when possible.	
<input type="radio"/> Recompute at all internal boundaries	
Unsteady Flow Options	
Theta [implicit weighting factor] (0.6-1.0):	1
Theta for warm up [implicit weighting factor] (0.6-1.0):	1
Water surface calculation tolerance (m):	0.05
Storage Area elevation tolerance (m):	0.05
Flow calculation tolerance [optional] (m <sup>3</sup> /s):	
Maximum number of iterations (0-40):	40
Number of warm up time steps (0-200):	200
Time step during warm up period (hrs):	0.01
Minimum time step for time slicing (hrs):	0.0005
Maximum number of time slices:	20
Lateral Structure flow stability factor (1.0-3.0):	3
Inline Structure flow stability factor (1.0-3.0):	3
Weir flow submergence decay exponent (1.0-3.0):	3
Gate flow submergence decay exponent (1.0-3.0):	3
DSS Messaging Level (1 to 10, Default = 4)	4
Maximum error in water surface solution (Abort Tolerance):	2
<input type="checkbox"/> Compute energy losses over junctions	

Figura 6-8: opzioni di calcolo assegnate.

### 6.3 Modellazione idraulica bidimensionale con FLO-2D ver. Pro

Il software di calcolo americano FLO-2D si basa su un codice di calcolo che utilizza uno schema integrato:

- monodimensionale per il deflusso nell'alveo inciso;
- bidimensionale nelle aree golenali.

Inoltre, FLO-2D presenta le seguenti caratteristiche principali:

- è un modello fisicamente basato;
- conserva i volumi e ne fornisce un report.

Rimandando per gli aspetti di dettaglio alla documentazione tecnica consultabile online al sito <http://www.flo-2d.com/>, si illustrano alcune caratteristiche principali del programma di calcolo.

I processi fisici simulati da FLO-2D sono rappresentati graficamente in Figura 6-9. Per quanto concerne la propagazione delle portate in alveo ed extra alveo, il software permette di effettuare una modellazione ibrida 1D nel canale (del tutto analoga a Hec-Ras) e puramente 2D nelle golene (tutto ciò sia per le portate liquide sia, volendo, per portate solide).

FLO-2D consente di importare la geometria del corso d'acqua direttamente da Hec-Ras, mentre le strutture idrauliche sono inserite mediante le proprie scale di deflusso, calcolate esternamente in Hec-Ras e riportate in dettaglio in Appendice 2.

Quando, durante le simulazioni in moto vario, le portate idrauliche non riescono più ad essere contenute in alveo, il software trasferisce automaticamente i volumi in eccesso alle celle golenali adiacenti, passando allo schema di propagazione 2-D; ciò avviene anche al contrario, con i volumi idrici di esondazione che possono, compatibilmente alle condizioni idrauliche in alveo, rientrare nel "channel" (Figura 6-10).

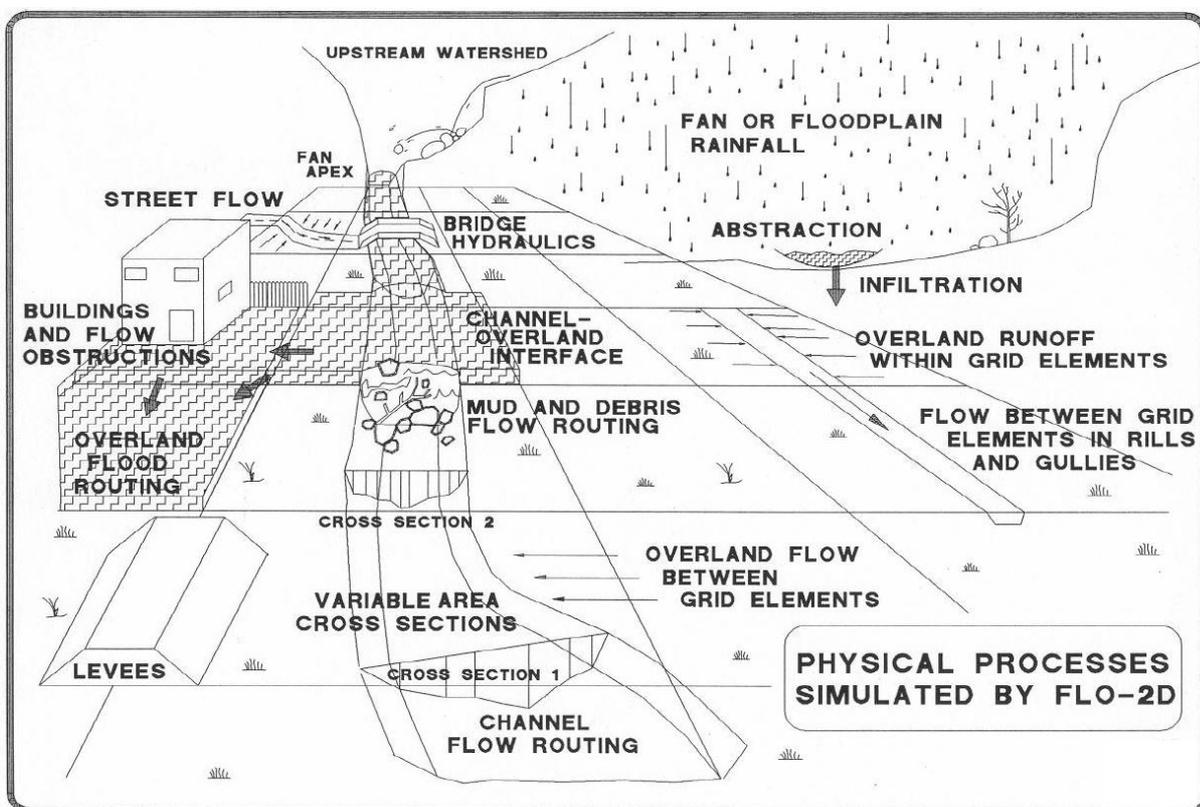


Figura 6-9: Processi fisici simulati da FLO-2D.

L'“overland flow”, cioè la propagazione della piena fuori alveo, è modellata in modo bidimensionale sia come deflusso esteso e a basso tirante (“sheet flow”) o come deflusso in canali multipli e separati, in base alle caratteristiche morfologiche dell'area allagata.

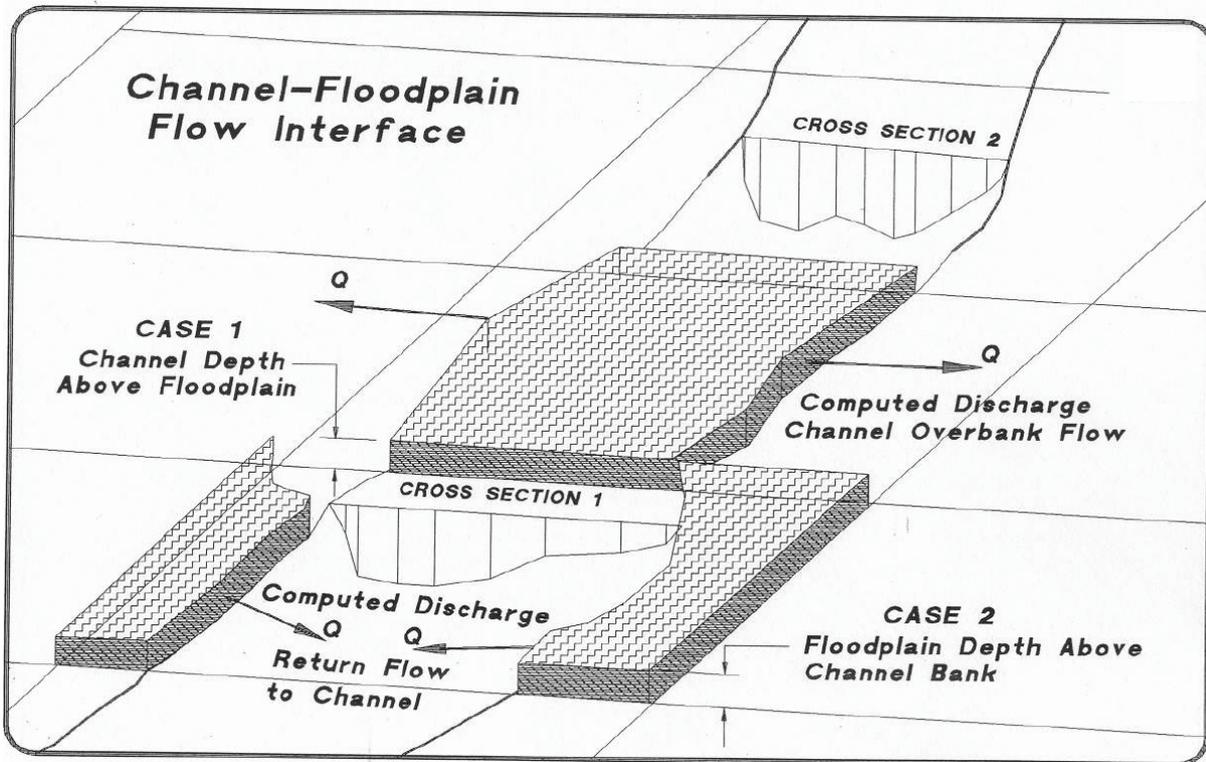


Figura 6-10: Interfaccia alveo inciso - aree golenali.

Il moto bidimensionale di propagazione della piena è risolto mediante l'integrazione numerica delle equazioni del moto e di conservazione del volume. FLO-2D utilizza il seguente sistema di equazioni, costituito rispettivamente dall'equazione di continuità e dall'equazione del moto espressa come equazione dell'onda dinamica completa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} = i$$
$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t}$$

dove:

$h$ : tirante idrico;

$V_x$ : componente lungo x della velocità media;

$i$ : intensità dell'eccesso di pioggia;

$S_{fx}$ : componente lungo x del gradiente delle perdite di carico per attrito (da equazione di Manning);

$S_{0x}$ : pendenza del piano campagna.



La forma differenziale delle equazioni di continuità e del moto è risolta con uno schema numerico esplicito alle differenze finite centrato, ovvero interpolando con legge quadratica la soluzione reale.

In FLO-2D il dominio di calcolo è discretizzato mediante una griglia di celle quadrate di dimensione uniforme. La procedura computazionale di analisi della propagazione della piena fuori alveo consiste nel calcolare la portata attraverso ognuna delle 8 potenziali direzioni di flusso (4 ortogonali ai bordi della cella e 4 diagonali, vedi Figura 6-11) e inizia con una prima stima del tirante idrico ai bordi della cella. Tale tirante  $h$  è una media dei battenti delle due celle che si scambiano volumi idrici in una delle 8 direzioni. Altri parametri idraulici sono mediati tra le due celle per poter stimare la velocità, come la resistenza al moto (coefficiente  $n$  di Manning), l'area di deflusso, la pendenza, il perimetro bagnato, ecc.

L'equazione dell'onda dinamica completa è un'equazione differenziale parziale non lineare del secondo ordine. Per risolverla, la velocità è inizialmente calcolata a partire dalla pendenza media della superficie idrica tra due celle: tale valore di primo tentativo è poi utilizzato per determinare le radici dell'equazione del moto mediante il metodo Newton-Raphson di secondo ordine.

Il gradiente delle perdite di carico per attrito è fornito dall'equazione di Manning. La modalità utilizzata da FLO-2D per tener conto delle dissipazioni di energia aggiuntive (dovute a vegetazione/edifici, espansioni/contrazioni, curve che i filetti fluidi sono costretti a seguire, ecc..) e del conseguente rallentamento della corrente, è quella di assumere valori maggiorati dei coefficienti  $n$ , disponibili in letteratura.

La velocità attraverso il confine tra due celle è quindi calcolata risolvendo l'equazione del moto: dall'area media di deflusso si ottiene successivamente la portata per ogni istante di tempo di calcolo. La modifica del volume idrico contenuto in ogni cella in cui è suddivisa l'area inondata (floodplain) è data dalla somma delle singole portate che attraversano i confini nelle 8 direzioni, moltiplicate per l'intervallo temporale di calcolo.

Tale cambiamento di volume è successivamente diviso per l'area della cella per ottenere l'aumento o la diminuzione del tirante idrico.

FLO-2D adotta un passo temporale di calcolo variabile in automatico (sia in incremento sia in decremento) in base alle condizioni numeriche di stabilità che evitano

l'insorgenza di instabilità numerica ("surging"). La variabilità temporale di calcolo può essere controllata dall'utente.

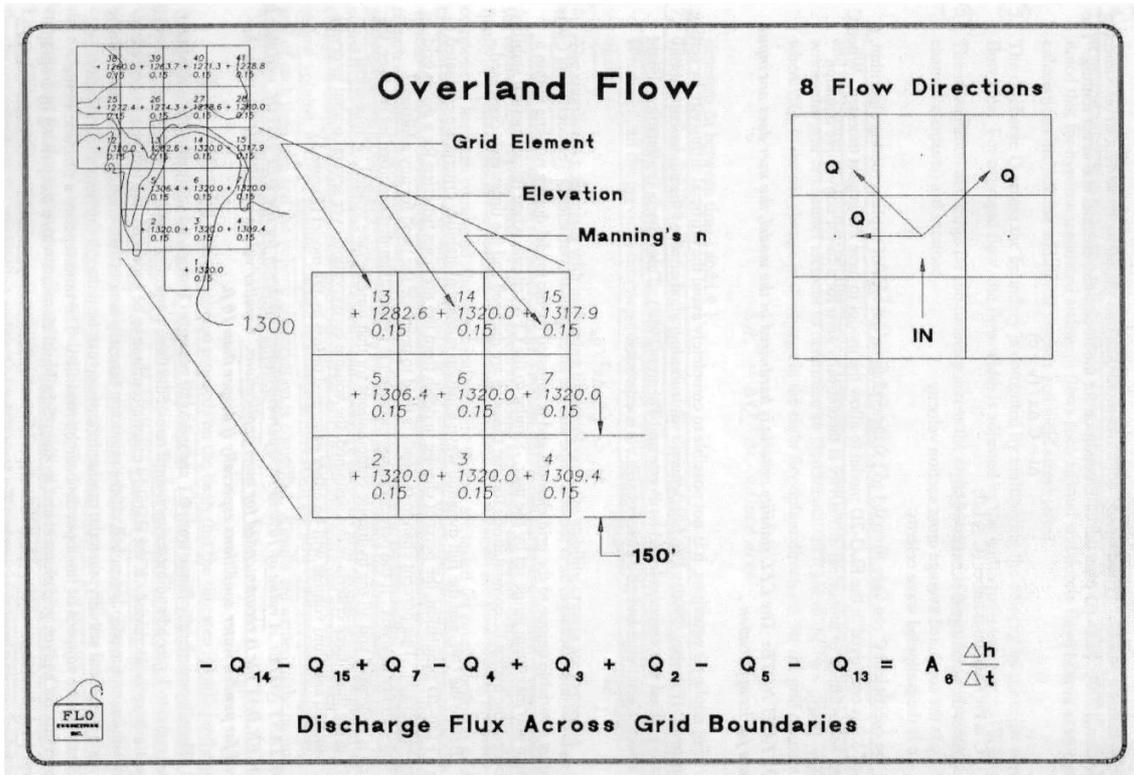


Figura 6-11: Flussi attraverso i confini di una cella in FLO-2D.

