

# INDAGINI IDROLOGICHE IDRAULICHE DI SUPPORTO AL PIANO STRUTTURALE INTERCOMUNALE DEI COMUNI DI PISA E DI CASCINA

## ALLEGATO 3 MODELLO 3 FIUME MORTO RELAZIONE TECNICA ED ALLEGATI

**COMMITTENTE:**



Comune di Pisa  
Via degli Uffizi, 1  
56100 Pisa

Comune di Cascina  
Corso Matteotti, 90  
56021 Cascina



**PROGETTISTI:**

ING. GIACOMO GAZZINI

**CODICE ELABORATO:**

PROGETTO	LOTTO	FASE	DOC	ELABORATO	REV
L 7 3 7	0 1	S 0 2	T	R I I 3	A

REV.

DATA EMISSIONE

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

A

MARZO 2020

G.GAZZINI

G.GAZZINI

G.GAZZINI

## Indice generale

1.	PREMESSA .....	3
1	AREA DI INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO .....	4
1.1	CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO E LORO CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA.....	4
1.2	DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO .....	5
2	APPROCCIO METODOLOGICO.....	6
3	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO .....	7
3.1	CODIFICA DEI BACINI.....	7
3.2	INPUT PLUVIOMETRICI.....	8
3.3	PARAMETRI IDROLOGICI.....	9
3.4	RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDROLOGICA (Q <sub>MAX</sub> ).....	10
4	IMPLEMENTAZIONE MODELLO IDRAULICO.....	12
4.1.1	CARATTERIZZAZIONE TOPOGRAFICA DEI CORSI D'ACQUA E DELLE AREE DI INTERESSE.....	12
4.1.2	MODELLO IDRAULICO.....	13
4.1.3	VERIFICHE IDRAULICHE IMPLEMENTATE.....	14
4.1.4	RISULTATI.....	14
	APPENDICE A: MODELLISTICA IDRAULICA .....	17
A.2.1	MODELLISTICA MONODIMENSIONALE MIKE 11 .....	17
A.2.1.1	MODULO IDRODINAMICO (HD).....	17
A.2.2	DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE .....	17
A.2.3	EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT.....	18
A.2.4	SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA .....	18
A.2.5	APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA .....	19
A.2.6	DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE.....	19
A.2.7	RESISTENZA D'ATTRITO .....	20
A.2.8	CONDIZIONI INIZIALI .....	20
A.2.9	METODO DI SOLUZIONE.....	20
A.2.10	CONDIZIONI AL CONTORNO.....	20
A.2.11	MODELLISTICA BIDIMENSIONALE MIKE 21 .....	20
A.2.12	MODULO IDRODINAMICO (HD).....	21
A.2.13	MODELLISTICA MIKE FLOOD.....	23

## Indice delle figure

<i>Figura 1-1: Individuazione del reticolo idrografico oggetto di studio.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1-2: Studio sulla regionalizzazione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica [sito web Regione Toscana] .....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3-1: Ietogrammi triangolari per Tr 30 anni e Tr 200 anni per d =24 [h].....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3-2: Idrogrammi di Piena per Tempo di Ritorno 30 anni e d=24 [h] .....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3-3: Idrogrammi di Piena per Tempo di Ritorno 200 anni e d=24 [h] .....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4-1: DTM totale costruito dall'unione delle tavole LIDAR fornito dal Committente. ....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4-2: Batimetria di calcolo del dominio di studio del modello bidimensionale; in rosso sono evidenziate le celle poste come inattive. ....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4-3: Fiume Morto – Profilo longitudinale dell'inviluppo dei massimi livelli in alveo dell'evento di piena con tempo di ritorno 30 anni. ....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4-4: Fiume Morto – Profilo longitudinale dell'inviluppo dei massimi livelli in alveo dell'evento di piena con tempo di ritorno 200 anni. ....</i>	<i>16</i>

## Indice delle tabelle

<i>Tabella 1-1: Sezioni fluviali.....</i>	<i>4</i>
<i>Tabella 3-1: Codifiche dei bacini e sottobacini oggetto di analisi idrologica. ....</i>	<i>7</i>
<i>Tabella 3-2: Altezze di pioggia lorda (mm) per eventi con tempo di ritorno TR=30-200. ....</i>	<i>8</i>
<i>Tabella 3-3: Coefficienti di Ragguaglio Kr per d = 24 [h] ed eventi sintetici. ....</i>	<i>8</i>
<i>Tabella 3-4: Tabella di riepilogo dei parametri idrologici. ....</i>	<i>10</i>
<i>Tabella 3-5: Portate massime (mc/s) per TR30 anni e TR 200 anni per d =24 [h]. ....</i>	<i>10</i>

## 1. **PREMESSA**

La scrivente Hydrogeo Ingegneria Srl è incaricata delle Indagini Idrologiche Idrauliche di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Pisa e Cascina, finalizzate alla verifica della pericolosità idraulica ed all'aggiornamento delle mappe di pericolosità idraulica sul territorio comunale.

Ai fini della redazione del presente studio, sono stati considerati gli elementi idrologico-idraulici necessari a caratterizzare la probabilità di esondazione dei corsi d'acqua in riferimento al reticolo di interesse, definendo le pericolosità idrauliche secondo la classificazione di cui al DPGR 25 ottobre 2011, n. 53/R - Regolamento di attuazione in materia di indagini, ovvero:

- aree a pericolosità idraulica molto elevata (I4), che risultano allagabili per eventi con tempo di ritorno inferiore a 30 anni;
- aree a pericolosità idraulica elevata (I3), con aree allagabili per eventi con tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni.

Nella redazione dello studio si è inoltre tenuto conto dei condizionamenti e dei disposti di cui alla L.R. 41/2018 - 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). Modifiche alla L.R. 80/2015 e alla L.R. 65/2014.

Lo studio si propone di aggiornare la pericolosità idraulica all'interno dei territori comunali, su alcuni dei corsi d'acqua presenti, che ricomprendono sia il reticolo principale (Fiume Arno e Scolmatore del Fiume Arno, di competenza dell'Autorità di Distretto Appennino Settentrionale, per il quale lo studio utilizzato ha già contribuito all'aggiornamento delle mappe di pericolosità del PGRA) che il reticolo secondario (di competenza del Genio Civile Valdarno Inferiore e Costa).

Verrà pertanto aggiornata la pericolosità idraulica all'interno del territorio comunale su alcuni corsi d'acqua costituenti la rete idraulica superficiale, al fine di caratterizzare le aree a pericolosità idraulica secondo la classificazione del DPGR 53R/2011.

Si evidenzia come il reticolo di Studio, le modalità e le condizioni al contorno siano state definite con apposita riunione in data 18.02.2020 ai sensi dell'art. 14 comma 6 delle NTA del PGRA, di concerto con Autorità di Distretto Appennino Settentrionale, Genio Civile Valdarno Inferiore e Costa e Comune di Pisa in qualità di Coordinatore del Piano Strutturale Intercomunale.

La presente relazione tecnica descrive il modello implementato per il Fiume Morto per la definizione della pericolosità idraulica del territorio afferente al corso d'acqua.

Il lavoro si articola nelle seguenti fasi operative:

- individuazione e caratterizzazione dell'ambito fisico oggetto di studio: raccolta ed analisi dei dati disponibili, caratterizzazione topografica dei corsi d'acqua;
- modellazione idrologica;
- modellazione idraulica;
- analisi dei risultati e perimetrazione delle aree allagabili;

## 1 AREA DI INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO

Nel presente paragrafo si riporta una sintesi dei dati acquisiti, analizzati ed elaborati per l'implementazione delle analisi oggetto del presente studio.

### 1.1 CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO E LORO CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA

L'ambito di indagine comprende il corso del Fiume Morto ed i suoi affluenti, che concorrono a definire il livello di pericolosità idraulica del territorio a nord dei Comuni di Pisa e Cascina. L'individuazione del reticolo oggetto di studio deriva da una attenta analisi dei dati esistenti, degli studi e dei progetti pregressi e del perimetro dei centri abitati.