Le ipotesi e le limitazioni di base del programma riguardano principalmente la risoluzione spaziale e temporale della griglia di calcolo:

- ogni cella è associata univocamente ad un valore di elevazione, un coefficiente di scabrezza di Manning ed un tirante idrico;
- condizioni di moto uniforme per la durata del passo temporale;
- distribuzione idrostatica delle pressioni;
- risalto idraulico non simulato.

Nelle applicazioni pratiche, l'uso del programma prevede in successione l'uso dei seguenti componenti:

1. Creazione della griglia di calcolo con il software di pre-processamento GDS;
2. Generazione e modifica dei dati di input/output (tra cui dati di inflow, outflow, canali, strade, strutture idrauliche, levee, edifici, parametri di controllo e di stabilità della simulazione) con i moduli GDS, PROFILES, GUI, FLOENVIR;
3. Esecuzione del codice di calcolo idraulico FLO;
4. Lancio dei moduli di post-processamento MAXPLOT, MAPPER per l'analisi dei risultati;
5. Esportazione/integrazione dei risultati in ArcGIS o AutoCAD.



Il primo problema relativo ad una modellazione bidimensionale consiste nella definizione e discretizzazione del dominio di integrazione. Una volta acquisiti i dati topografici relativi all'area di studio, è necessario definire la griglia computazione su cui sarà implementata l'integrazione delle equazioni differenziali del modello matematico. Definire la griglia significa determinare le dimensioni delle celle che la costituiscono e la loro relativa quota. L'interpolazione delle quote geodetiche del dominio da cui si ottengono le quote delle celle di discretizzazione rappresenta un punto importante di una modellazione bidimensionale, in quanto da esso dipende l'accuratezza della soluzione finale. Infatti, se immaginiamo una carta topografica di dettaglio, troveremo una serie di punti geodetici sparsi, la cui densità varia da punto a punto, su cui dovranno innestarsi le celle di discretizzazione. La quota di ogni cella sarà quella ottenuta tramite un processo di interpolazione tra i punti che ricadono in un certo intorno del punto centrale della cella. La bontà di tale interpolazione dipenderà da tre fattori:

1. tecnica di interpolazione
2. dalla dimensione della cella
3. dalla densità di distribuzione dei punti geodetici.

- Esistono diverse tecniche di interpolazione, da quelle più semplici di tipo algebrico che operano una media delle quote dei punti che si trovano ad una certa distanza dal centro della cella, fino a metodi più complessi, come quelli di Poisson e Laplace, che invece utilizzano modelli differenziali dedicati. Il programma FLO-2D effettua o la media dei molti punti 3D, provenienti da LIDAR, interni ad ogni singola cella (come in questo caso) oppure una interpolazione lineare tra i punti che ricadono ad una distanza fissata dall'utente dal centro della singola cella. L'algoritmo di interpolazione di default analizza nel secondo caso almeno 2 punti nelle vicinanze del centro della singola cella, con il raggio di interpolazione che si allarga fino a comprendere il numero di punti scelto. Sono inoltre disponibili funzioni di filtro, trascurabili nel caso si eliminassero a monte gli outliers dai punti topografici di partenza.
- La dimensione della cella è un'altro fattore importante, in quanto si intuisce facilmente che quanto più questa è piccola, tanto più riesce a interpretare fedelmente il reale andamento orografico del terreno. Infatti se immaginiamo cinque diversi punti, la loro interpolazione con un'unica cella genera una quota media che leviga i picchi e riduce le zone depresse, mentre al contrario una discretizzazione con cinque celle conserverebbe l'andamento naturale del terreno.



Tuttavia, oltre al fatto che per estesi allagamenti un'elevata discretizzazione del dominio di calcolo perde significatività, motivi computazionali richiedono una dimensione maggiore della singola cella in caso di elevate portate in ingresso; il criterio suggerito dai creatori del software per la corretta scelta della dimensione della cella è  $Q_{\text{picco}} / A_c < 0.15 \text{ m}^3/\text{s m}^2$ , con  $Q_{\text{picco}}$  = portata massima in arrivo ad una cella e  $A_c$  = superficie della singola cella.

- La densità dei punti rilevati influisce sulla discretizzazione finale e dipende essenzialmente dalla precisione di dettaglio del dato topografico disponibile.<sup>8</sup>

Nel caso specifico, la disponibilità di dati LIDAR ad alta risoluzione ha permesso di conseguire una ricostruzione geometrica delle aree obiettivo molto dettagliata, in grado evidenziare la presenza di rilevati, impluvi e di tutti quei dettagli morfologici in grado di esaltare le potenzialità di una simulazione idraulica puramente bidimensionale. Le celle quadrate con cui è stato discretizzato il dominio hanno lati di lunghezza pari a **7 m**.

---

<sup>8</sup> Nel caso di modellazione 2D completa, il livello di dettaglio geometrico richiesto per la modellazione idraulica del deflusso nell'alveo di magra è diverso da quello per la modellazione del deflusso golenale (overland flow). Infatti, la discretizzazione del canale è quella che richiede una precisione maggiore: i gradienti di quota sono generalmente più elevati e si sviluppano in uno spazio più ristretto se paragonato a quello golenale. Ne consegue che la dimensione della maglia di discretizzazione richiesta nelle floodplains potrà avere un livello di dettaglio inferiore rispetto a quello dell'alveo principale del corso d'acqua. Il deflusso nel canale viene tuttavia modellato con un approccio monodimensionale, basato sul tradizionale rilievo delle sole sezioni trasversali.



## 7 Risultati della modellazione idraulica 1D

Le simulazione numerica delle correnti di piena condotte per eventi meteorici duecentennali e trentennali, implementati con il programma Hec-Ras, hanno consentito di individuare, nei corsi d'acqua oggetto di studio, i tratti dove si verificano le esondazioni.

Gli idrogrammi corrispondenti al volume esondato da ciascun fronte di esondazione sono stati propagati extra-alveo con il software Flo-2D.

Nella Tavola delle aree allagabili sono indicate le aree a pericolosità idraulica per eventi con tempo di ritorno trentennale e duecentennale da cui si evincono le criticità idrauliche presenti nel territorio comunale di Rosignano Marittimo (per ulteriori dettagli si rimanda all'Appendice 1 e all'Allegato contenente gli outputs numerici delle simulazioni puramente bidimensionali effettuate in regime di moto vario).

Mei paragrafi che seguono si descrivono sinteticamente i risultati conseguiti per ciascun corso d'acqua oggetto di analisi.

### 7.1 Botro Quercetano

#### 7.1.1 Allestimento del modello geometrico dell'alveo

Per l'allestimento del modello geometrico del botro Quercetano è stato schematizzato il tratto compreso tra la sez. 5 e la sez. 11, per una lunghezza complessiva di circa 70 m. Le sezioni trasversali sono state desunte dallo specifico rilievo effettuato dal Geom. Alessandro Bianchi nella primavera del 2017.

Per la scabrezza media del corso d'acqua è stato assunto un valore medio del coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per l'alveo inciso e  $0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per le aree golenali.

#### 7.1.2 Risultati della simulazione

Come si può desumere dai risultati numerici del modello idraulico contenuti nell'Appendice 1 e nella Tavola allegata, dove sono individuate e perimetrare le aree a pericolosità idraulica, allo stato attuale, per l'evento duecentennale, è presente un fronte di esondazione in destra idrografica in prossimità dello sbocco in mare. Nella successiva tabella, per l'evento duecentennale, sono indicati i volumi esondati e le relative portate al colmo.

Tabella 7-1: volumi esondati e relative portate al colmo per gli eventi duecentennale e trentennale

Sezione di esondazione	Q <sub>200</sub> [mc/s]	V <sub>200</sub> [mc]	Q <sub>30</sub> [mc/s]	V <sub>30</sub> [mc]
SEZ 6 dx	1.27	1660	-	-

In Figura 7-1 è mostrata la planimetria del tratto del botro Quecetano oggetto di studio con l'ubicazione dei fronti di esondazione.



Figura 7-1: planimetria del tratto del botro Quercetano oggetto di studio con l'indicazione dei fronti di esondazione

## 7.2 Botro delle Acacie

Per l'allestimento del modello geometrico del botro delle Acacie è stata schematizzata l'asta del predetto corso d'acqua dalla sez. 100 alla sez. 73 per una lunghezza complessiva di circa 650 m. Le sezioni trasversali sono state desunte dallo specifico rilievo effettuato dal Geom. Alessandro Bianchi nella primavera del 2017.

Per la scabrezza del corso d'acqua è stato assunto un valore medio del coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per l'aveo inciso e  $0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per le aree golenali.

### 7.2.1 Risultati della simulazione

Come si può desumere dai risultati numerici del modello idraulico contenuti nell'Appendice 1 e nella Tavola allegata, dove sono individuate e perimetrare le aree a pericolosità idraulica, allo stato attuale il botro delle Acacie risulta contenuto in alveo per un evento trentennale, mentre per quello duecentennale presenta cinque fronti di esondazione, di cui quattro in destra idrografica e uno in sinistra. Nella successiva tabella,



sia per l'evento duecentennale che per quello trentennale, sono indicati i volumi esondati e le relative portate al colmo.

Tabella 7-2: volumi esondati e relative portate al colmo per gli eventi duecentale e trentennale

Sezione di esondazione	Q <sub>200</sub> [mc/s]	V <sub>200</sub> [mc]	Q <sub>30</sub> [mc/s]	V <sub>30</sub> [mc]
SEZ 84 dx	0.35	130	-	-
SEZ 82 dx	0.10	50	-	-
SEZ 76 dx	0.76	340	-	-
SEZ 76 sx	1.62	1010	-	-
SEZ 75 dx	0.37	280	-	-



Figura 7-2: planimetria del tratto del botto delle Acacie oggetto di studio con l'indicazione dei fronti di esondazione.



### 7.3 Botro Grande, botro Ginepraia e botro Condotti

Per l'allestimento del modello geometrico sono state schematizzate le aste del botro Grande dalla sez 77 alla sez. 100, per una lunghezza complessiva pari a circa 1.5 Km, e quella del botro dei Condotti dalla sez. 1 alla sez. 13, per una lunghezza complessiva di circa 800 m. Relativamente al botro Ginepraia, che attraversa via Mare Adriatico mediante un guado, anziché schematizzare la propagazione dei volumi nel modello 1-D implementato con Hec-Ras si è scelto di far propagare i relativi idrogrammi di piena verso valle mediante modellazione numerica 2-D implementata con Flo-2D. Le sezioni trasversali sono state desunte rispettivamente dallo specifico rilievo effettuato dal Geom. Alessandro Bianchi nella primavera del 2017 e dai dati Lidar a disposizione.

Per la scabrezza del corso d'acqua è stato assunto un valore medio del coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per l'aveo inciso e  $0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per le aree golenali.

#### 7.3.1 Risultati della simulazione

Come si può desumere dai risultati numerici del modello idraulico contenuti nell'Appendice 1 e nella Tavola allegata, dove sono individuate e perimetrare le aree a pericolosità idraulica, allo stato attuale i botri Grande e Condotti presentano un'officiosità idraulica sufficiente per l'evento trentennale, mentre per quello duecentennale il botro Grande presenta un'esondazione in destra idrografica in prossimità della sezione 78

Nella successiva tabella sia per l'evento duecentennale che per quello trentennale, sono indicati i volumi esondati e le relative portate al colmo.

Tabella 7-3: volumi esondati e relative portate al colmo per gli eventi duecentale e trentennale

Sezione di esondazione	$Q_{200}$ [mc/s]	$V_{200}$ [mc]	$Q_{30}$ [mc/s]	$V_{30}$ [mc]
SEZ 78 dx	0.41	290	-	-



Figura 7-3: planimetria dei botri Grande e Condotti oggetto di studio con l'indicazione dei fronti di esondazione.



## 7.4 Botro lurco e botro Crocetta

Per l'allestimento del modello geometrico è stata schematizzata l'asta del botro lurco dalla sez. 18 alla sez. 1, per una lunghezza complessiva pari a circa 1.2 Km, e quella del botro Crocetta dalla sez. 15 alla sez. 1, per una lunghezza complessiva di circa 1,4 km. Le sezioni trasversali sono state desunte dallo specifico rilievo effettuato dal Geom. Alessandro Bianchi nella primavera del 2017.

Per la scabrezza del corso d'acqua è stato assunto un valore medio del coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per l'aveo inciso e  $0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per le aree golenali.

In questo caso si è osservato che per l'evento trentennale la durata di pioggia che massimizza la portata di piena (durata "critica") è pari a 1,5 ore mentre per l'evento duecentennale la durata critica è risultata pari a 1.5 ore nei tratti a monte della confluenza dei due corsi d'acqua e pari a 3 ore nel tratto a valle della confluenza. Conseguentemente, sono stati analizzati due differenti scenari duecentennali, ovvero quello relativo alla durata di pioggia pari a 1,5 ore e quello relativo alla durata di pioggia pari a 3 ore.

### 7.4.1 Risultati della simulazione

Come si può desumere dai risultati numerici del modello idraulico contenuti nell'Appendice 1 e nella Tavola allegata, dove sono individuate e perimtrate le aree a pericolosità idraulica, allo stato attuale i botri lurco e Crocetta presentano un'officiosità idraulica sufficiente per lo scenario trentennale, mentre per quello duecentennale il botro lurco presenta due fronti di esondazione, uno in destra idrografica e uno in sinistra; inoltre, il ponte alla sez. 15 risulta sormontato. Nella successiva tabella, sia per l'evento duecentennale che per quello trentennale, sono indicati i volumi esondati e le relative portate al colmo.

Tabella 7-4: volumi esondati e relative portate al colmo per gli eventi duecentale e trentennale

Sezione di esondazione	$Q_{200}$ [mc/s]	$V_{200}$ [mc]	$Q_{30}$ [mc/s]	$V_{30}$ [mc]
SEZ 13 sx	3.91	6240	-	-
SEZ 8.3 sx	9.75	750		

In appendice sono riportati i risultati relativi alla configurazione di progetto che prevede il rifacimento del ponticello presso la sez.13 dello lurco e il rialzamento del piano campagna in destra idrografica dello stesso lurco nel tratto compreso tra la linea ferroviaria e la via Aurelia.

I predetti interventi consentono la mitigazione di rischio idraulico fino ad eventi con tempo di ritorno pari a 200 anni senza aggravio di rischio per le aree limitrofe.



Figura 7-4: planimetria dei botri lurco e Crocetta oggetto di studio con l'indicazione dei fronti di esondazione.

## 7.5 Botro Cotone, botro Bargingo e botro Secco

Per l'allestimento del modello geometrico sono state schematizzate le aste dei seguenti corsi d'acqua:

- botro Cotone dalla sez 29 alla sez. 1 per una lunghezza complessiva pari a circa 2,3 Km;
- botro Bargingo dalla sez 6 alla sez. 1 per una lunghezza complessiva pari a circa 430 m;
- botro Secco dalla sez 25 alla sez. 0.9 per una lunghezza complessiva pari a circa 2,6 Km.

Le sezioni trasversali sono state desunte dallo specifico rilievo effettuato dal Geom. Alessandro Bianchi nella primavera del 2017.



Per i tratti dei corsi d'acqua a monte di via delle Pescine e via Cava è stato assunto un valore medio del coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per l'aveo inciso e  $0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ .

A valle delle predette viabilità si è assunto: per il botro Cotone un coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.012 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  nel tratto rivestito in cls e pari  $0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  nel tratto inerbito mentre per il botro Secco per il tratto adiacente via Buozzi si è assunto un coefficiente di  $n$  di Manning pari a  $0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ .

### 7.5.1 Risultati della simulazione

Come si può desumere dai risultati numerici del modello idraulico contenuti nell'Appendice 1 e nella Tavola allegata, dove sono individuate e perimetrare le aree a pericolosità idraulica, allo stato attuale i botri Contone, Bargingo e Secco presentano un'officiosità idraulica insufficiente sia per eventi trentennali che per eventi duecentennali, con l'insorgenza di molteplici fronti di esondazione (vedi Figura 7-5)

Nella successiva tabella, sia per l'evento duecentennale che per quello trentennale, sono indicati i volumi esondati e le relative portate al colmo.

Tabella 7-5: volumi esondati e relative portate al colmo per gli eventi duecentennale e trentennale

Corso d'acqua	Sezione di esondazione	Q <sub>200</sub> [mc/s]	V <sub>200</sub> [mc]	Q <sub>30</sub> [mc/s]	V <sub>30</sub> [mc]
Cotone	sez 24 bridge	5.89	12'932	0.37	661
Cotone	sez 10 dx	10.36	22020	3.27	3553
Cotone	sez 8 dx	5.55	12881	2.54	3298
Cotone	sez 4 dx	4.10	16870	3.76	12415
Cotone	sez 4 sx	8.85	37133	8.18	27466
Secco	sez 14 dx	1.63	1442	-	-
Secco	sez 11 dx	2.18	3600	0.24	112
Secco	sez 10 dx	0.02	11	-	-
Secco	sez 9 dx	1.81	2903	0.38	320
Secco	sez 5 dx	11.17	29691	7.17	16310
Secco	sez 2 dx	5.55	14830	3.81	8770
Secco	sez 14 sx	1.17	959	-	-
Secco	sez 11 sx	0.11	133	-	-
Secco	sez 9 sx	3.86	7772	1.75	2000
Secco	sez 5 sx	3.55	8581	2.07	3906
Secco	sez 2 sx	2.56	6181	1.48	3125
Bargingo	sez 5 sx	0.26	153	-	-

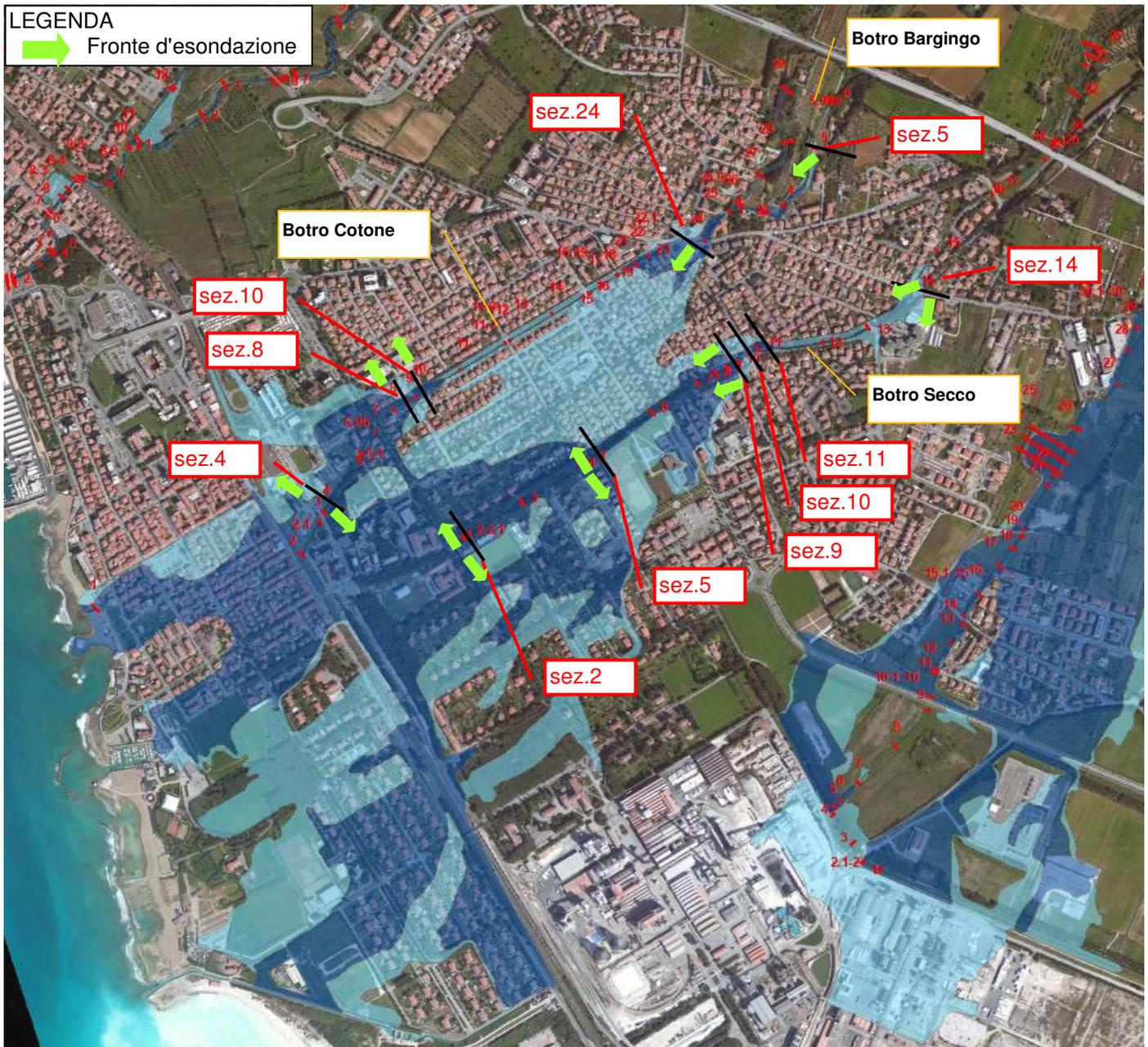


Figura 7-5: planimetria dei botri Cotone, Bargingo e Secco oggetto di studio con l'indicazione dei fronti di esondazione.

## 7.6 Fosso dei Morti (o Pisano)

Per l'allestimento del modello geometrico è stata schematizzata l'asta del fosso dei Morti dalla sez. 40 alla sez. 1, per una lunghezza complessiva pari a circa 2,2 Km. Le sezioni trasversali sono state desunte dallo specifico rilievo effettuato dal Geom. Alessandro Bianchi nella primavera del 2017.

Per la scabrezza del corso d'acqua è stato assunto un valore medio del coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  per l'aveo inciso e  $0.04 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  per le aree golenali.



### 7.6.1 Risultati della simulazione

Come si può desumere dai risultati numerici del modello idraulico contenuti nell'Appendice 1 e nella Tavola allegata, dove sono individuate e perimetrare le aree a pericolosità idraulica allo stato attuale del fosso dei Morti, il corso d'acqua, sia per un evento trentennale che per un evento duecentennale, presenta fronti di esondazione in corrispondenza di due attraversamenti carrabili sottodimensionati posti poco a valle della SS1 Aurelia e presso il confine Nord dello stabilimento industriale Solvay (vedi Figura 7-6).

Nella successiva tabella sia per l'evento duecentennale che per quello trentennale sono indicati i volumi esondati e le relative portate al colmo.

Tabella 7-6: volumi esondati e relative portate al colmo per gli eventi duecentennale e trentennale

Sezione di esondazione	Q <sub>200</sub> [mc/s]	V <sub>200</sub> [mc]	Q <sub>30</sub> [mc/s]	V <sub>30</sub> [mc]
SEZ 36 SX	13.21	39'170	7.85	20'010
SEZ 35 SX	2.42	8'769	1.97	5'700
SEZ 7 DX	0.09	0.04	-	-
SEZ 4 DX	2.62	2'610	0.03	0.01

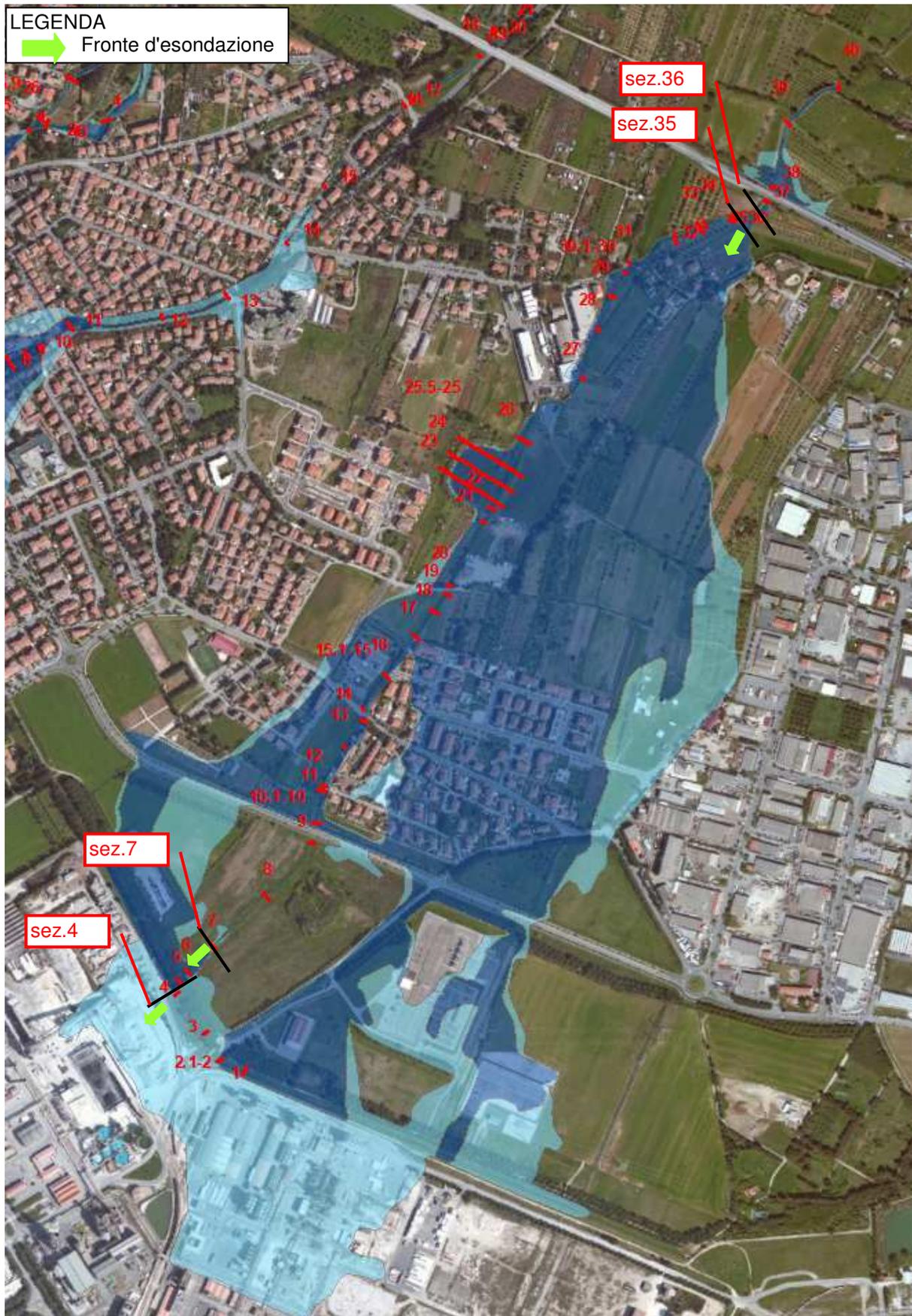


Figura 7-6: planimetria del fosso dei Morti oggetto di studio con l'indicazione dei fronti di esondazione.



## 7.7 Fosso della Vallecorsa e fosso Mozzicone

Per l'allestimento del modello geometrico sono state schematizzate le aste dei seguenti corsi d'acqua:

- fosso della Vallecorsa dalla sez 114 alla sez. 10 per una lunghezza complessiva pari a circa 2,1 Km;
- fosso Mozzicone dalla sez 597 alla sez. 568 per una lunghezza complessiva pari a circa 1 km.

Le sezioni trasversali del fosso Mozzicone e quelle del fosso Vallecorsa che vanno dalla sez. 114 alla sez. 108 sono state desunte dallo specifico rilievo effettuato dal Geom. Alessandro Bianchi nella primavera del 2017. Le restanti sezioni del Vallecorsa derivano dal progetto *"Sistemazione idraulica dei fossi Vallecorsa e Mozzicone per la messa in sicurezza delle aree sottese in località Vada – II e III lotto Variante"*.

Per la scabrezza dei due corsi d'acqua è stato assunto un valore medio del coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per l'aveo inciso e pari  $0.045 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per le aree golenali. Fa eccezione il tratto del fosso Vallecorsa che va dalla sez 597 alla alla sez. 584 per cui si è assunto coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.022 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  dato che il fondo alveo è rivestito in cls e le sponde son in muratura di pietrame.

### 7.7.1 Risultati della simulazione

Come si può desumere dai risultati numerici del modello idraulico contenuti nell'Appendice 1 e nella Tavola allegata, dove sono individuate e perimetrare le aree a pericolosità idraulica, allo stato attuale i due corsi d'acqua, sia per un evento trentennale che per un evento duecentennale, presentano i fronti di esondazione rappresentati in Figura 7-7.

Nella successiva tabella, sia per l'evento duecentennale che per quello trentennale, sono indicati i volumi esondati e le relative portate al colmo.

Tabella 7-7: volumi esondati e relative portate al colmo per gli eventi duecentale e trentennale

Corso d'acqua	Sezione di esondazione	$Q_{200}$ [mc/s]	$V_{200}$ [mc]	$Q_{30}$ [mc/s]	$V_{30}$ [mc]
Mozzicone	SEZ 597DX	8.61	51770	3.83	7015
Mozzicone	SEZ 597 SX	4.92	29617	2.05	4905
Mozzicone	SEZ 595DX	0.01	99	0.01	22
Mozzicone	SEZ 595 SX	0.09	788	0.08	144
Mozzicone	SEZ 584DX	0.03	286	0.03	54
Mozzicone	SEZ 584 SX	0.17	1715	0.17	365
Mozzicone	SEZ 582DX	0.01	94	0.01	9
Mozzicone	SEZ 577DX	0.04	412	0.03	74

Corso d'acqua	Sezione di esondazione	di	Q <sub>200</sub> [mc/s]	V <sub>200</sub> [mc]	Q <sub>30</sub> [mc/s]	V <sub>30</sub> [mc]
Vallecorsa	SEZ 114 DX		14.60	104373	6.29	11743
Vallecorsa	SEZ 114 SX		2.40	8689	0.07	34
Vallecorsa	SEZ 110 DX		3.22	53532	3.19	27193
Vallecorsa	SEZ 94 DX		0.15	2083	0.15	1026
Vallecorsa	SEZ 93 SX		3.30	55076	3.25	34141

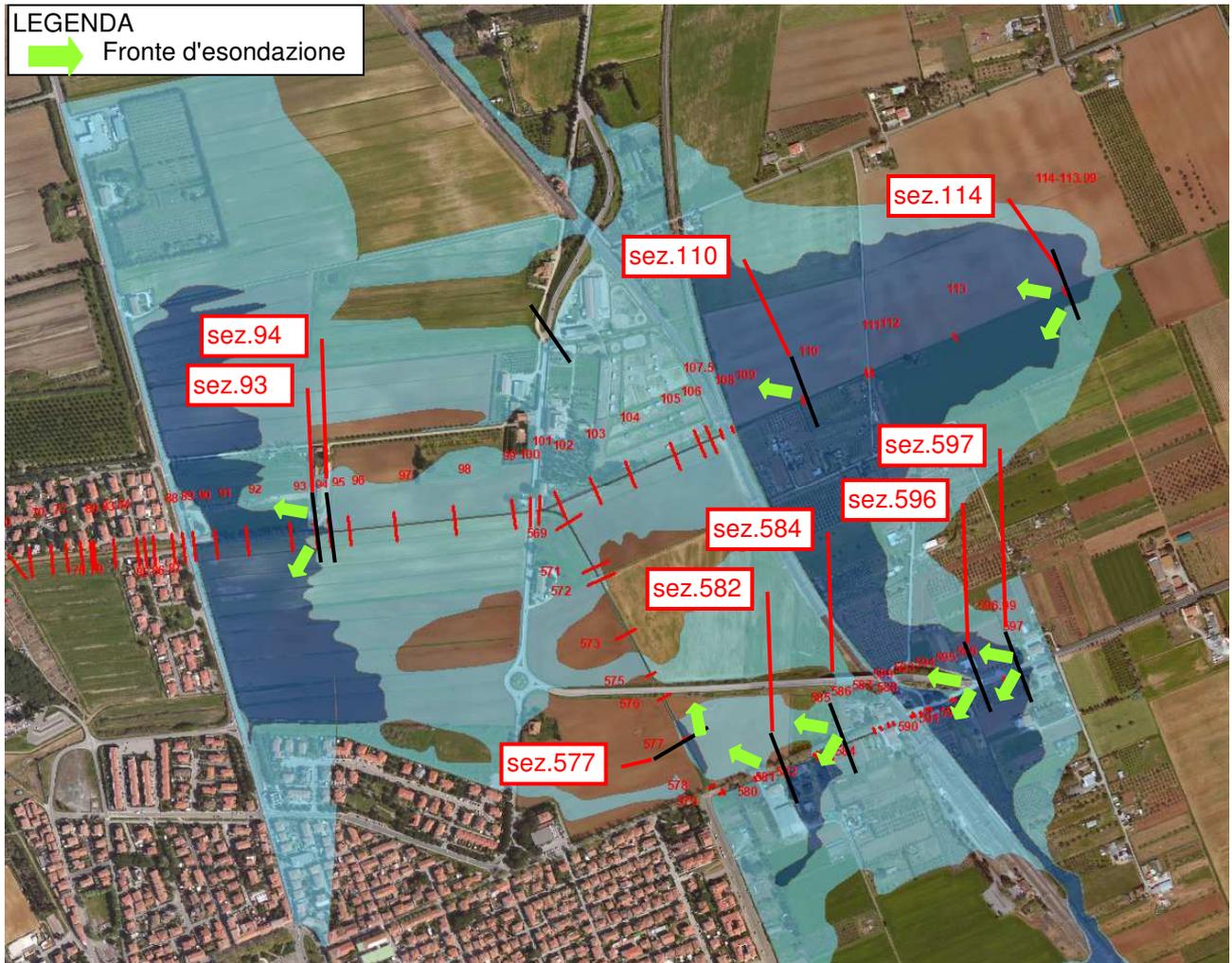


Figura 7-7: planimetria dei fossi Vallecorsa e Mozzicone oggetto di studio con l'indicazione dei fronti di esondazione.



## 7.8 Fosso dei Fichi e torrente Tripesce

Per l'allestimento del modello geometrico sono state schematizzate le aste dei seguenti corsi d'acqua:

- fosso dei Fichi dalla sez. 13 alla sez. 1, per una lunghezza complessiva pari a circa 1.4 Km;
- torrente Tripesce dalla sez. 46 alla sez. 1, per una lunghezza complessiva pari a circa 5.6 Km.

Le sezioni trasversali del fosso dei Fichi sono state desunte dallo specifico rilievo topografico effettuato dal Geom. Alessandro Bianchi nella primavera del 2017 mentre quelle del torrente Tripesce sono state desunte dallo studio idrologico-idraulico redatto a supporto dell R.U. del Comune di Cecina.

Per la scabrezza dei due corsi d'acqua è stato assunto un valore medio del coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per l'aveo inciso e di  $0.045 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per le aree golenali ad eccezione del tratto del torrente Tripesce compreso tra la sez. 46 e la sez. 14 in cui per l'alveo inciso è stato adottato il valore di  $0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ .

### 7.8.1 Risultati della simulazione

Come si può desumere dai risultati numerici del modello idraulico contenuti nell'Appendice 1 e nella Tavola allegata, dove sono individuate e perimetrare le aree a pericolosità idraulica, allo stato, il fosso dei Fichi sia per un evento trentennale che per un evento duecentennale, presenta i fronti di esondazione rappresentati in Figura 7-8. Nella successiva tabella, sia per l'evento duecentennale che per quello trentennale, sono indicati i volumi esondati e le relative portate al colmo.

Tabella 7-8: volumi esondati e relative portate al colmo per gli eventi duecentennale e trentennale del fosso dei Fichi

Corso d'acqua	Sezione di esondazione	$Q_{200}$ [mc/s]	$V_{200}$ [mc]	$Q_{30}$ [mc/s]	$V_{30}$ [mc]
Fichi	SEZ 13 DX	21.9	156924	12.87	68832
Fichi	SEZ 13 SX	3.85	18603	0.83	3315
Fichi	SEZ 7 DX	0.22	2703	0.21	2139
Fichi	SEZ 7 SX	0.2	2451	0.19	1944

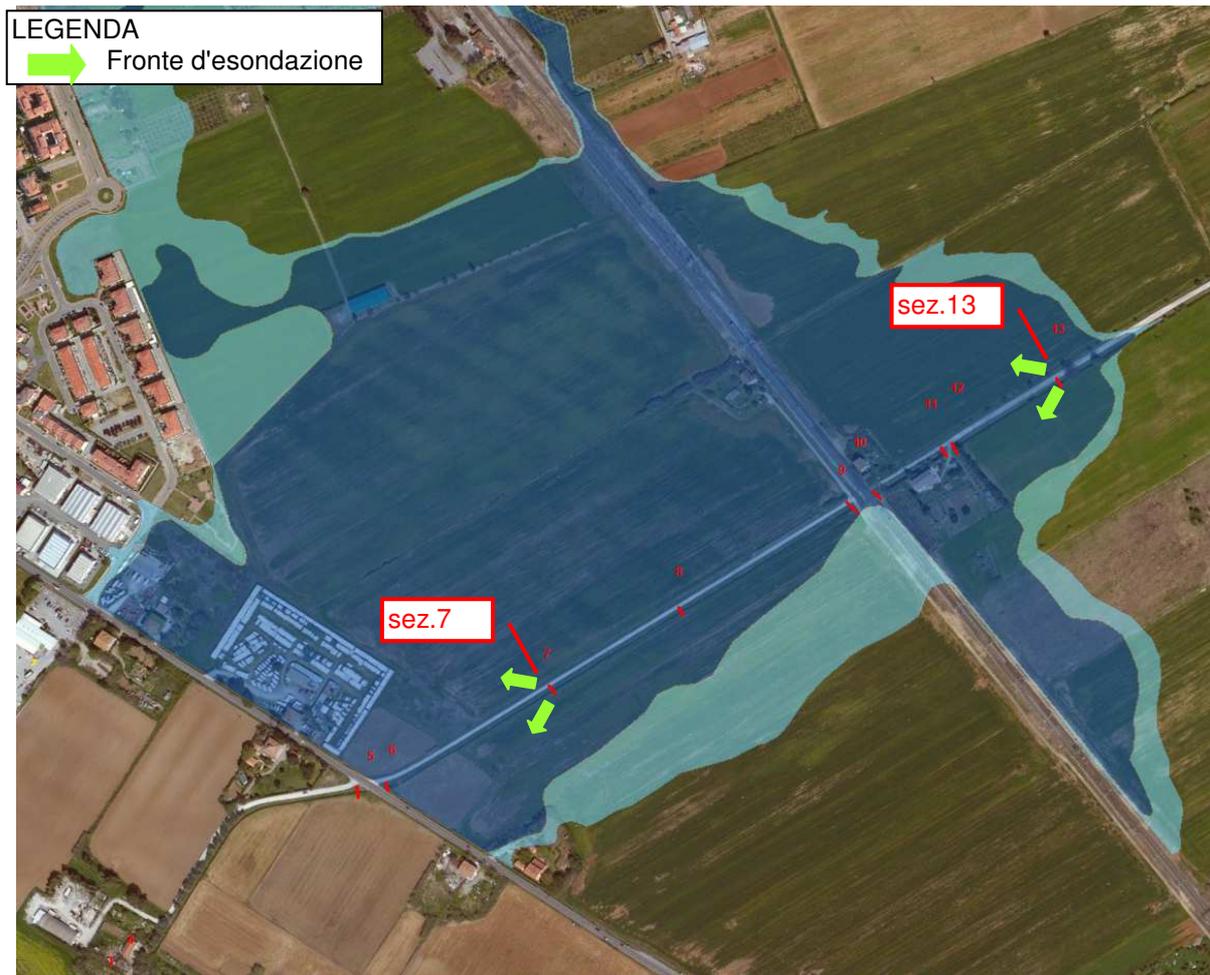


Figura 7-8: planimetria del fosso dei Fichi oggetto di studio con l'indicazione dei fronti di esondazione.

## 8 Risultati della modellazione idraulica 2D

### 8.1 Modello FLO-2D “Rosignano Nord” (Rosignano Solvay)

Il modello bidimensionale “Rosignano Nord” presenta un dominio di studio avente una superficie pari a 13.5 km<sup>2</sup>, discretizzata in 274'790 celle quadrate di dimensione 7 m x 7 m, e si estende da Castiglioncello (a Nord) al Fiume Fine (a Sud), dalla S.S. 1 Aurelia (a Est) fino alla linea di costa (a Ovest, vedi Figura 8-1).

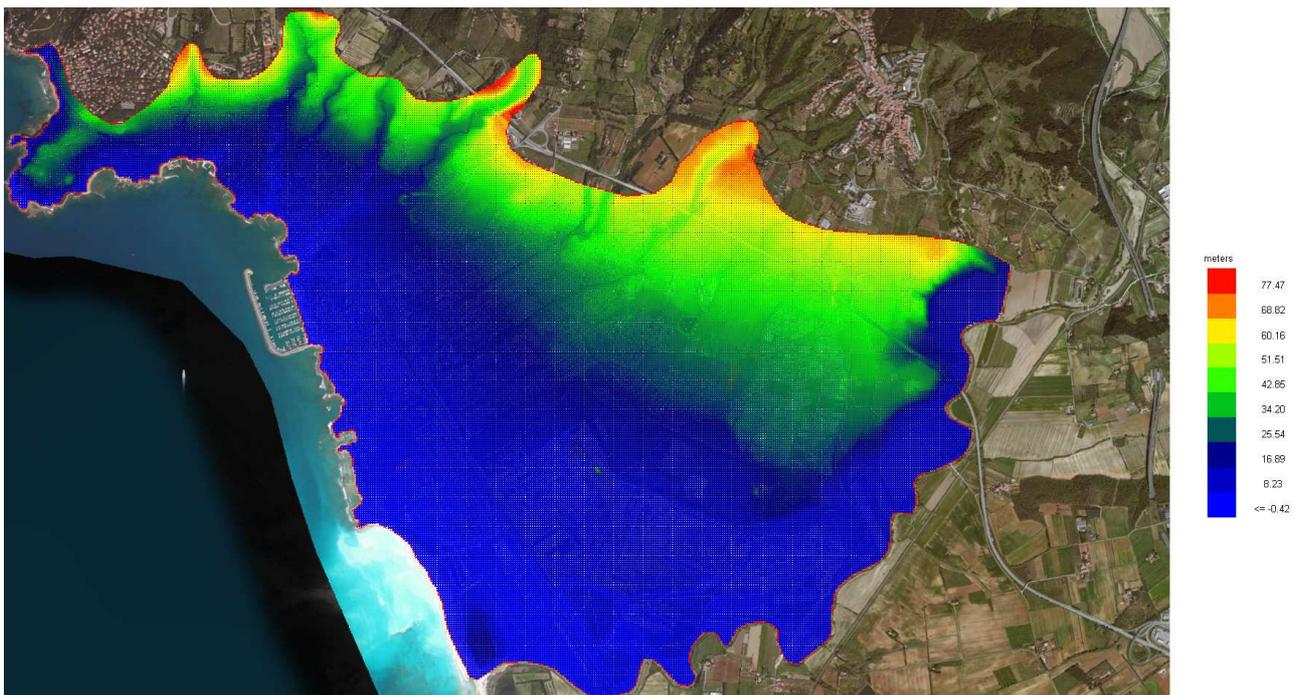


Figura 8-1: dominio e DTM del modello 2D “Rosignano Nord”.

All'interno di tale dominio, procedendo da Nord verso Sud, sono compresi i seguenti corsi d'acqua, i cui volumi idrici di esondazione sono stati fatti propagare in regime di moto vario puramente 2D:

- Botro del Quercetano;
- Botro delle Acacie;
- Botro Grande;
- Botro Ginepraia;
- Botro dei Condotti;
- Botro lurco;
- Botro Crocetta;
- Fosso Cotone;
- Botro Bargingo;
- Botro Secco;
- Fosso dei Morti (o Pisano).

Per la scabrezza delle aree extra-alveo interessate dal cosiddetto “overland flow”, che risultano prevalentemente urbanizzate, è stato assunto cautelativamente un valore



medio del coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.1 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ , in linea con i valori proposti nella letteratura di settore.

## 9 Modello FLO-2D “Rosignano Sud” (Vada)

Il modello bidimensionale “Rosignano Sud” presenta un dominio di studio avente una superficie pari a 17.0 km<sup>2</sup>, discretizzata in 347'271 celle quadrate di dimensione 7 m x 7 m, e si estende dal Fiume Fine (a Nord) fino al Torrente Tripesce (a Sud), dalla S.S. 1 Aurelia (a Est) fino alla linea di costa (a Ovest, vedi Figura 9-1).



Figura 9-1: dominio e DTM del modello 2D “Rosignano Sud”.

All'interno di tale dominio, procedendo da Nord verso Sud, sono compresi i seguenti corsi d'acqua, i cui volumi idrici di esondazione sono stati fatti propagare in regime di moto vario puramente 2D:

- Fosso Vallecorsa;
- Fosso Mozzicone;
- Fosso dei Fichi.

Per la scabrezza delle aree extra-alveo interessate dal cosiddetto “overland flow”, che risultano prevalentemente agricole, è stato assunto cautelativamente un valore medio del coefficiente  $n$  di Manning pari a  $0.2 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ , in linea con i valori proposti nella letteratura di settore.