A partire dal reticolo idrografico individuato dalla Regione Toscana ai sensi della L.R.79/2012, aggiornato con Delibera di Consiglio 20/2019 ed attualmente vigente, sono stati individuati ed analizzati i principali corsi d'acqua, che direttamente o indirettamente, concorrono potenzialmente a definire le condizioni di allagabilità del territorio urbanizzato all'interno del territorio comunale:

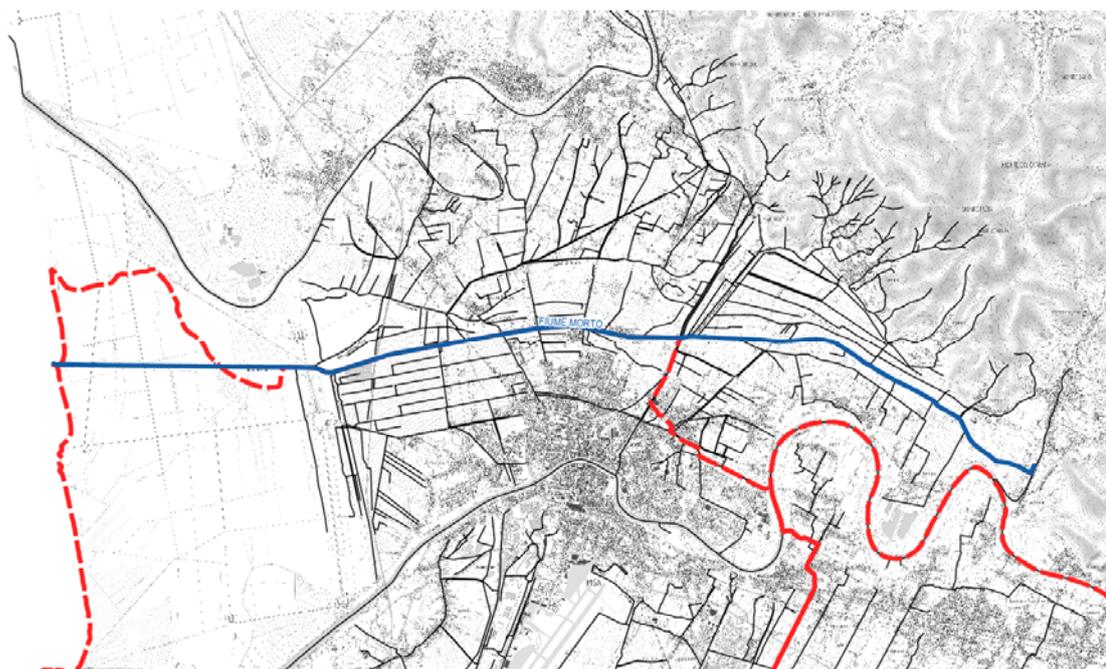


Figura 1-1: Individuazione del reticolo idrografico oggetto di studio

Il corso d'acqua studiato con i relativi affluenti sono riportati negli allegati alla presente relazione (*SOTTOALLEGATO 1: Modello 3 - Tavola dei Bacini*) e nelle Tavole:

- 4A - Modello 3 Fiume Morto - Tavola 1 - Planimetria Modello Idraulico - Quadro 1;
- 4B - Modello 3 Fiume Morto - Tavola 1 - Planimetria Modello Idraulico - Quadro 2.

La caratterizzazione geometrica dei corsi d'acqua deriva da una serie di rilievi topografici a supporto del presente studio. Ove non presenti rilievi topografici, si è provveduto all'estrapolazione delle sezioni fluviali dai rilievi LIDAR disponibili, valutando l'affidabilità dei dati così ricavati attraverso verifiche con strumentazione GPS e confronti diretti con i rilievi disponibili.

Nella seguente tabella sono riportati, per ogni corso d'acqua, la lunghezza del tratto ed il numero di sezioni fluviali utilizzate, nonché la provenienza del dato topografico (lidar/rilievo topografico).

Nome corso d'acqua	Lunghezza [m]	N° sezioni	Provenienza dato topografico
Fiume Morto	1998	18	Rilievi Topografici ex novo
		92	LIDAR

Tabella 1-1: Sezioni fluviali

## 1.2 DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO

Oltre ai dati necessari alla caratterizzazione geometrica dei corsi d'acqua, nell'ambito del presente lavoro sono stati consultati, utilizzati ed elaborati una serie di dati geografici, resi disponibili dalle Amministrazioni sovracomunali che li hanno realizzati ed in particolare:

- Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:10000 e 1:2000. Fonte: Regione Toscana - Carta Tecnica Regionale;
- LIDAR (1x1 m) del Ministero dell'Ambiente, Fonte dei dati: Regione Toscana - "Rilievi LIDAR"
- Modello Digitale del Terreno Idrografico 10k, Fonte dei dati: Regione Toscana - Direzione Urbanistica e Politiche Abitative - Settore Sistema Informativo Territoriale e Ambientale
- Shape file del Reticolo Idrografico, individuato dalla Regione Toscana ai sensi dei disposti della Legge Regionale 79/2012; reticolo aggiornato ed attualmente vigente, approvato con Delibera di Consiglio 20/2019; Fonte dei dati: Regione Toscana <http://www.regione.toscana.it/-/consorzi-di-bonifica-reticolo-idrografico-e-di-gestione>;
- Shape file dei valori di Curve Number a partire dalla pedologia e dall'uso del suolo. Fonte: Regione Toscana - Accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012 <http://www.regione.toscana.it/-/implementazione-di-modello-idrologico-distribuito-per-il-territorio-toscano>.
- Griglie dei parametri caratteristici delle LSPP, a ed n, pubblicate dalla Regione Toscana nell'ambito dello Studio di Regionalizzazione delle Precipitazioni. Fonte: Regione Toscana <http://www.regione.toscana.it/-/nuovi-dati-sulla-regionalizzazione-delle-precipitazioni>.



Figura 1-2: Studio sulla regionalizzazione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica [sito web Regione Toscana]

- Rilievi Topografici eseguiti tramite GPS e Stazione Totale;
- Dati relativi agli Impianti Idrovori forniti dal Consorzio di Bonifica 4 Basso Valdarno.

## 2 APPROCCIO METODOLOGICO

Lo schema metodologico adottato si basa essenzialmente su criteri analitici che, partendo dagli eventi di precipitazione, conduce alla definizione delle aree soggette ad inondazione attraverso la simulazione dei fenomeni di formazione e propagazione dell'onda di piena.

Ai fini dell'individuazione delle aree allagabili, l'approccio deve necessariamente considerare un corso d'acqua nella sua più completa caratterizzazione spaziale, sia in termini d'estensione, sia in termini di contributi laterali provenienti dagli affluenti considerati. La determinazione delle aree soggette ad inondazione dipende, in sostanza, dalla distribuzione spazio-temporale dei volumi di piena; pertanto, in ogni sezione del corso d'acqua, i volumi d'esondazione dipendono, a parità d'evento che li genera, dalla dinamica di propagazione e di laminazione verificatasi nelle sezioni precedenti.

È pertanto necessario, da un lato, stimare gli idrogrammi di piena in arrivo al corso d'acqua e, dall'altro, analizzarne la propagazione e laminazione per effetto di esondazioni, opere, diversivi ed immissioni laterali. Di qui la necessità di un approccio integrato di tipo idrologico-idraulico che consideri l'asta fluviale d'interesse, il relativo bacino afferente e le eventuali connessioni idrauliche laterali.

Le sollecitazioni idrologiche al sistema, costituite in generale da eventi caratterizzati da intensità di pioggia variabili nel tempo e nello spazio e dalle "condizioni iniziali" del bacino idrografico, vengono rappresentate da idrogrammi sintetici definiti in base alle Curve di Possibilità Pluviometrica per preassegnata durata di pioggia e tempo di ritorno. Attraverso la modellistica idrologica, vengono definiti gli idrogrammi di piena nelle sezioni prescelte del corso d'acqua considerato.

La propagazione dei deflussi di piena così generati e la valutazione dei fenomeni esondativi lungo l'asta fluviale considerata avviene tramite modelli idraulici, in grado di fornire in ogni sezione dell'asta fluviale l'idrogramma di piena in transito ed il massimo battente idraulico atteso, in modo tale da poter verificare l'efficienza delle strutture di contenimento o, in caso contrario, la sussistenza di fenomeni esondativi. In questo studio è stato implementato un modello idraulico integrato che permette di combinare l'approccio monodimensionale, per la modellazione idraulica in alveo, a quello bidimensionale per la modellazione idraulica delle aree inondabili. L'integrazione tra i modelli avviene in modo dinamico, garantendo quindi la conservazione di massa e quantità di moto tra i vari sistemi. Gli alvei dei corsi d'acqua vengono modellati attraverso l'inserimento di sezioni trasversali, ricostruite a partire dai rilievi topografici e comprensive di tutte quelle strutture che interferiscono con il deflusso di piena, mentre le aree inondabili sono caratterizzate da un modello digitale del terreno che deriva dal rilievo Lidar. L'accoppiamento dei due modelli avviene attraverso degli appositi elementi che definiscono in ogni sezione fluviale la quota di sfioro in destra e sinistra idraulica e che quindi collegano il modello monodimensionale a quello bidimensionale.

Il bacino idrografico oggetto di studio interessa un territorio a vocazione prevalentemente agricola caratterizzata da basse pendenze.

L'impostazione del presente studio prevede pertanto un solo scenario idrologico:

**"Scenario Globale":** scenario in cui si massimizzano i risultati attesi sull'intero bacino, considerando delle piogge ragguagliate sull'area complessiva.

### 3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO

Di seguito viene illustrata la modellistica idrologica implementata per la determinazione degli input pluviometrici e degli idrogrammi di piena.

I contributi idrologici, utilizzati quali input del modello idraulico, sono stati calcolati con metodologia omogenea su tutto il territorio oggetto di indagine. Il modello numerico utilizzato per la determinazione dei contributi idrologici al reticolo idraulico oggetto di studio è composto da un modello di infiltrazione (il calcolo delle perdite di pioggia), e da un modello afflussi-deflussi per la trasformazione degli input pluviometrici netti, in idrogrammi sollecitanti il reticolo idraulico.

La definizione dei bacini contribuenti a ciascuna asta fluviale oggetto di studio è avvenuta attraverso una analisi morfologica del territorio ricavata dalla base Lidar.

Per la determinazione degli idrogrammi di piena si è utilizzato il codice di calcolo HEC-HMS v. 4.3.

Le perdite di bacino sono state stimate mediante il metodo CN del Soil Conservation Service (SCS) americano. In questo metodo l'effetto combinato dei seguenti fattori:

1) caratteristiche idrologiche del suolo

2) uso del suolo

3) grado di umidità precedente l'evento piovoso

è rappresentato globalmente dal parametro CN che permette di stimare le perdite per infiltrazione.

I valori di CN sono stati mutuati dallo shapefile pubblicato della Regione Toscana nell'ambito dell'aggiornamento del Modello Idrologico distribuito sviluppato dal Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, nell'ambito dell'Accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012.

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi utilizzato è il metodo dell'IUH sviluppato dal Soil Conservation Service.

L'idrogramma unitario S.C.S. è di tipo parametrico e si basa su una serie di dati raccolti su bacini agricoli degli USA.

Le equazioni parametriche così ottenute vengono utilizzate per calcolare la portata di picco e la durata dell'idrogramma dei deflussi a partire dalla definizione del tempo di ritardo del bacino idrografico considerato.

L'unico parametro richiesto dal metodo è il tempo di ritardo,  $t_{lag}$ , del bacino idrografico considerato.

Per i dettagli sulla modellistica idrologica si rimanda ai paragrafi successivi.

#### 3.1 CODIFICA DEI BACINI

I bacini afferenti all'area di studio sono stati suddivisi in sottobacini e studiati dal punto di vista idrologico tenendo conto dei tratti fluviali simulati idraulicamente e della presenza di contributi laterali al reticolo di interesse. Sulla base di questo sono stati individuati bacini e sottobacini identificati da un codice di 4 caratteri, con progressione numerica nord-sud e da monte verso valle, nel modo seguente:

le prime due cifre rappresentano il codice del bacino di appartenenza;

le ultime due cifre rappresentano l'eventuale presenza di sottobacini.

Nella tabella sottostante si riporta l'elenco dei bacini oggetto di analisi idrologica (riportati in *SOTTOALLEGATO 1: Modello 3 - Tavola dei Bacini*).

Nome Corso d'Acqua	Codice	Area bacino [kmq]
BACINO TOTALE FIUME MORTO	1000	92.86
Bacino Morto Monte	1001	2.15
Bacino Rio Della Tana	1002	2.70
Bacino Fosso Barsanti	1003	9.73
Bacino Fosso Monte Acque Calde	1004	8.02
Bacino Fosso Carbonaia	1005	7.07
Bacino Fosso Martraversino	1006	1.90
Interbacino Morto Centro	1007	4.30
Bacino Fosso Pietrasanta	1008	11.53
Bacino Fosso Doppio Monte	1009	21.14
Bacino Fosso Doppio Valle	1010	8.92
Interbacino Fosso Madonna Dell'Acqua	1011	1.46
Bacino Fosso Della Cuccia	1012	13.95

Tabella 3-1: Codifiche dei bacini e sottobacini oggetto di analisi idrologica.

### 3.2 INPUT PLUVIOMETRICI

Gli eventi meteorici studiati fanno riferimento a tempi di ritorno di 30 e 200 anni.

Si è scelto di studiare un'unica durata dell'evento meteorico sintetico corrispondente alla "durata critica" dell'intero bacino del Fiume Morto (durata che massimizza la portata al colmo alla sezione di chiusura del bacino).

L'aggiornamento dell'analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme fino all'anno 2012, pubblicate dalla Regione Toscana costituisce la nuova base dati su cui implementare le analisi idrologiche. (elaborati nell'ambito dell'Accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012 al fine di procedere ad un'implementazione e un aggiornamento del quadro conoscitivo idrologico del territorio toscano).

I risultati di tale studio hanno portato alla determinazione delle curve segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP), cioè della relazione che lega l'altezza di precipitazione alla durata dell'evento meteorico che l'ha generata, per un assegnato tempo di ritorno. La LSPP è comunemente descritta da una legge di potenza del tipo:

$$h(t) = a t^n$$

con: h = altezza di pioggia [mm]; t = durata [ore], a e n parametri caratteristici per i tempi di ritorno considerati.

Nella Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. seguente sono riportate le altezze di pioggia (in mm), calcolate secondo la metodologia individuata dalla Regione Toscana, per ogni tempo di ritorno considerato per la sola durata critica considerata. Data la modesta estensione areale dei bacini oggetto di studio e la modesta variabilità dei valori di pioggia attesi sul territorio comunale, si è assunto un unico valore di pioggia per l'intero areale di studio, ricavato come media pesata dei valori di pioggia attesi nelle celle di discretizzazione dello studio di regionalizzazione.

d [h]	h <sub>30</sub> [mm]	h <sub>200</sub> [mm]
24	158.1	238.7

Tabella 3-2: Altezze di pioggia lorda (mm) per eventi con tempo di ritorno TR=30-200.

Osservando sperimentalmente le piogge intense è possibile affermare che, all'interno di una certa area, l'intensità di precipitazione durante l'evento piovoso varia da punto a punto, anche in maniera sensibile, e questa variazione è tanto maggiore quanto maggiore è l'estensione dell'area considerata. Per questo alla precipitazione lorda, calcolata rispetto alla sezione di calcolo, si applica un coefficiente di ragguaglio dipendente dall'area del bacino e dalla durata dell'evento, in linea con la trattazione riportata nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana, secondo la seguente formulazione:

$$K_r = 1 - \exp(\alpha t^\beta) + \exp(\alpha t^\beta - \gamma A)$$

dove t è la durata dell'evento, A è l'area del bacino sotteso e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono parametri dipendenti dalle caratteristiche del bacino considerato.

Il coefficiente di ragguaglio dipende quindi dallo scenario idrologico considerato. Nel caso in esame, le piogge sono state ragguagliate all'area dell'intero Bacino del Fiume Morto. Nella seguente Tabella 3-3 si riportano i valori dei coefficienti di ragguaglio Kr.

Kr (d=24 [h])	h <sub>30_ragg</sub> [mm]	h <sub>200_ragg</sub> [mm]
0.913	144.25	217.80

Tabella 3-3: Coefficienti di Ragguaglio Kr per d = 24 [h] ed eventi sintetici.

Gli ietogrammi di pioggia di progetto sono stati assunti a forma triangolare (Figura 3-1).

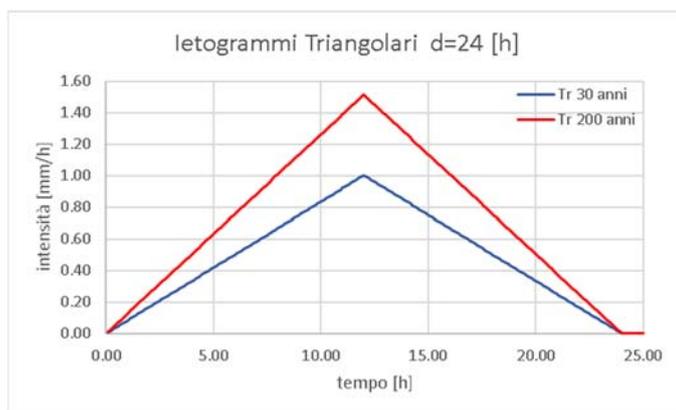


Figura 3-1: Ietogrammi triangolari per Tr 30 anni e Tr 200 anni per d =24 [h].

### 3.3 PARAMETRI IDROLOGICI

*Per i bacini riportati in*

Nome Corso d'Acqua	Codice	Area bacino [kmq]
BACINO TOTALE FIUME MORTO	1000	92.86
Bacino Morto Monte	1001	2.15
Bacino Rio Della Tana	1002	2.70
Bacino Fosso Barsanti	1003	9.73
Bacino Fosso Monte Acque Calde	1004	8.02
Bacino Fosso Carbonaia	1005	7.07
Bacino Fosso Martraversino	1006	1.90
Interbacino Morto Centro	1007	4.30
Bacino Fosso Pietrasanta	1008	11.53
Bacino Fosso Doppio Monte	1009	21.14
Bacino Fosso Doppio Valle	1010	8.92
Interbacino Fosso Madonna Dell'Acqua	1011	1.46
Bacino Fosso Della Cuccia	1012	13.95

Tabella 3-1 è stato definito il bacino idrografico contribuente sulla base della morfologia del territorio ricavata dal Lidar.

Per la stima delle perdite è stato adottato il metodo del Curve Number del S.C.S. I valori del parametro CN per ogni bacino è stato determinato come media pesata della distribuzione dei valori CN\_III ricavati dallo shape regionale. Il valore di CN\_III è stato determinato tramite il valore di CN\_II indicato nel sopracitato studio tramite la seguente relazione:

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + (0.13 * CN(II))}$$

Il parametro tempo di ritardo,  $t_{lag}$ , necessario per la trasformazione afflussi-deflussi del metodo dell'IUH sviluppato del S.C.S. è stato stimato mediante la formulazione suggerita dal S.C.S.:

$$t_{lag} = 0.342 \frac{L^{0.8}}{i^{0.5}} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}$$

I risultati completi della parametrizzazione idrologica appena descritta sono riportati in Tabella 3-4.