## 10 Stato di progetto (scenario TR200) e veriche di non aggravio di rischio in altre aree

Ai sensi dell'art. 11 comma 2 della L.R. 41/2018, nuovi interventi edilizi previsti all'interno di comparti ricadenti in pericolosità idraulica *duecentennale* (definita *I.3* ai sensi del D.P.G.R. 53R o *pericolosità per alluvioni poco frequenti* ai sensi della L.R. 41/2018) indipendentemente dalla *magnitudo idraulica*, possono essere realizzati con opere di cui all'art.8 comma 1 lettere a), b) o c).

Nel presente Piano Operativo la fattibilità di nuovi interventi edilizi in aree a pericolosità idraulica (che risultano in aree a *pericolosità per alluvioni poco frequenti* mentre non sono presenti previsioni in aree a *pericolosità per alluvioni frequenti*) è stata valutata con esclusivo riferimento alle opere di cui alla lettera c), le “*opere di sopraelevazione, senza aggravio delle condizioni di rischio in altre aree*”, ad eccezione del comparto 2-1° la cui fattibilità è assoggettata al collaudo degli interventi di “*Adeguamento idraulico del Torrente Fine. Realizzazione nuovi attraversamenti idraulici Linea Ferroviaria e SS 1 Aurelia. Realizzazione argine sinistro a valle della SP 39 Via Aurelia*”, che rientra tra le opere di cui alla lettera a) del predetto articolo di legge.

Al fine di valutare quantitativamente l'eventuale aggravio di condizioni di *rischio* in altre aree che la realizzazione di interventi di trasformazione del territorio potrebbe comportare rispetto allo stato attuale, preme sottolineare come l'aggravio di *pericolosità* costituisca una delle tre componenti che definiscono il rischio: in altre parole un eventuale aggravio di pericolosità costituisce una condizione *necessaria* ma *non sufficiente* per configurare anche un aggravio di rischio.

Tale concetto si esplica nel grafico di Figura 10-1 e nella seguente definizione di “*rischio di alluvioni*”, tratta dalla L.R. 41/2018, art. 2 comma 1 lettera i): *la combinazione della probabilità di accadimento di un evento alluvionale e delle potenziali conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche derivanti da tale evento.*

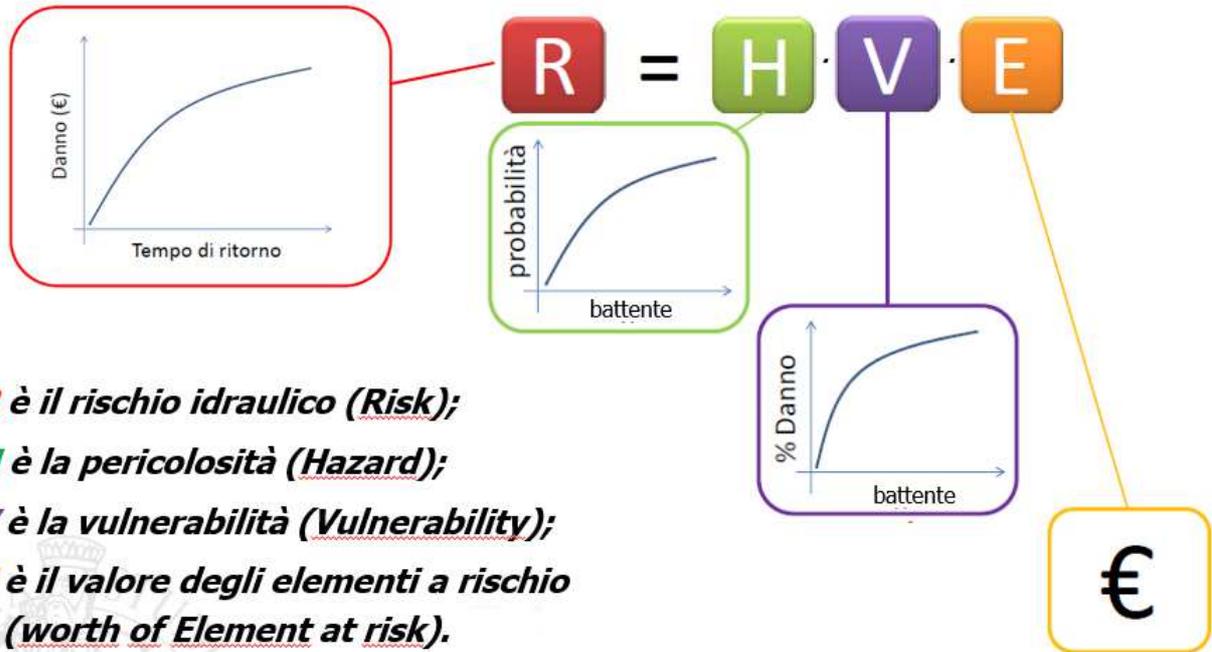


Figura 10-1: definizione di "rischio idraulico".

Le verifiche che seguono, relative ad alcuni specifici comparti di previsione del P.O., si basano sul confronto delle condizioni di rischio idraulico relative ad uno scenario di progetto rispetto allo scenario di stato attuale.

Lo scenario di progetto consiste nella simulazione numerica della propagazione extra-alveo dei volumi idrici di esondazione provenienti dai corsi d'acqua studiati effettuata "bloccando" le celle di calcolo del dominio che saranno interessate da opere di sopraelevazione in rilevato all'interno di ciascun comparto investigato, in modo da non consentire la loro allagabilità durante l'evento di piena duecentennale: la valutazione delle condizioni di rischio idraulico nelle aree contermini consente di valutare la sussistenza o meno di un eventuale incremento di rischio.

Rimandando all'Allegato su CD-ROM del presente studio per i dati puntuali di dettaglio, di seguito si mostrano graficamente i risultati del confronto tra lo scenario di progetto e quello attuale in termini di incremento di battente idraulico, espresso cromaticamente secondo la seguente legenda<sup>9</sup>:

$$\Delta h \text{ (m)} = h_{\text{PRO}} - h_{\text{ATT}}$$

- < 0
- 0.050 ÷ 0.10
- 0.010 ÷ 0.15
- 0.015 ÷ 0.20
- 0.020 ÷ 0.25

<sup>9</sup> L'intervallo di valori  $\Delta h = -4 \text{ cm} \div +4 \text{ cm}$  non è visualizzato in quanto dell'ordine di grandezza delle tolleranze numeriche di calcolo ed è stato ritenuto trascurabile.



Nei casi in cui il confronto tra stato di progetto (con sopraelevazione “su rilevato”) e stato attuale ha fornito risultati soddisfacenti e tali da ritenere verificato il non aggravio di rischio idraulico, nelle schede norma allegate alle NTA è stata indicata la quota assoluta espressa in m s.l.m. alla quale impostare il piano di calpestio, pari alla massima quota raggiunta dalla superficie idrica duecentennale, opportunamente maggiorata di un franco di sicurezza assunto pari a 30 cm.

Laddove invece tale confronto non è risultato soddisfacente (vedi ad esempio il comparto 2-4u al § 10.2), nelle schede norma la sopraelevazione, al fine di escludere aggravii di rischio, è consentita esclusivamente adottando tipologie costruttive atte intrinsecamente a garantire la *trasparenza idraulica* (tipo “pilotis”); anche in tali casi è stata indicata la quota assoluta espressa in m s.l.m. alla quale impostare il piano di calpestio, pari alla massima quota raggiunta dalla superficie idrica duecentennale, opportunamente maggiorata di un franco di sicurezza assunto pari a 30 cm.

## **10.1 Rosignano Nord - PROGETTO**

### **10.1.1 Comparto 3-1u**

Rimandando per maggiori dettagli sia alla descrizione del modello Hec-Ras “Iurco-Crocetta” riportata al § 7.4.1 che all’Appendice 1, la configurazione di progetto prevede il rifacimento del ponticello esistente sul Botro Iurco presso la sez.13, a monte della confluenza del Botro Crocetta, e il rialzamento del piano campagna in destra idrografica del corso d’acqua nel tratto compreso tra la linea ferroviaria e la via Aurelia, area dove è prevista la realizzazione del comparto 3-1u.

In particolare, la configurazione di progetto prevede la demolizione e ricostruzione della struttura di attraversamento rappresentata in Figura 10-2 e Figura 10-3 con una nuova struttura avente officiosità idraulica compatibile con la piena duecentennale, costituita da una luce di larghezza 5 m ed una quota di intradosso dell’impalcato posta a 13.00 m s.l.m. (vedi Figura 10-4).



Figura 10-2: Botro lurco sez. 13 a monte della confluenza del Botro Crocetta (vista da valle verso monte).

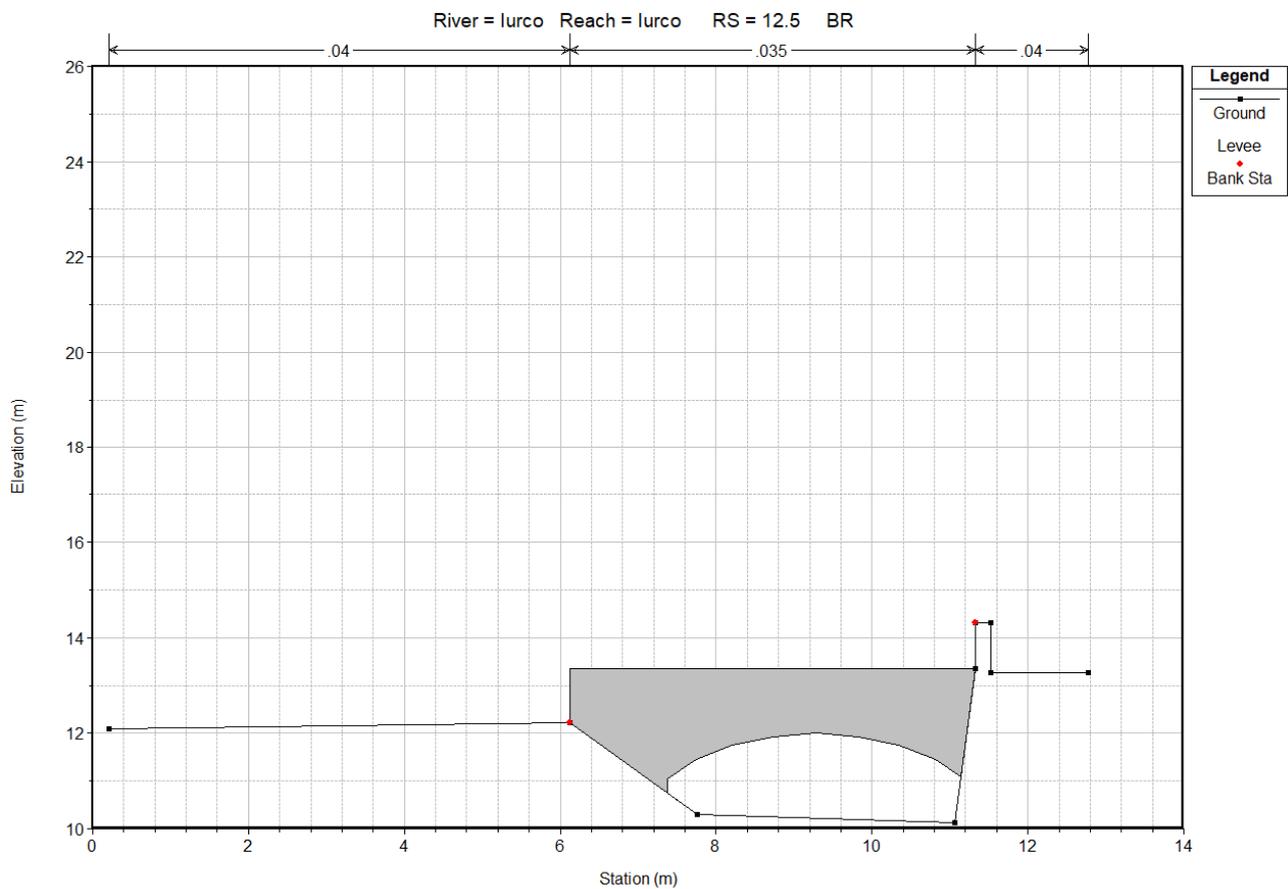


Figura 10-3: Botro lurco sez. 13 a monte della confluenza del Botro Crocetta (vista da monte verso valle): stato attuale.

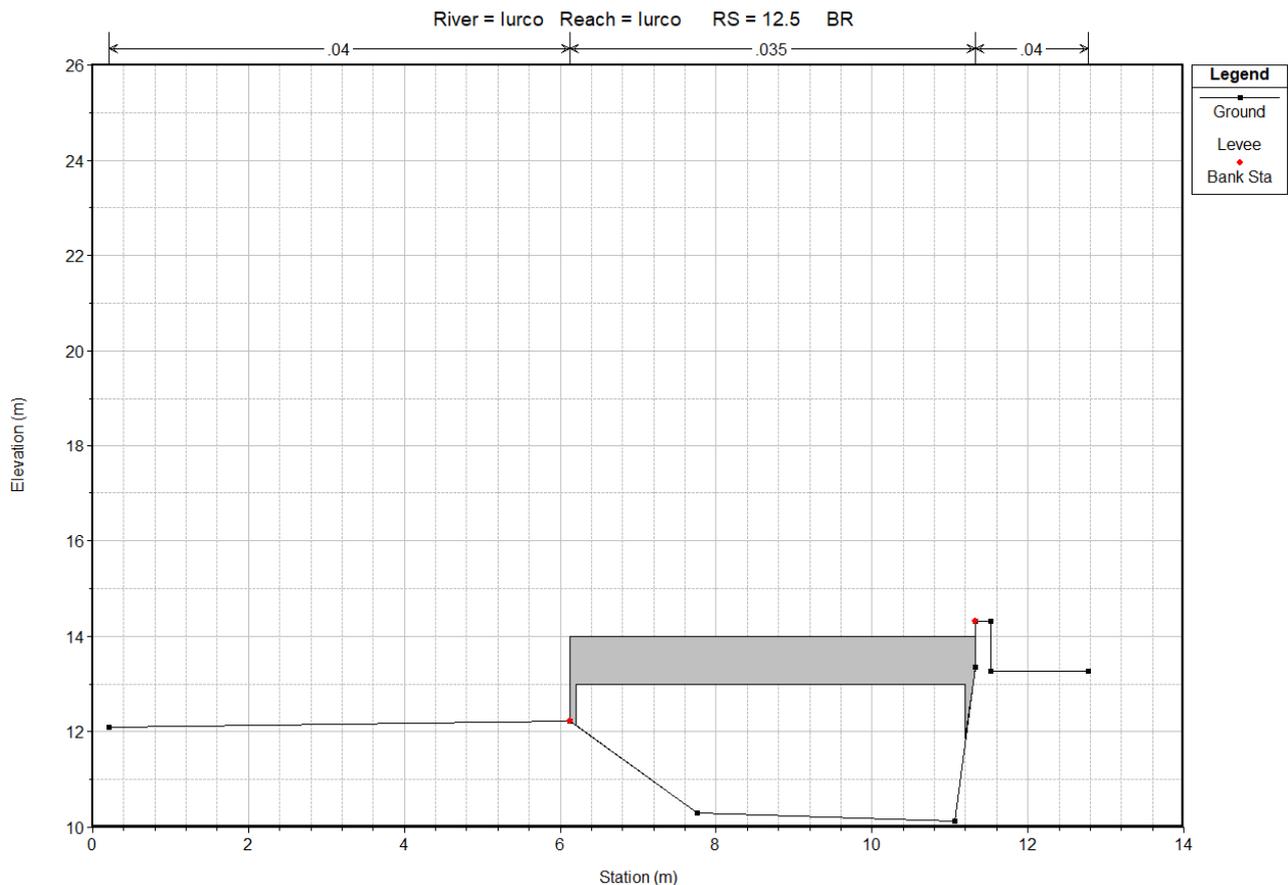


Figura 10-4: Botro Iurco sez. 13 a monte della confluenza del Botro Crocetta (vista da monte verso valle): stato di progetto.