Codice	Bacino	Area [kmq]	CN_III	L <sub>max</sub> [km]	H <sub>max</sub> [m]	H <sub>min</sub> [m]	H <sub>media</sub> [m]	i [%]	Tc_scs [h]
1001	Bacino Morto Monte	2.15	90.9	2.74	20.9	-5.2	6.6	0.42%	3.2
1002	Bacino Rio Della Tana	2.70	85.1	2.89	500.0	4.0	90.3	2.57%	1.7
1003	Bacino Fosso Barsanti	9.73	81.6	5.05	820.0	-1.6	200.1	3.93%	2.4
1004	Bacino Fosso Monte Acque Calde	8.02	86.5	5.33	580.0	-0.3	75.9	1.41%	3.5
1005	Bacino Fosso Carbonaia	7.07	90.1	6.74	10.4	-0.2	3.6	0.06%	18.4
1006	Bacino Fosso Martraversino	1.90	91.6	1.78	5.4	-0.3	2.3	0.14%	3.8
1007	Interbacino Morto Centro	4.30	92.1	2.73	5.0	-0.3	1.8	0.08%	7.1
1008	Bacino Fosso Pietrasanta	11.53	91.5	7.45	12.1	-0.5	3.5	0.05%	19.5
1009	Bacino Fosso Doppio Monte	21.14	86.7	8.93	438.2	0.0	25.5	0.28%	11.8
1010	Bacino Fosso Doppio Valle	8.92	86.8	5.37	10.0	-1.1	2.7	0.07%	15.9
1011	Interbacino Fosso Madonna Dell'Acqua	1.46	90.2	1.23	2.9	-0.1	1.7	0.15%	2.9
1012	Bacino Fosso Della Cuccia	13.95	86.7	4.86	7.0	-0.8	1.4	0.04%	18.9

Tabella 3-4: Tabella di riepilogo dei parametri idrologici.

### 3.4 RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDROLOGICA (Q<sub>MAX</sub>)

Utilizzando il codice di calcolo HEC-HMS v. 4.3, per entrambi i Tempi di Ritorno considerati, si sono determinati gli idrogrammi di piena su ciascuno bacino/interbacino di interesse.

A sintesi della analisi idrologica implementata, si riportano di seguito i risultati ottenuti in termini di valori della portata al colmo al variare del tempo di ritorno e della durata dell'evento meteorico.

Codice	Bacino	CN_III	TI [min]	Q <sub>max</sub> [mc/s]	
				Tr 030 anni	Tr 200 anni
1001	Bacino Morto Monte	90.9	114.85	5.9	9.3
1002	Bacino Rio Della Tana	85.1	60.69	7.2	11.8
1003	Bacino Fosso Barsanti	81.6	86.26	23.3	39.5
1004	Bacino Fosso Monte Acque Calde	86.5	127.34	20.6	33.6
1005	Bacino Fosso Carbonaia	90.1	663.72	12	19.3
1006	Bacino Fosso Martraversino	91.6	138.50	5.3	8.3
1007	Interbacino Morto Centro	92.1	256.21	10.9	17.1
1008	Bacino Fosso Pietrasanta	91.5	700.58	19.4	30.8
1009	Bacino Fosso Doppio Monte	86.7	425.60	41.3	67.5
1010	Bacino Fosso Doppio Valle	86.8	572.35	15.2	25
1011	Interbacino Fosso Madonna Dell'Acqua	90.2	104.37	4.2	6.7
1012	Bacino Fosso Della Cuccia	86.7	679.54	21.6	35.5

Tabella 3-5: Portate massime (mc/s) per TR30 anni e TR 200 anni per d = 24 [h].

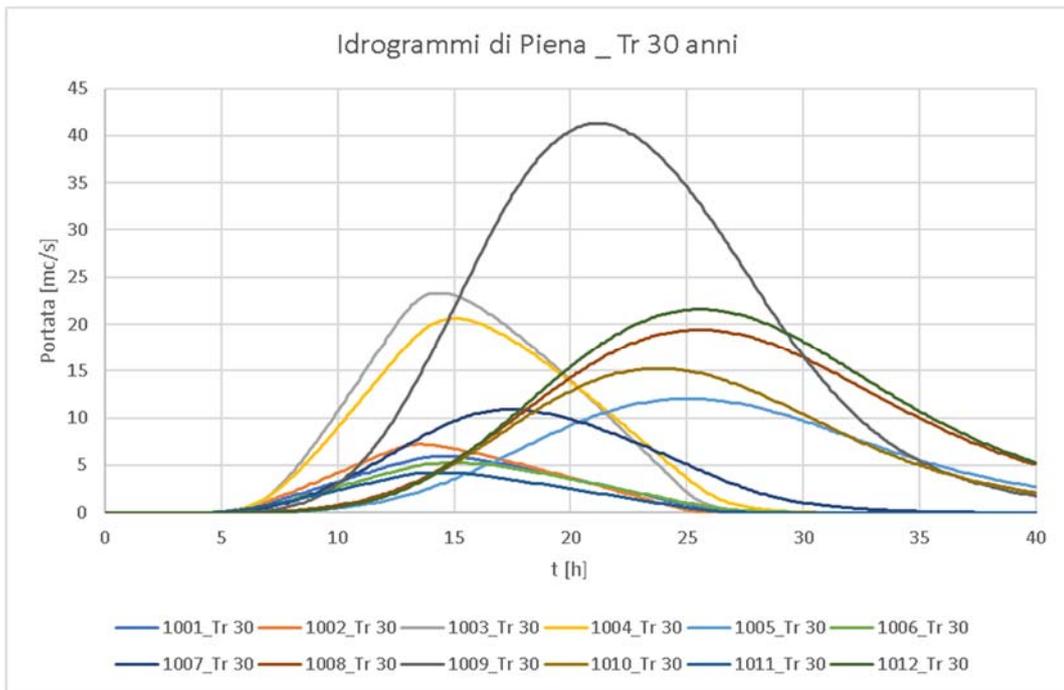


Figura 3-2: Idrogrammi di Piena per Tempo di Ritorno 30 anni e  $d=24$  [h]

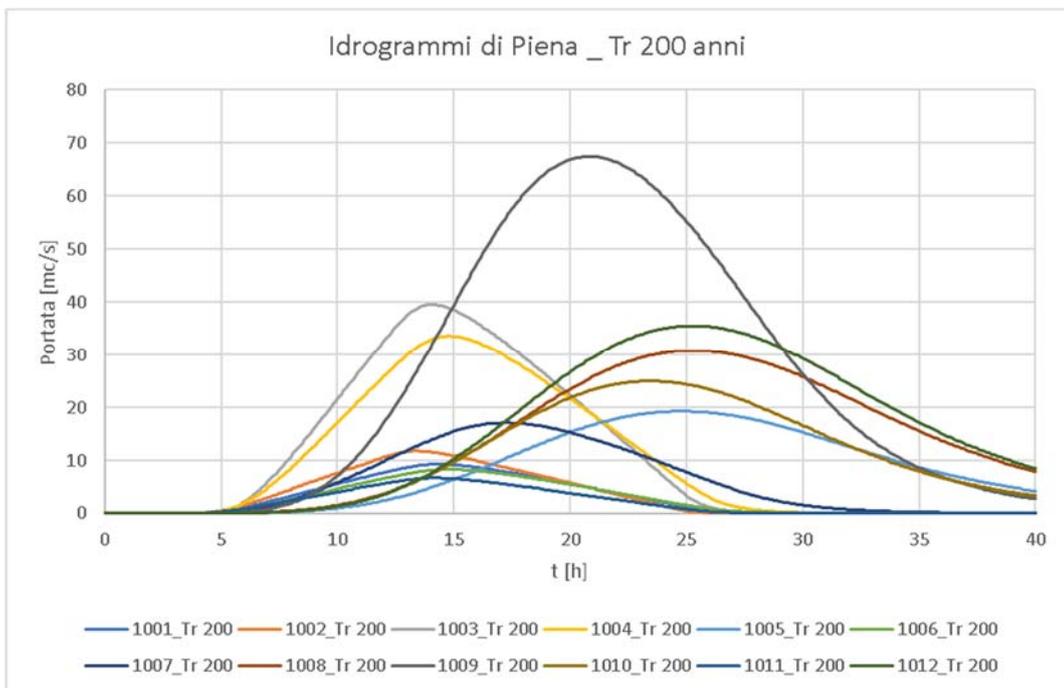


Figura 3-3: Idrogrammi di Piena per Tempo di Ritorno 200 anni e  $d=24$  [h]

## 4 IMPLEMENTAZIONE MODELLO IDRAULICO

### 4.1.1 CARATTERIZZAZIONE TOPOGRAFICA DEI CORSI D'ACQUA E DELLE AREE DI INTERESSE

La caratterizzazione geometrica del Fiume Morto è stata ricavata da una specifica campagna di rilievi topografici, integrata dalle informazioni altimetriche di elevata risoluzione messe a disposizione dal modello digitale del terreno realizzato con i voli Lidar dal Ministero dell'Ambiente (modello con risoluzione di cella 1m).

In dettaglio i rilievi topografici hanno permesso di rappresentare le geometrie delle sezioni e dei manufatti presso tutti gli attraversamenti interessanti il corso d'acqua, in totale pari a 18 opere, mentre per l'intero sviluppo del corso d'acqua le sezioni sono state estratte dal DTM Lidar con risoluzione 1m, con un interasse mediamente pari a 250 m, per un totale di 110 sezioni.

Poiché il DTM Lidar risulta affetto dalla presenza di acqua in alveo, non essendo tale tecnologia in grado di rilevare la profondità della sezione al di sotto del pelo libero della corrente, è risultato necessario quantificare l'entità di tale effetto nelle sezioni estratte da DTM, previo confronto con quelle rilevate presso gli attraversamenti.

Il corso d'acqua è caratterizzato, soprattutto nella parte terminale, da una debolissima pendenza, che facilita la presenza di tiranti non trascurabili di acqua in alveo anche a diversi km dalla foce, con una conseguente errata rappresentazione della capacità di invaso delle sezioni estratte. A fronte del confronto con le sezioni rilevate, si è stimata approssimativamente pari a -1 m s.l.m. la quota di fondo dell'alveo per circa 10 km procedendo dalla foce verso monte, indicativamente fino all'attraversamento identificato come n°6 nel rilievo topografico. A monte dell'attraversamento n°6, fino a quello n°13, per uno sviluppo di circa 2,5 km, si è stimata una quota di fondo alveo pari a -0.5 m s.l.m. Procedendo ulteriormente verso monte, tra gli attraversamenti n°13 e 16, per un tratto di circa 2.5 km, si è stimata una quota di fondo alveo pari a 0 m s.l.m. Ulteriormente più a monte, invece, la forma delle sezioni e il loro raffronto con quelle rilevate a permesso di ipotizzare l'assenza di acqua, senza quindi la necessità di apportare modifiche alle sezioni estratte da DTM.

Si precisa che le quote di fondo alveo ipotizzate sono state valutate secondo un approccio cautelativo, al fine di non sovrastimare la capacità di deflusso dell'alveo e conseguentemente sottostimare le esondazioni in caso di eventi di piena.

L'intero corso d'acqua, di estensione pari a circa 20 km, è stato pertanto schematizzato con un totale di 110 sezioni.

Per l'individuazione planimetrica delle sezioni fluviali utilizzate nella modellazione idraulica si rimanda seguenti elaborati:

- 4A: *Modello 3 Fiume Morto - Tavola 1 - Planimetria Modello Idraulico - Quadro 1*
- 4B: *Modello 3 Fiume Morto - Tavola 1 - Planimetria Modello Idraulico - Quadro 2*

Per la modellazione dei territori limitrofi è stato acquisito il modello digitale del terreno fornito dal Committente, avente risoluzione di cella pari a 5m, costruito operando operazioni di processamento delle tavole DTM Lidar di risoluzione 1 m del Ministero dell'Ambiente. Tale DTM in particolare rappresenta, per ogni cella di 5 m, il valor medio di quota delle corrispondenti 25 celle di risoluzione 1m, tranne sulle cosiddette "breaklines", cioè elementi sovramontanti che possono determinare ad esempio le quote di sormonto presso manufatti arginali, in cui invece la quota della cella di 5m rappresenta il valore massimo dei 25 valori delle corrispondenti celle da 1m.

Infine, il DTM fornito dal Committente, opportunamente esteso dove necessario, si caratterizza per un minore livello di dettaglio nelle aree meno prossime al territorio comunale pisano, fermo restando la coerenza complessiva del dato topografico rappresentato e la non inerenza di ciò con le dinamiche di sormonto arginale, essendo le sezioni per l'intero corso d'acqua estratte dal DTM Lidar in formato originario con risoluzione 1m.

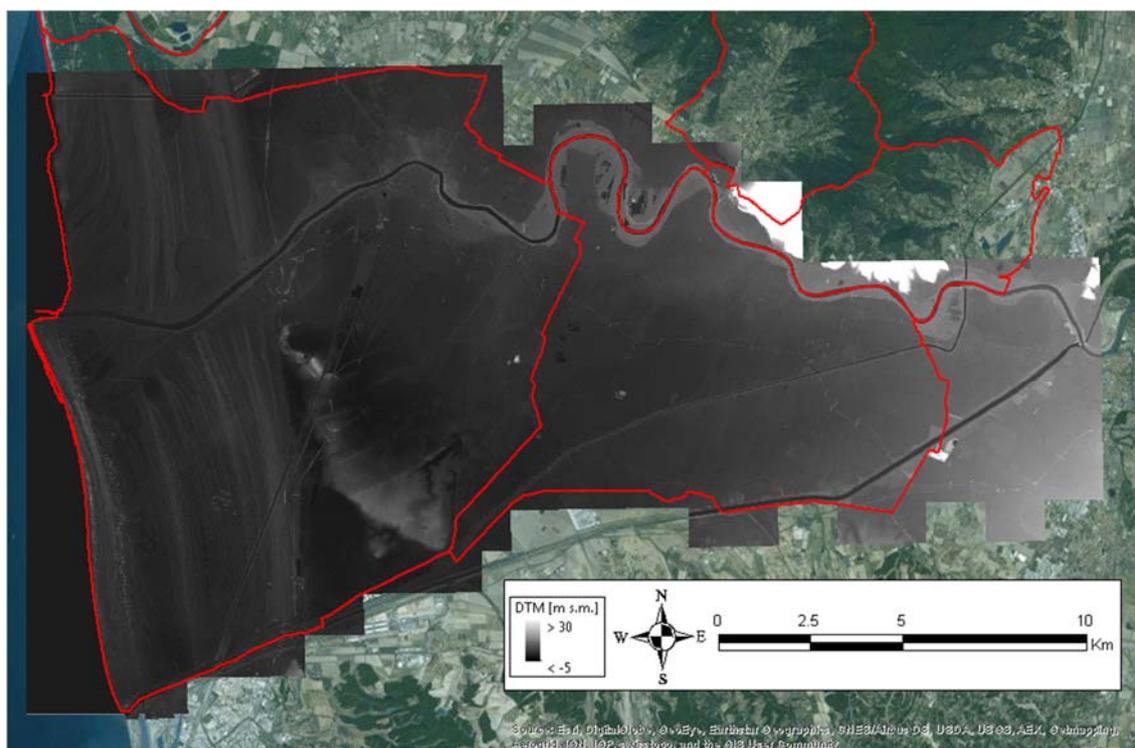


Figura 4-1: DTM totale costruito dall'unione delle tavole LIDAR fornito dal Committente.

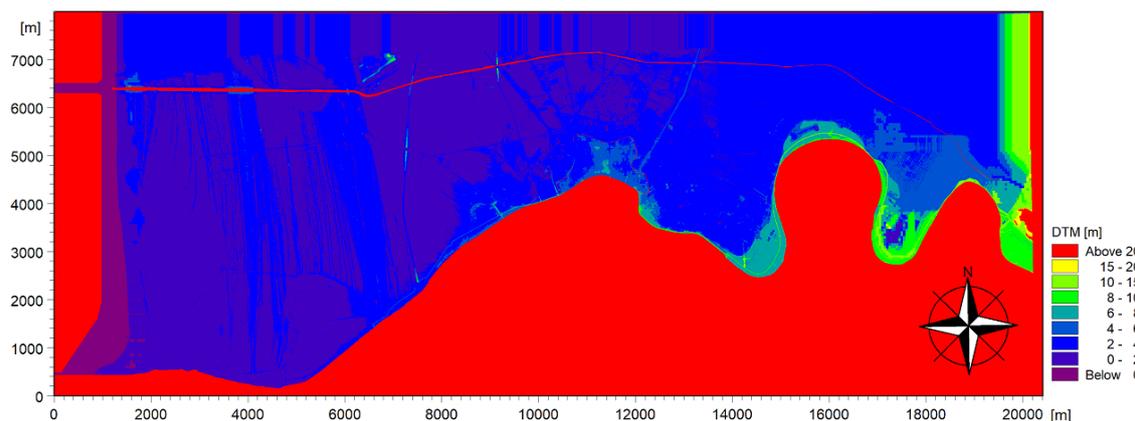


Figura 4-2: Batimetria di calcolo del dominio di studio del modello bidimensionale; in rosso sono evidenziate le celle poste come inattive.

#### 4.1.2 MODELLO IDRAULICO

L'implementazione della modellistica idraulica, è stata effettuata attraverso il Software MIKE del Danish Hydraulic Institute – DHI, certificato dalla F.E.M.A. (Federal Emergency Management Agency).

Per il caso in esame, sono state implementate modellistiche accoppiate con il modulo Mike Flood, monodimensionali in alveo e bidimensionali nelle aree contermini, determinando le aree allagate in termini di battenti, livelli e velocità di propagazione.

Il comportamento idraulico in alveo del reticolo idrografico di verifica è stato simulato attraverso un modello monodimensionale (MIKE 11) con la schematizzazione geometrica delle sezioni fluviali ricavata dal rilievo topografico. Le acque esondate e la loro propagazione sono state simulate con un modello bidimensionale (MIKE21), a partire dal modello digitale del terreno precedentemente descritto.

MIKE FLOOD permette l'accoppiamento dei due modelli in modo totalmente dinamico, garantendo la conservazione di massa e quantità di moto tra i diversi sistemi.

In termini di ulteriore caratterizzazione del modello monodimensionale del corso d'acqua, si è assunto un valore di scabrezza di Strickler pari a  $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  per l'intero sviluppo longitudinale. Quali condizioni al contorno è stato considerato un livello costante alla foce pari a 0.5 m s.l.m., mentre le forzanti sono rappresentate dagli input determinati dall'analisi idrologica.

In dettaglio gli idrogrammi di piena determinati dall'analisi idrologica per ciascuno dei sottobacini contribuenti, sono stati assegnati al corso d'acqua in modo concentrato, considerando i punti di immissione del reticolo secondario affluente al corso d'acqua per ciascun sottobacino.