Per quanto concerne invece la fattibilità idraulica del comparto 3-1u, allo stato attuale, la quota massima raggiunta dal pelo libero duecentennale nell'area di intervento risulta pari a 5.04 m s.l.m., con battenti non superiori a 0.15 m in corrispondenza della sez. 8.4 (Figura 10-5) e non superiori a 0.40 m in corrispondenza della sez. 8.3 (Figura 10-6).

L'intervento nel comparto 3-1u è ammesso a condizione che vengano realizzate opere di mitigazione del rischio costituite dalla sopraelevazione del piano campagna (esternamente alla fascia di 10 m dal ciglio di sponda) fino alla quota assoluta di 6.45 m s.l.m., comprensiva di un franco di sicurezza pari o superiore a 0.30 m: tale configurazione è stata opportunamente simulata come scenario di progetto.

In Figura 10-8 è mostrata la verifica di non incremento di rischio idraulico connessa alla realizzazione delle opere di progetto in termini di confronto della superficie idrica duecentennale. Per lo scenario critico (relativo ad un evento pluviometrico di durata 3 h), si osserva che la superficie idrica di progetto e di stato attuale risultano coincidenti nei tratti posti a monte della linea ferroviaria e a valle della SS1 Aurelia. Nel tratto in alveo prospiciente al comparto, si osserva invece un locale incremento di livello del pelo libero ovunque non superiore a 12 cm.

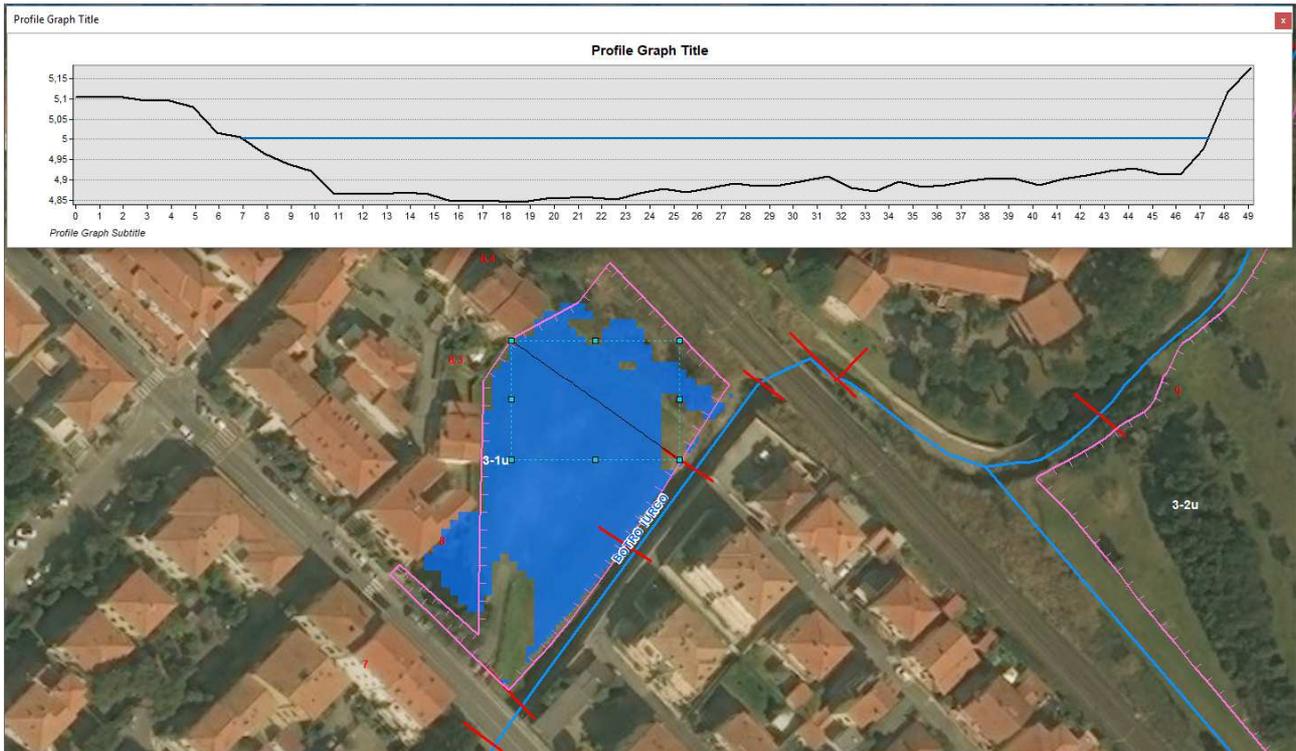


Figura 10-5: Botro lurco sez. 8.4.

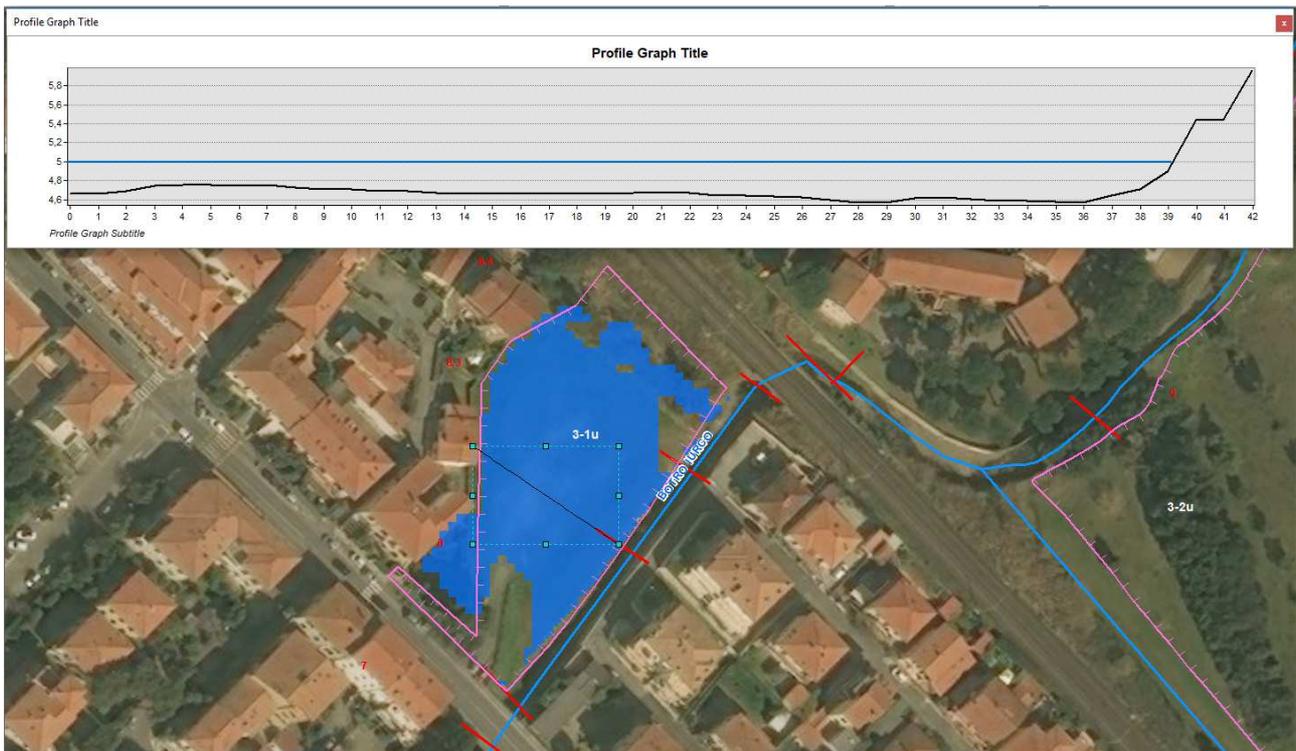


Figura 10-6: Botro lurco sez. 8.3.



Figura 10-7: Botro lurco: area in destra idrografica nel tratto compreso tra la linea ferroviaria e la via Aurelia dove è prevista la realizzazione del comparto 3-1u (vista da valle verso monte).

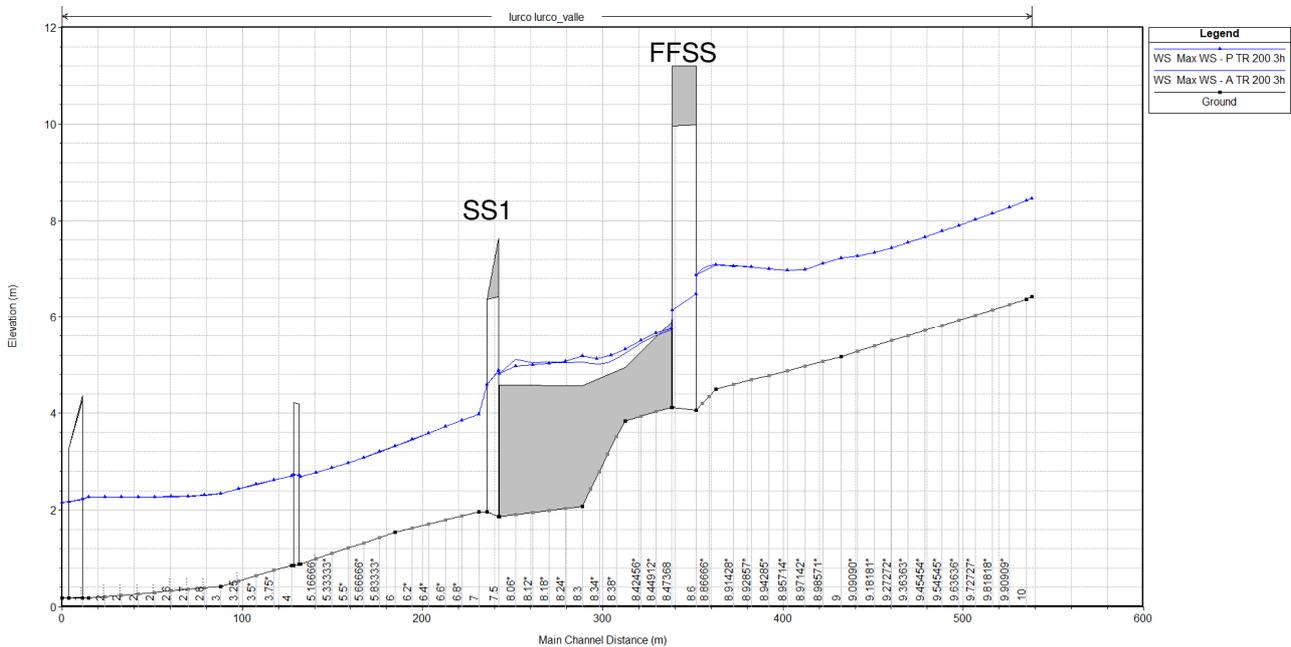


Figura 10-8: Botro lurco: profilo longitudinale con confronto tra le superfici idriche TR200 allo stato attuale e di progetto.

### 10.1.2 Comparto 3-28u

In Figura 10-9 è mostrata la planimetria del modello numerico con indicazione delle celle “ostruite” nella configurazione di progetto al fine di simulare la realizzazione di un rilevato.

In Figura 10-10 sono mostrate le celle di calcolo in cui si è stimato un incremento di battente idraulico nello scenario di progetto rispetto allo scenario di stato attuale. Le verifiche idrauliche effettuate evidenziano che l'incremento di battente riguarda una esigua superficie a Nord-Ovest del comparto in una fascia di ampiezza massima di circa 20 m dal limite del comparto stesso, nell'area rappresentata in Figura 10-12 e occupata in parte da una viabilità comunale, Via Chiesa, e da una pineta: con riferimento ai valori numerici riportati in Figura 10-11, si osserva che i battenti in tale zona passano da valori compresi tra 0 e 3 cm allo stato attuale ad un valore medio pari a 8 cm nella configurazione di progetto. Stante la modesta entità dei battenti in gioco sia allo stato attuale che di progetto, nonché la sussistenza di condizioni di *rischio medio* "R2"<sup>10</sup> come definito all'art. 2 della L.R.41/2018 anche nello stato di progetto, si ritiene che la realizzazione della sopraelevazione in esame non determini incremento di rischio idraulico.

Gli interventi edilizi sono quindi ammessi a condizione che vengano realizzate opere di sopraelevazione su rilevato fino ad una quota assoluta pari a 5.10 m s.l.m. (quota comprensiva di un franco idraulico di 0.30 m).



Figura 10-9: Perimetro del comparto 3-28u e rappresentazione delle celle "ostruite" nello scenario di progetto per simulare la realizzazione della sopraelevazione su rilevato.

<sup>10</sup> m) "rischio medio R2", definito dal decreto del Presidente del Consiglio dei ministri del 29 settembre 1998 (...omissis...), come il rischio per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e delle infrastrutture e la funzionalità delle attività economiche;



Figura 10-10: Perimetro del comparto 3-28u e indicazione delle celle di calcolo in cui si è calcolato un incremento di battente idraulico nello scenario di progetto rispetto allo scenario di stato attuale.