A ciò fanno eccezione i due sottobacini identificati nel modello idrologico con Codice 1001 e 1007 i cui contributi sono stati attribuiti in modalità distribuita, per la porzione di corso d'acqua afferente, essendo presente una pluralità di punti di immissione. In ultimo sono stati considerati tre contributi addizionali per i tre impianti idrovori di Campaldo, Lamapiena e San Rossore, considerando per ciascuno un valore costante e pari alla capacità dell'impianto, corrispondente rispettivamente a 5,85 m<sup>3</sup>/s, 1,6 m<sup>3</sup>/s e 2,4 m<sup>3</sup>/s.

#### 4.1.3 VERIFICHE IDRAULICHE IMPLEMENTATE

Gli scenari di verifica implementati sono il risultato della combinazione fra scenari idrologici e scenari geometrici.

I primi consentono di individuare le sollecitazioni al reticolo idrografico schematizzato in funzione della probabilità di accadimento dell'evento meteorico simulato e della durata dello stesso; i secondi rappresentano le configurazioni territoriali che saranno cimentate alle sollecitazioni calcolate.

Nel caso in esame, si fa riferimento ad un unico scenario geometrico, rappresentativo del corso d'acqua fiume Morto nella sua configurazione attuale.

Gli scenari idrologici implementati sono quelli già richiamati e descritti al precedente paragrafo, ovvero gli eventi di piena con TR=30-200 anni e durata di pioggia 24 [h].

#### 4.1.4 RISULTATI

Sulla base del quadro conoscitivo su descritto, si è giunti alla caratterizzazione delle condizioni di pericolosità idraulica indotte dal corso d'acqua del fiume Morto per la sua intera estensione.

Le verifiche idrologiche idrauliche del modello del fiume Morto mostrano una dinamica di esondazione simile nei due eventi di piena con tempo di ritorno 30 e 200 anni, dove nel secondo caso l'entità dei sormonti arginali, e conseguentemente i volumi di allagamento, risultano maggiori. In termini generali si possono identificare quattro aree di esondazione tra loro chiaramente distinguibili.

Procedendo da monte verso valle, il primo tratto ad evidenziare esondazioni è in prossimità del primo attraversamento (opera n°18 del rilievo) che genera un significativo rigurgito per effetto della sezione defluente ridotta.

Successivamente si osserva un sormonto arginale, per entrambe le sponde, abbastanza continuativo seppur di entità moderata, nel tratto con intervallo di progressive indicativamente tra 4000 m e 7800 m, cioè fino all'intersezione con il canale Ripafratta. Questo canale pensile, e i relativi manufatti, contengono infatti tutte le esondazioni che si realizzano a monte, separandole nettamente da quelle che poi successivamente si verificano a valle. In particolare, tutte le esondazioni che si verificano a monte dell'intersezione con il canale Ripafratta non raggiungono il territorio del Comune di Pisa, limitandosi a coinvolgere solo quello del Comune di San Giuliano Terme e in misura marginale quello del Comune di Calci.

Successivamente si osserva il terzo tratto di esondazione, anche in questo caso abbastanza continuativo e per entrambe le sponde, che si origina poco a valle dell'attraversamento del canale Ripafratta, fino indicativamente alla progressiva 14500m (approssimativamente 1 km a valle dell'attraversamento dell'opera n°1 del rilievo), quindi complessivamente per circa 7 km. Le esondazioni originate da questo tratto, analizzando nello specifico la sponda sinistra, raggiungono per i due eventi di piena analizzati un'estensione abbastanza simile nell'area a nord-est ed est del centro della Città di Pisa, mentre nella parte nord, in particolare nell'area compresa tra la linea ferroviaria Pisa-Lucca e la Statale SS12, l'evento duecentennale coinvolge un'area di allagamento significativamente maggiore di quello trentennale. Infine si evidenzia un quarto ed ultimo tratto di esondazione, con allagamenti limitati alla sponda sinistra e abbastanza circoscritti e sovrapponibili in termini di estensione tra i due eventi di piena, in un tratto posto immediatamente a valle di quello precedente e compreso tra l'ippodromo e l'impianto idrovoro di San Rossore.

I risultati relativi alle aree allagate, i risultati sono sintetizzati, in termini di battenti e velocità massime attese ricavate dall'involuppo di tutti gli eventi simulati, nelle seguenti tavole:

- 4C Modello 3 Fiume Morto - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni - Quadro 1
- 4D Modello 3 Fiume Morto - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni - Quadro 2
- 4E Modello 3 Fiume Morto - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni - Quadro 1
- 4F Modello 3 Fiume Morto - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni - Quadro 2
- 4G Modello 3 Fiume Morto - Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni - Quadro 1
- 4H Modello 3 Fiume Morto - Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni - Quadro 2
- 4I Modello 3 Fiume Morto - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni - Quadro 1
- 4L Modello 3 Fiume Morto - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni - Quadro 2

Per la consultazione del modello idraulico si precisa che i files sono già in possesso delle Autorità Idrauliche competenti (Autorità di Bacino Distrettuale Appennino Settentrionale e Genio Civile Toscana Sud).

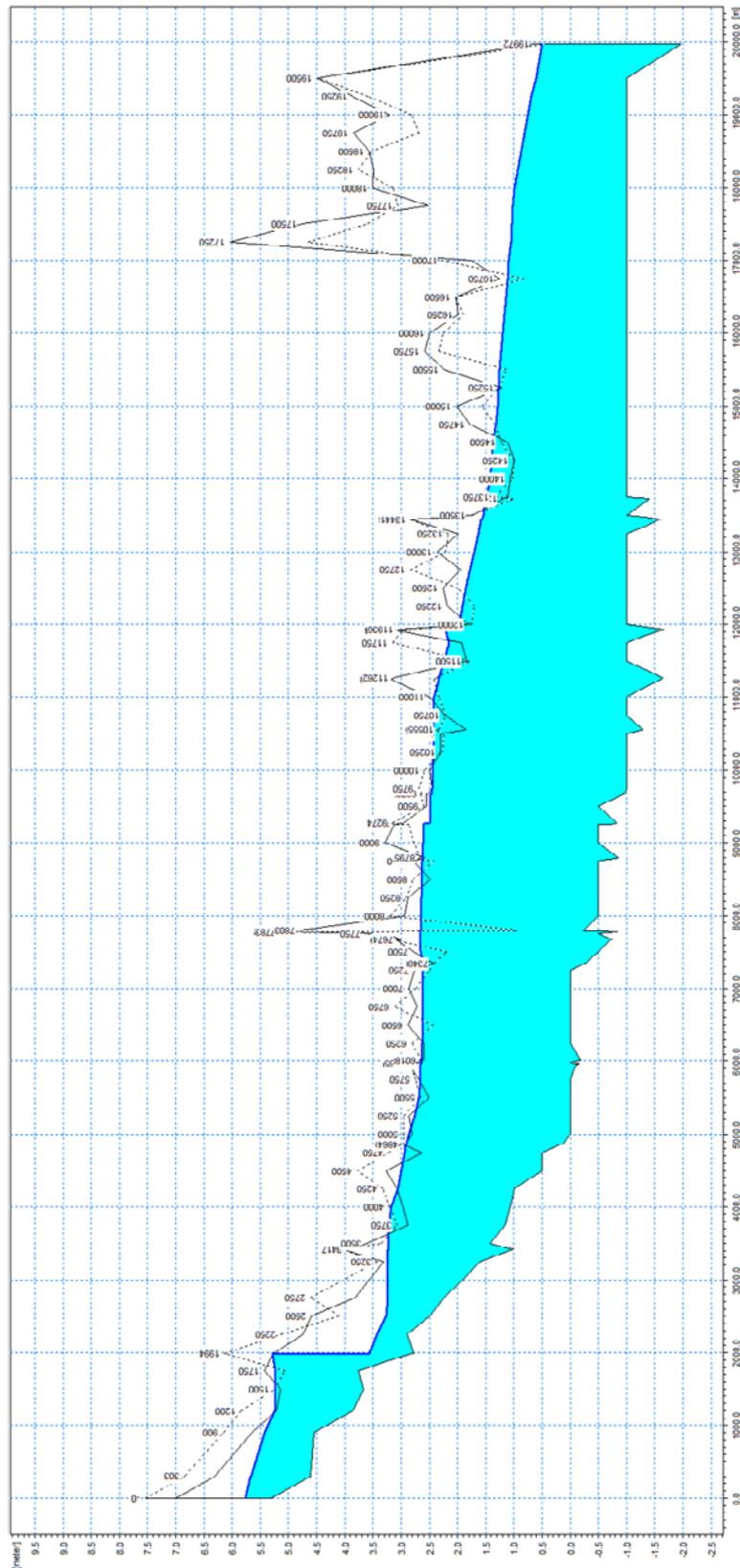


Figura 4-3: Fiume Morto – Profilo longitudinale dell'involuppo dei massimi livelli in alveo dell'evento di piena con tempo di ritorno 30 anni.