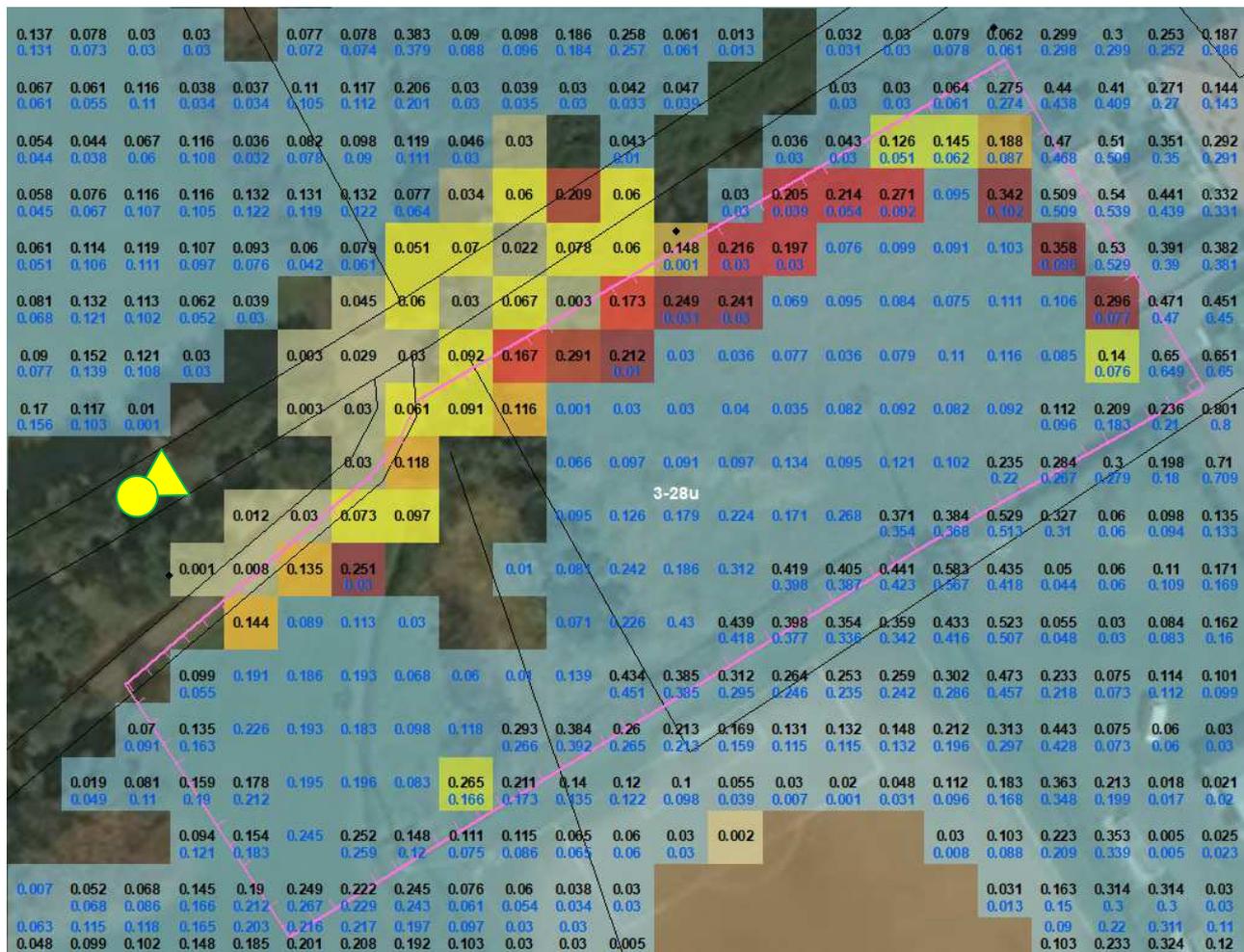


Figura 10-11: Perimetro del comparto 3-28u e indicazione delle celle di calcolo con i valori di battente (espresso in metri) nelle configurazioni di progetto (valori di colore nero) e di stato attuale (valori di colore blu).



Figura 10-12: Vista dell'area interessata dall'incremento di battente (vedi punto di scatto in Figura 10-11).

### 10.1.3 Comparto 3-38u

In Figura 10-13 è mostrata la planimetria del modello numerico con indicazione delle celle “ostruite” nella configurazione di progetto al fine di simulare la realizzazione di rilevati che interesseranno solo alcune porzioni del comparto.

In Figura 10-14 sono mostrate le celle di calcolo in cui si è stimato un incremento di battente idraulico nello scenario di progetto rispetto allo scenario di stato attuale. Le verifiche mostrano che l'incremento di battente riguarda esclusivamente n°4 celle aventi dimensione 7 m x 7 m lungo il perimetro Nord del comparto, di cui solo una parte di esse esterna al perimetro del comparto: con riferimento ai valori numerici riportati in Figura 10-15, si osserva che i battenti in tali celle passano da valori compresi tra 5 e 10 cm a valori compresi tra 15 e 23 cm. Stante la modesta estensione spaziale delle aree in cui si verifica il localizzato incremento di battente e l'entità dei battenti in gioco sia allo stato attuale che di progetto, nonché la sussistenza di rischio medio “R2” come definito all'art. 2 lettera m) della L.R.41/2018 anche nello stato di progetto, si ritiene che la realizzazione della sopraelevazione non determini incremento di rischio idraulico.

Gli interventi edilizi sono quindi ammessi a condizione che vengano realizzate opere di sopraelevazione fino ad una quota assoluta pari a 19.30 m s.l.m. (quota comprensiva di un franco idraulico di 0.30 m). La sopraelevazione potrà essere conseguita su rilevato.

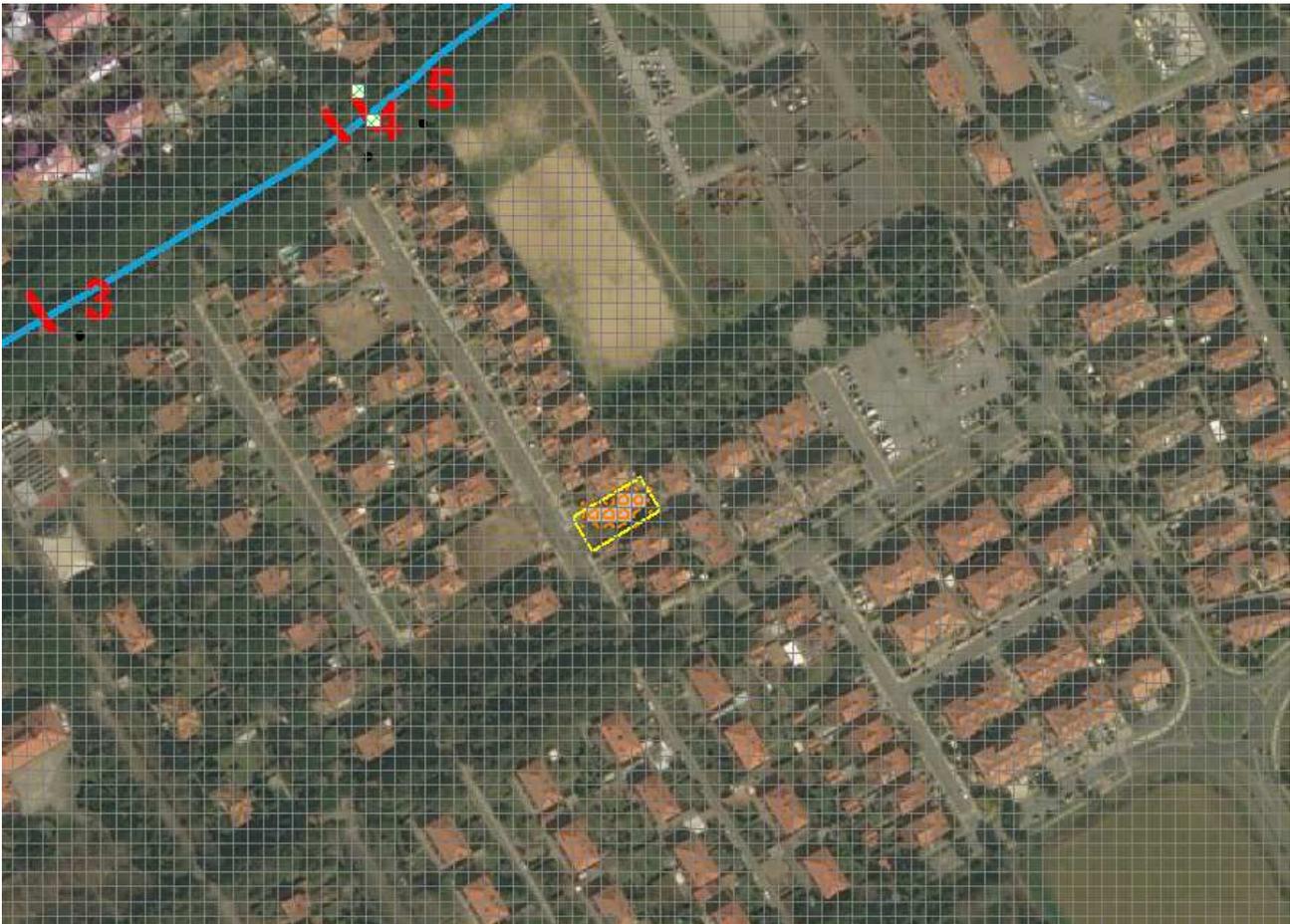


Figura 10-13: Perimetro del comparto 3-38u e rappresentazione delle celle "ostruite" nello scenario di progetto per simulare la realizzazione della sopraelevazione su rilevato.



Figura 10-14: Perimetro del comparto 3-38u e indicazione delle celle di calcolo in cui si è calcolato un incremento di battente idraulico nello scenario di progetto rispetto allo scenario di stato attuale.



Figura 10-15: Perimetro del comparto 3-38u e indicazione delle celle di calcolo con i valori di battente (espresso in metri) nelle configurazioni di progetto (valori di colore nero) e di stato attuale (valori di colore blu).

### 10.1.4 Comparto 3-19u e 3-30u

In Figura 10-16 è mostrata la planimetria del modello numerico con indicazione delle celle “ostruite” nella configurazione di progetto al fine di simulare la realizzazione di un rilevato.

In Figura 10-17 sono mostrate le celle di calcolo in cui si è stimato un incremento di battente idraulico nello scenario di progetto rispetto allo scenario di stato attuale. Le verifiche mostrano che l’incremento di battente non interessa il comparto 3-19u mentre si verifica in numero esiguo di celle interne o lungo il perimetro del comparto 3-30u.

Relativamente al comparto 3-30u, con riferimento ai valori numerici riportati in Figura 10-18 (area a Nord Ovest del comparto), si osserva che i battenti in tali celle passano da valori compresi tra 3 e 16 cm a valori compresi tra 9 e 22 cm, mentre in Figura 10-19 (area a Sud Ovest del comparto), si può osservare che i battenti in tali celle passano da valori compresi tra 0 e 4 cm a valori compresi tra 5 e 10 cm. Stante la modesta estensione spaziale delle aree in cui si verifica il localizzato incremento di battente e l’entità dei

battenti in gioco sia allo stato attuale che di progetto, nonché la sussistenza di rischio medio “R2” come definito all’art. 2 lettera m) della L.R.41/2018 anche nello stato di progetto, si ritiene che la realizzazione della sopraelevazione non determini incremento di rischio idraulico.

Gli interventi edilizi sono quindi ammessi a condizione che vengano realizzate opere di sopraelevazione fino ad una quota assoluta pari a 30.00 m s.l.m. (quota comprensiva di un franco idraulico di 0.30 m) per entrambi i comparti. La sopraelevazione potrà essere conseguita su rilevato.

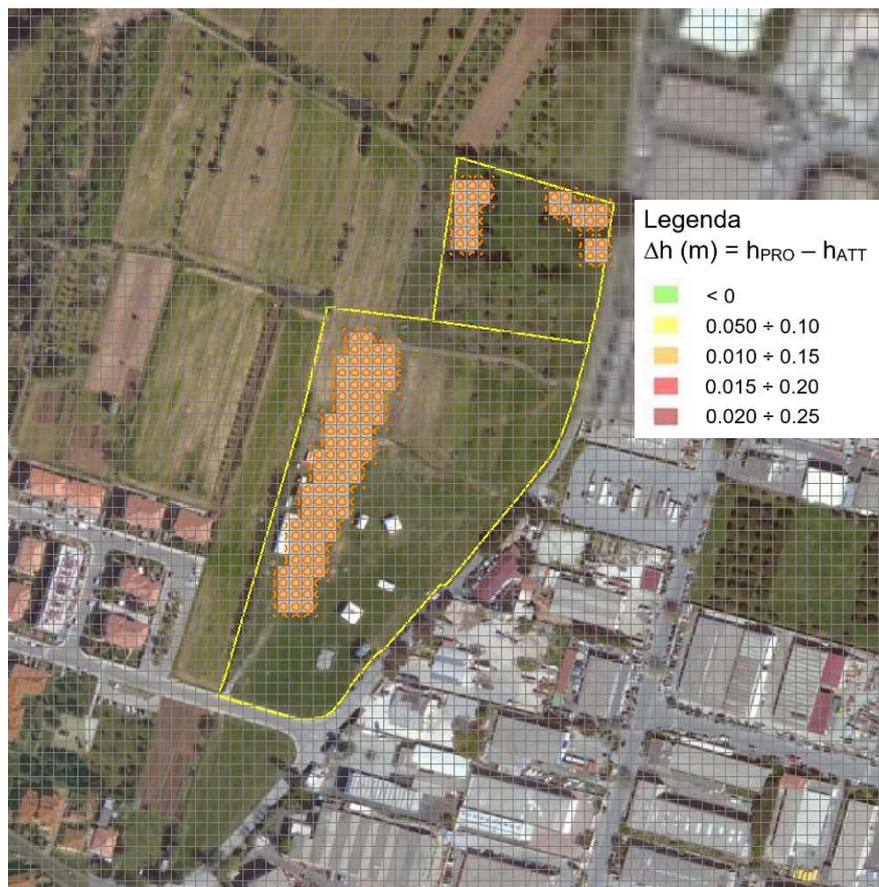


Figura 10-16: Perimetro dei comparti 3-19u e 3-30u e rappresentazione delle celle “ostruite” nello scenario di progetto per simulare la realizzazione della sopraelevazione su rilevato.



Figura 10-17: Perimetro del comparto 3-28u e indicazione delle celle di calcolo in cui si è calcolato un incremento di battente idraulico nello scenario di progetto rispetto allo scenario di stato attuale.