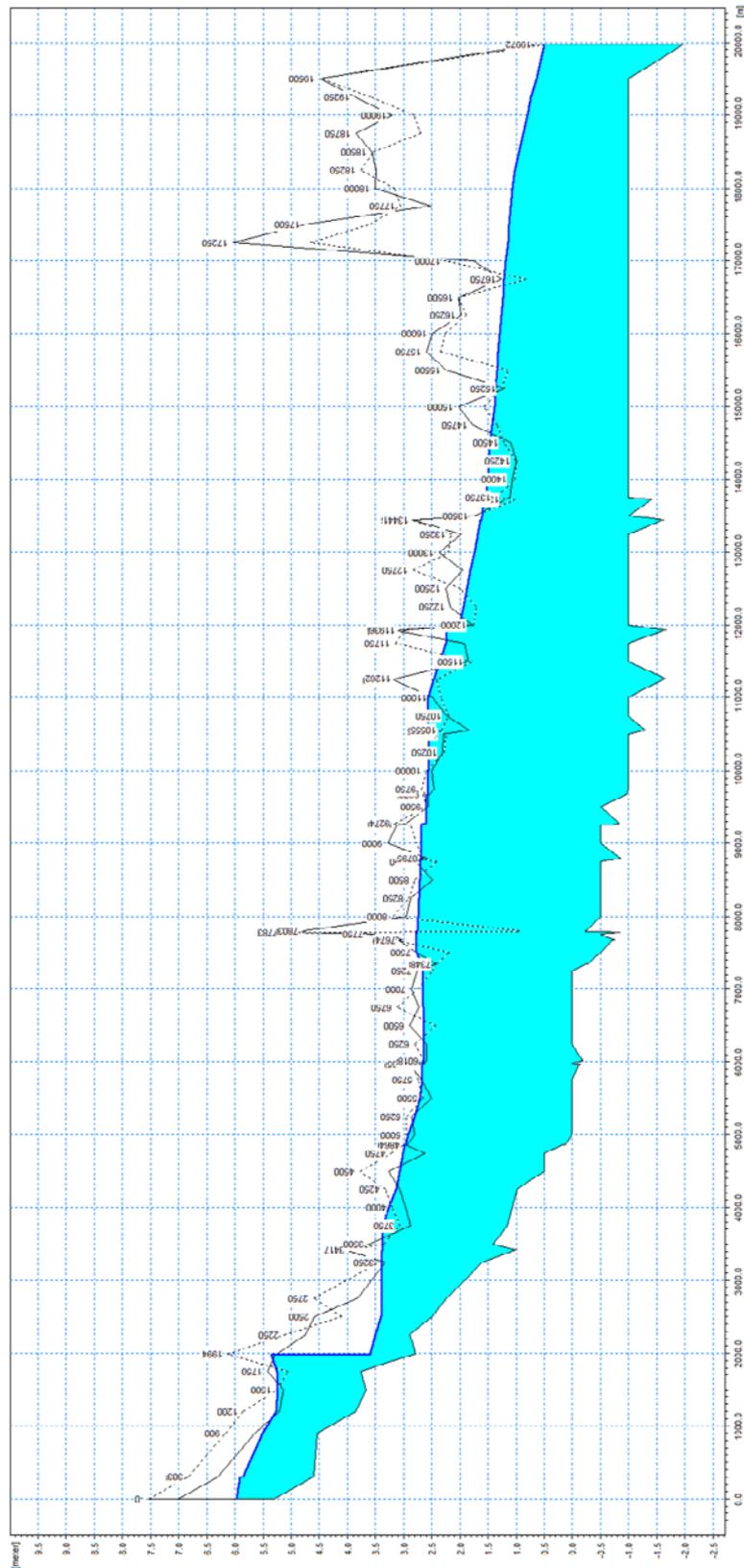


Figura 4-4: Fiume Morto – Profilo longitudinale dell'involuppo dei massimi livelli in alveo dell'evento di piena con tempo di ritorno 200 anni.

## APPENDICE A: MODELLISTICA IDRAULICA

L'implementazione della modellistica idraulica, è stata effettuata attraverso il Software MIKE del DANISH HYDRAULIC INSTITUTE – DHI, certificato dalla F.E.M.A. (Federal Emergency Management Agency).

Gli scriventi sono in possesso infatti della licenza MIKE FLOOD Chiave MZ 26392 che comprende i software MIKE 11 – MIKE 21 – MIKE FLOOD.

Il software Mike permette la modellazione monodimensionale dell'alveo (Mike 11), completamente bidimensionale dell'alveo e delle aree contermini (Mike 21), ma soprattutto permette di accoppiare con "link" bidirezionali le due simulazioni.

L'implementazione di una modellistica esclusivamente bidimensionale necessita di informazioni topografiche di elevato dettaglio. Mentre nelle aree contermini ai corsi d'acqua è possibile l'utilizzo del Lidar, questo non lo è in alveo, in quanto il rilievo Laser Scanner non è in grado di rilevare quanto sotto al pelo libero.

Per quanto sopra, saranno implementate modellistiche accoppiate tramite Mike Flood, monodimensionali in alveo e bidimensionali nelle aree contermini, determinando di fatto le aree allagate in termini di battenti e velocità di propagazione.

Nei paragrafi successivi si riportano invece le caratteristiche tecnico scientifiche della modellistica mono e bidimensionale.

### A.2.1 MODELLISTICA MONODIMENSIONALE MIKE 11

MIKE 11 è un software in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Sviluppato a partire dagli anni '70 dal DHI (Danish Hydraulic Institute), rappresenta lo stato dell'arte nella modellistica matematica in ambito fluviale e riferimento nell'ambito della modellistica idrodinamica monodimensionale.

Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del robusto motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete del De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche ecc.) ed i molteplici strumenti di interpretazione e visualizzazione dei risultati, in grado di garantire un'ottima rappresentazione degli studi condotti (rappresentazione di sezioni, profili, piani quotati, anche in ambiente GIS).

#### A.2.1.1 Modulo Idrodinamico (Hd)

Il modulo idrodinamico HD rappresenta il "cuore" del codice di calcolo MIKE 11 ed è in grado di simulare il flusso idrico monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Attraverso l'utilizzo di HD è possibile simulare:

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

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

### A.2.2 DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

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

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

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

#### A.2.3 EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

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

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

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

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

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

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

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

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

dove:

- A = area della sezione bagnata (m<sup>2</sup>);
- C = coefficiente di attrito di Chezy (m<sup>1/2</sup> s<sup>-1</sup>);
- g = accelerazione di gravità (m s<sup>-2</sup>);
- h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);
- Q = portata (m<sup>3</sup>/s);
- R = raggio idraulico (m);
- α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;
- q = portata laterale addotta (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>).

#### A.2.4 SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

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

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

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

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

### A.2.5 APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

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

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

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

### A.2.6 DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. Sono diversi i tipi di strutture che possono essere simulate:

#### Tipo 1. Stramazzo a larga soglia

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

#### Tipo 2. Relazione Q-h

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

#### Tipo 3. Tombino

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

#### Tipo 4. Relazione Q-t

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

#### Tipo 5. Relazione $Q = A(Z_1^1) \cdot Z_2^2$

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

#### Tipo 6. Strutture mobili

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

#### Tipo 7. Ponti

In MIKE 11 possono essere utilizzate diverse formulazioni da letteratura per il calcolo del deflusso attraverso i ponti e del conseguente effetto di rigurgito. In particolare sono implementati i modelli della FHWA (Federal Highway Administration USA, WSPRO method) e della USBPR (US Bureau of Public Roads), modelli per la simulazione della presenza delle pile (Nagler e Yarnell), modelli per il libero deflusso attraverso ponti ad arco (Biery & Delour, HR method). Tutti i precedenti metodi di calcolo possono essere integrati con il calcolo del moto in pressione e con il calcolo del sormonto della struttura (tombini e stramazzi).

### A.2.7 RESISTENZA D'ATTRITO

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

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

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

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

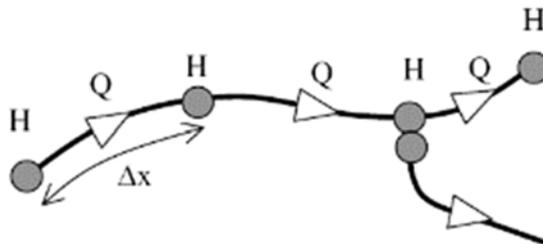
dove M è il coefficiente di Strickler, pari a  $1/n$ , essendo n il coefficiente di Manning.

### A.2.8 CONDIZIONI INIZIALI

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

### A.2.9 METODO DI SOLUZIONE

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



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

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

### A.2.10 CONDIZIONI AL CONTORNO

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

### A.2.11 MODELLISTICA BIDIMENSIONALE MIKE 21

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

Il sistema modellistico è stato sviluppato per la simulazione delle correnti a pelo libero e dei fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi, così come in ambito costiero e offshore.

#### A.2.12 MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/Evaporazioni;
- radiation stresses;
- pozzi e sorgenti.

Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 risolve le equazioni complete del moto di De St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema delle equazioni di De St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

nelle quali:

$h(x,y,t)$  = profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$  = quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$  = portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$  = coefficiente di scabrezza di Chezy;

$G$  = accelerazione di gravità;

$f(V)$  = fattore d'attrito del vento;

$V, V_x, V_y(x, y, t)$  = velocità del vento e componenti lungo le direzioni  $x$  e  $y$ ;

$\Omega(x, y)$  = parametro di Coriolis;

$p_a(x, y, t)$  = pressione atmosferica;

$\rho_w$  = densità dell'acqua;

$x, y$  = coordinate spaziali;

$t$  = tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$  = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

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

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

1. dipendente dal flusso locale:

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

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

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

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

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

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

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

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

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

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

Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni planimetriche della batimetria.

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

Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);
- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).

I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Ad esempio per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- velocità di corrente e direzione.

#### A.2.13 MODELLISTICA MIKE FLOOD

Come già specificato Mike Flood permette l'accoppiamento tra modello monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree contermini.

L'Accoppiamento dei modelli è dinamico:

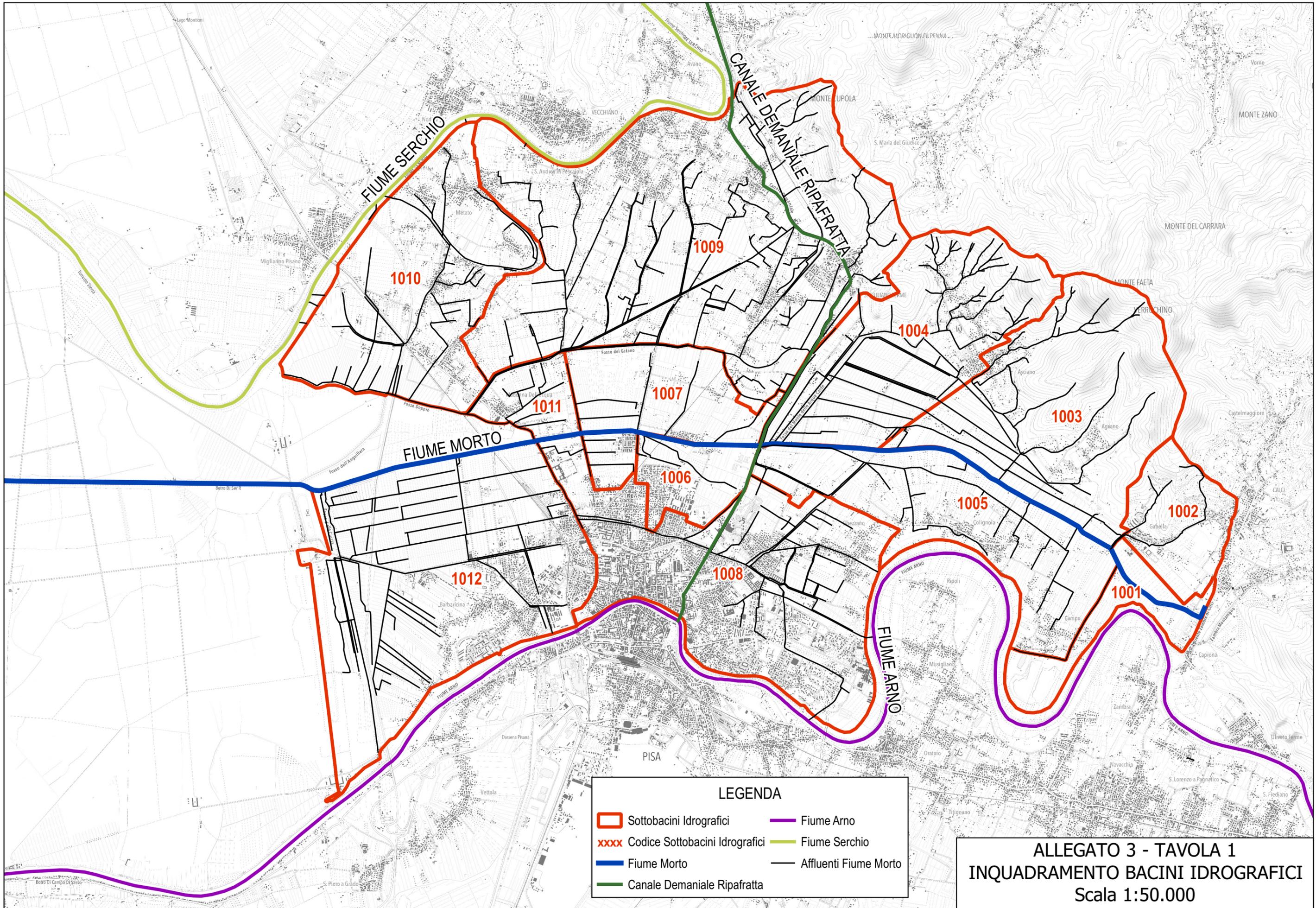
- I modelli "girano" simultaneamente
- Ad ogni istante di simulazione avviene uno scambio di dati
- La mutua interazione è bidirezionale

L'integrazione tra i diversi modelli avviene in modo totalmente dinamico, garantendo quindi la conservazione di massa e quantità di moto tra i diversi sistemi ed è impostata attraverso un'interfaccia grafica comune.

L'accoppiamento tra mono e bidimensionale può avvenire in maniera puntuale, Oppure l'accoppiamento può avvenire in maniera distribuita.

Il corso d'acqua viene simulato attraverso sezioni fluviali, esistenti o di rilievo. Le acque esondate e la loro propagazione viene effettuata con un modello bidimensionale.

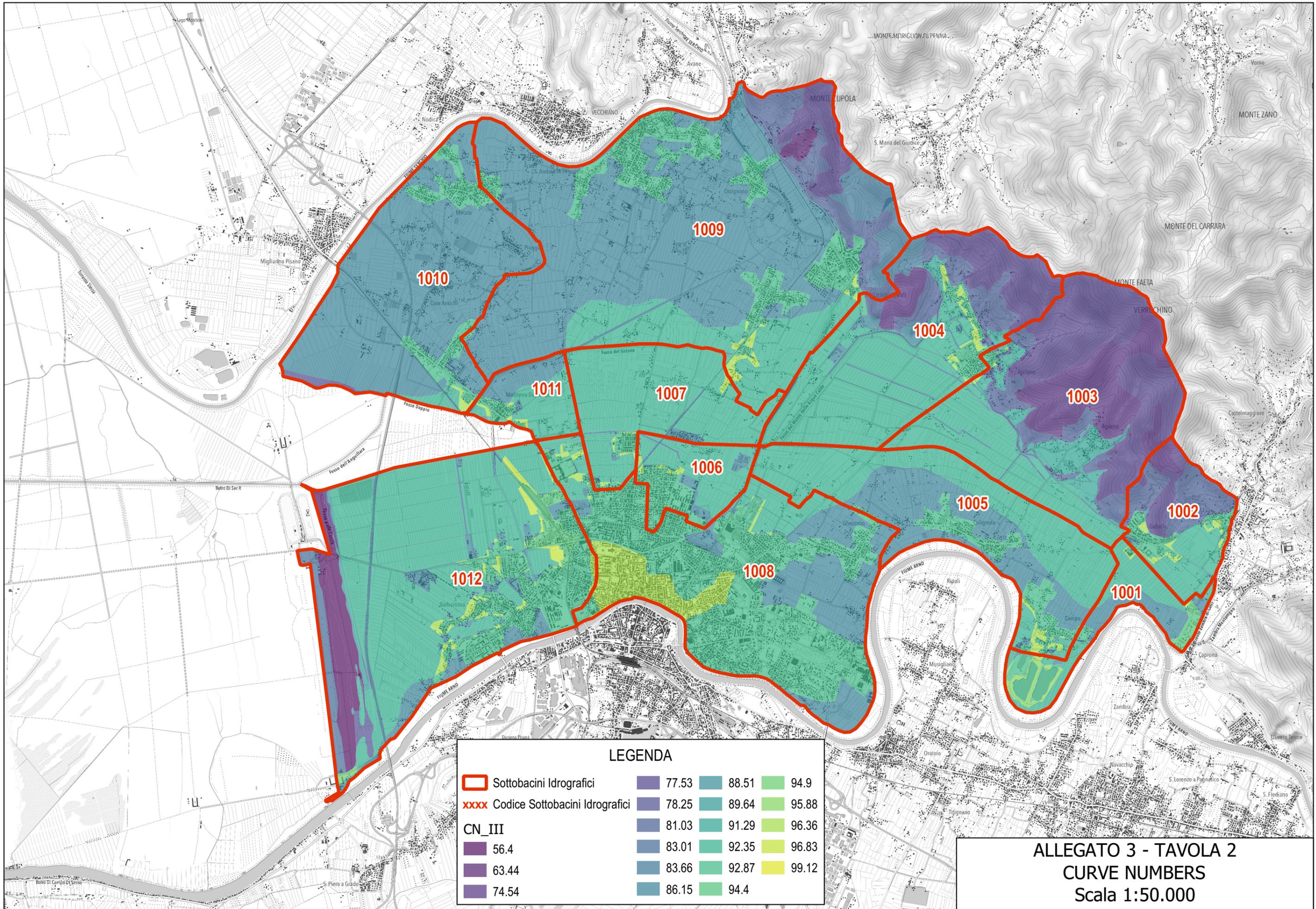
I risultati sono espressi in battenti e livelli nelle aree allagate.



**LEGENDA**

 Sottobacini Idrografici	 Fiume Arno
 Codice Sottobacini Idrografici	 Fiume Serchio
 Fiume Morto	 Affluenti Fiume Morto
 Canale Demaniale Ripafratta	

**ALLEGATO 3 - TAVOLA 1**  
**INQUADRAMENTO BACINI IDROGRAFICI**  
 Scala 1:50.000



**LEGENDA**

 Sottobacini Idrografici	 77.53	 88.51	 94.9
 Codice Sottobacini Idrografici	 78.25	 89.64	 95.88
<b>CN_III</b>	 81.03	 91.29	 96.36
 56.4	 83.01	 92.35	 96.83
 63.44	 83.66	 92.87	 99.12
 74.54	 86.15	 94.4	

**ALLEGATO 3 - TAVOLA 2**  
**CURVE NUMBERS**  
 Scala 1:50.000