0.099	0.03	0.064	0.073	0.119	0.03	0.03	0.069	0.067	0.06	0.087	0.136	0.109	0.036	0.044	0.017	0.001	0.004	0.033
0.099	0.03	0.064	0.073	0.119	0.03	0.03	0.068	0.065	0.06	0.086	0.135	0.109	0.035	0.041	0.014			0.036
0.079	0.041	0.047	0.046	0.113	0.049	0.033	0.061	0.067	0.058	0.109	0.133	0.09	0.06	0.066	0.03	0.012	0.013	0.051
0.079	0.041	0.047	0.046	0.113	0.049	0.032	0.06	0.065	0.052	0.109	0.133	0.09	0.06	0.066	0.03	0.01	0.016	0.055
0.09	0.056	0.088	0.099	0.089	0.038	0.06	0.063	0.057	0.038	0.135	0.123	0.074	0.06	0.012		0.022	0.03	0.062
0.089	0.056	0.088	0.099	0.089	0.037	0.054	0.064	0.055	0.037	0.135	0.123	0.073	0.06	0.01		0.018	0.03	0.066
0.07	0.071	0.112	0.089	0.06	0.05	0.18	0.15	0.064	0.056	0.164	0.123	0.069	0.041	0.03		0.014	0.03	0.049
0.07	0.071	0.112	0.089	0.06	0.035	0.065	0.06	0.047	0.052	0.157	0.123	0.067	0.041	0.03		0.017	0.03	0.06
0.059	0.079	0.102	0.078	0.045	0.085	0.08	0.072	0.141	0.165	0.156	0.133	0.06	0.06	0.032	0.03	0.03	0.03	0.066
0.059	0.079	0.102	0.079	0.03	0.031	0.08	0.072	0.032	0.088	0.128	0.122	0.06	0.06	0.052	0.03	0.03	0.03	0.067
0.059	0.085	0.101	0.06	0.053	0.122	0.096	0.068	0.03	0.095	0.187	0.142	0.062	0.043	0.031	0.03	0.03	0.044	0.06
0.059	0.086	0.086	0.038	0.03	0.032	0.096	0.068	0.03	0.095	0.132	0.111	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.045	0.06
0.056	0.083	0.083	0.05	0.065	0.058	0.106	0.06	0.03	0.088	0.224	0.184	0.075	0.077	0.051	0.03	0.033	0.061	0.069
0.056	0.083	0.082	0.03	0.03	0.058	0.106	0.06	0.03	0.088	0.155	0.122	0.06	0.066	0.049	0.03	0.034	0.067	0.071
0.056	0.083	0.085	0.041	0.03	0.06	0.11	0.03	0.031	0.136	0.171	0.13	0.068	0.085	0.042	0.038	0.061	0.079	0.061
0.056	0.082	0.076	0.03	0.03	0.06	0.11	0.03	0.031	0.136	0.12	0.099	0.051	0.068	0.041	0.04	0.068	0.083	0.063
0.065	0.09	0.064	0.03	0.03	0.06	0.152	0.03	0.042	0.191	0.172	0.117	0.069	0.098	0.06	0.05	0.031	0.102	0.066
0.063	0.089	0.045	0.03	0.03	0.06	0.152	0.03	0.042	0.191	0.134	0.084	0.06	0.079	0.06	0.051	0.033	0.106	0.069
0.067	0.081	0.03	0.03	0.03	0.094	0.096	0.03	0.03	0.134	0.129	0.093	0.074	0.106	0.061	0.043	0.062	0.107	0.064
0.065	0.077	0.03	0.022	0.03	0.094	0.096	0.03	0.03	0.149	0.125	0.063	0.06	0.091	0.06	0.044	0.066	0.109	0.065
0.041	0.072	0.03	0.016	0.021	0.112	0.086	0.03	0.052	0.187	0.121	0.075	0.082	0.088	0.053	0.042	0.03	0.117	0.051
0.04	0.066	0.023	0.018	0.03	0.112	0.086	0.03	0.052	0.166	0.113	0.06	0.063	0.072	0.052	0.046	0.03	0.121	0.052
0.043	0.041	0.083	0.007	0.05	0.089	0.04	0.03	0.058	0.152	0.126	0.082	0.091	0.084	0.06	0.04	0.03	0.112	0.093
0.04	0.039	0.071	0.03	0.05	0.089	0.04	0.03	0.058	0.147	0.114	0.071	0.08	0.074	0.06	0.051	0.036	0.114	0.095
0.033	0.03	0.099	0.035	0.088	0.090	0.072	0.052	0.117	0.11	0.079	0.06	0.088	0.087	0.041	0.033	0.083	0.123	0.112
0.031	0.03	0.08	0.06	0.088	0.090	0.072	0.052	0.111	0.106	0.066	0.04	0.079	0.079	0.043	0.038	0.085	0.125	0.114
0.03	0.045	0.097	0.058	0.072	0.075	0.072	0.092	0.167	0.133	0.071	0.046	0.066	0.08	0.03	0.03	0.109	0.06	0.072
0.03	0.033	0.089	0.075	0.072	0.075	0.072	0.092	0.131	0.12	0.061	0.033	0.063	0.08	0.03	0.031	0.11	0.061	0.074

Figura 10-18: Perimetro del comparto 3-30u (area a Nord -Ovest) e indicazione delle celle di calcolo con i valori di battente (espresso in metri) nelle configurazioni di progetto (valori di colore nero) e di stato attuale (valori di colore blu).

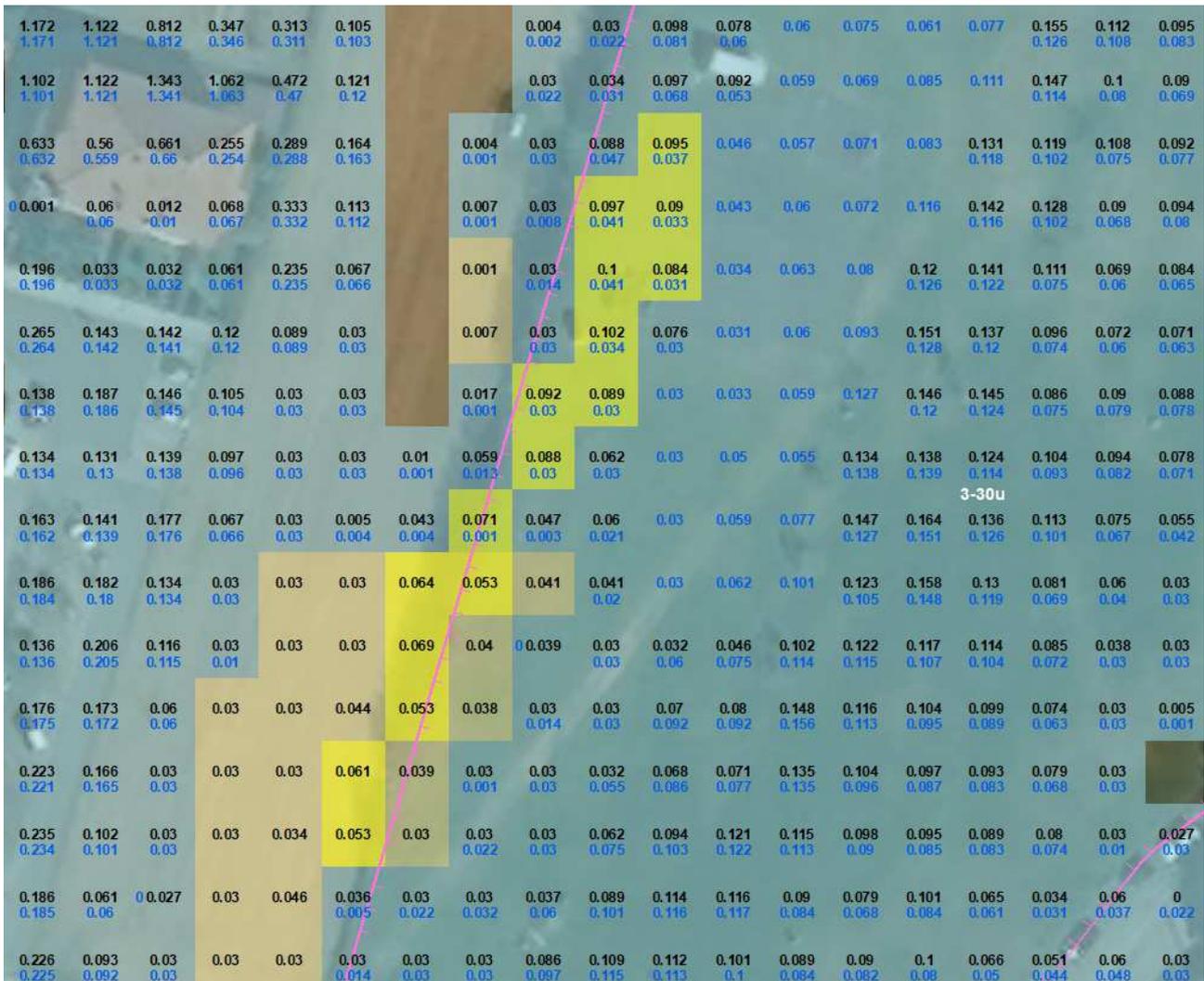


Figura 10-19: Perimetro del comparto 3-30u (Area a Sud Ovest) e indicazione delle celle di calcolo con i valori di battente (espresso in metri) nelle configurazioni di progetto (valori di colore nero) e di stato attuale (valori di colore blu).

## 10.2 Rosignano Sud - PROGETTO

### 10.2.1 Comparto 2-4u e 2-10u

In Figura 10-20 è mostrata la planimetria del modello numerico con indicazione delle celle “ostruite” nella configurazione di progetto al fine di simulare la realizzazione di rilevati.

In Figura 10-21 sono mostrate le celle di calcolo in cui si è stimato un incremento di battente idraulico nello scenario di progetto rispetto allo scenario di stato attuale. Per quanto riguarda il comparto 2-10u, le verifiche mostrano che non si osserva alcun incremento di battente nelle aree adiacenti al comparto: non si configura pertanto alcun incremento di rischio idraulico. Gli interventi edilizi sono quindi ammessi a condizione che vengano realizzate opere di sopraelevazione in rilevato fino ad una quota assoluta pari a 4.95 m s.l.m. (quota comprensiva di un franco idraulico di 0.30 m).

Viceversa, la realizzazione di un rilevato all'interno del comparto 2-4u determinerebbe un significativo incremento dei battenti nelle aree ad Est dello stesso, come desumibile in Figura 10-23 e Figura 10-24. Pertanto, l'intervento edilizio o la realizzazione di parcheggi sono ammessi a condizione che vengano realizzate opere di sopraelevazione fino alla quota assoluta di 5,65 m s.l.m. (quota comprensiva di un franco idraulico di m 0,30), garantendo il non aggravio del rischio mediante tipologie costruttive atte ad assicurare la "trasparenza" idraulica (tipo "pilotis").



Figura 10-20: Perimetro del comparti 2-4u e 2-10u e rappresentazione delle celle "ostruite" nello scenario di progetto per simulare la realizzazione della sopraelevazione su rilevato.

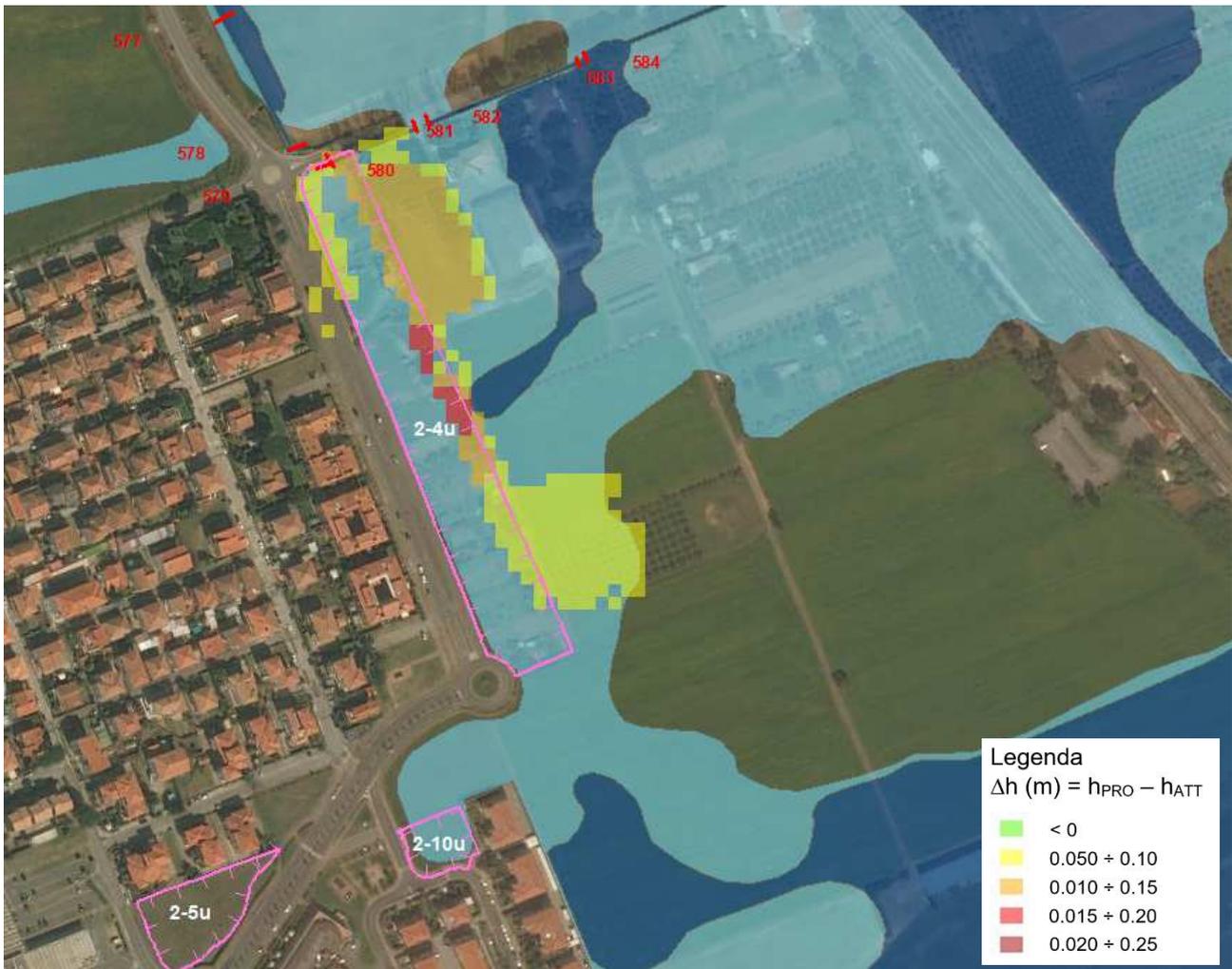


Figura 10-21: Perimetro del comparti 2-4u e 2-10u, con indicazione delle celle di calcolo in cui si è calcolato un incremento di battente idraulico nello scenario di progetto rispetto allo scenario di stato attuale.



Figura 10-22: Perimetro del comparto 2-10u e indicazione delle celle di calcolo con i valori di battente (espresso in metri) nelle configurazioni di progetto (valori di colore nero) e di stato attuale (valori di colore blu).



Figura 10-23: Perimetro del comparto 2-4u (Area a Nord) e indicazione delle celle di calcolo con i valori di battente (espresso in metri) nelle configurazioni di progetto (valori di colore nero) e di stato attuale (valori di colore blu).



Figura 10-24: Perimetro del comparto 2-4u (Area a Sud) e indicazione delle celle di calcolo con i valori di battente (espresso in metri) nelle configurazioni di progetto (valori di colore nero) e di stato attuale (valori di colore blu).



## 11 Considerazioni conclusive

Come anticipato in premessa, per le aree allagabili relative al Fiume Fine, al Torrente Tripesce e al reticolo minore nell'ambito territoriale denominato Città al Mare (Mazzanta) si è fatto riferimento alle perimetrazioni di P.G.R.A. come richiesto dal Genio Civile della Regione Toscana in sede di istruttoria.

È opportuno precisare che i risultati ottenuti con le presenti verifiche idrologiche ed idrauliche sono naturalmente basati sulle conoscenze attuali del sistema idrografico e dei dati idrologici disponibili, nonché sull'ipotesi fondamentale che le sezioni idrauliche dei corsi d'acqua oggetto di verifica siano mantenute in futuro almeno nelle medesime condizioni di officiosità idraulica. I risultati esposti nel presente studio sono vincolati alla sussistenza delle attuali condizioni e assetti del reticolo idrografico idraulicamente rilevante: eventuali future modifiche di tali assetti, ovvero la modifica del quadro conoscitivo indotto da futuri eventi meteorologici estremi, imporranno adeguate revisioni dei risultati qui ottenuti ed esposti.

Inoltre, in relazione anche alla futura evoluzione del processo di espansione edilizia, all'eventuale approvazione di varianti al Piano Operativo, a variazioni significative dell'assetto dell'uso del suolo o delle reti idrauliche naturali o artificiali interferenti con le aree investigate, le analisi qui svolte dovranno essere aggiornate.

Infine, occorre evidenziare che i risultati qui esposti in termini di aree allagabili si riferiscono alla porzione di territorio individuata nelle tavole grafiche allegate con un poligono denominato "Area modellata". Pertanto, nella presente relazione non è espressa alcuna valutazione circa la pericolosità idraulica della porzione di territorio non ricompresa all'interno del suddetto perimetro.

I tecnici incaricati

Ing. Remo Chiarini

Ing. Alessandro Berni

Ing. Luigi Bigazzi