



# PIANO STRUTTURALE

LR 65/2014 Norme per il governo del territorio

Articolo 19

## Comune di Orbetello:

Sindaco: Andrea Casamenti

Assessore urbanistica: Luca Teglia

Garante della comunicazione e ufficio urbanistica: Arch. Francesca Olivi

Responsabile del procedimento: segretario generale Giovanni La Porta

## Raggruppamento temporaneo:

**Arch. Silvia Viviani**

*progettista e capogruppo*

**Epsus - Musa srl**

**Cresme Ricerche spa**

Gruppo di lavoro:

Arch. Francesca Masi

Arch. Lucia Ninno

Elaborazioni grafiche e GIS:

Barbara Croci, Lorenzo Zoppi

Gruppo di lavoro:

Arch. Luigi Pingitore

Arch. Eleonora Giannini

Gruppo di lavoro:

Dott. Enrico Campanelli

Dott. Francesco Toso

## Apporti specialistici:

Pianificazione dello spazio marittimo e di adattamento climatico:

Prof. Arch. Francesco Musco con Prof. Dott. Denis Maragno, Dott. Niccolò Bassan,  
Arch. Alberto Innocenti

Aspetti ecosistemici, ambientali e naturalistici, flora e fauna marina:

Dott. Maurizio De Pirro

Aspetti geologici, geomorfologici e idrologico idraulici:

Studi IdroGeo Service srl e Hydrogeo Ingegneria srl

Comune di Orbetello

Provincia di Grosseto

**IDR.00A**

**Relazione Idrologica - Idraulica**

**2020**

## Indice generale

<b>1. PREMESSA</b>	<b>4</b>
<b>2. AREA D'INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO</b>	<b>6</b>
2.1 RETICOLO IDROGRAFICO E DI GESTIONE L.R. 79/2012	6
2.2 CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO	6
2.3 DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO	8
<b>3. APPROCCIO METODOLOGICO</b>	<b>9</b>
<b>4. MODELLO IDROLOGICO IDRAULICO 1 - ALBEGNA MONTE</b>	<b>10</b>
4.1 RETICOLO IDRAULICO DI RIFERIMENTO	10
4.2 ANALISI IDROLOGICA	10
4.2.1 Modello idrologico	10
4.2.2 Sollecitazioni pluviometriche	11
4.2.3 Idrogrammi di piena	13
4.3 VERIFICHE IDRAULICHE	13
4.3.1 Caratterizzazione topografica dei corsi d'acqua e delle aree di interesse	13
4.3.2 Modello Idraulico	13
4.3.3 Verifiche Idrauliche implementate	14
4.3.4 Risultati	14
<b>5. MODELLO IDROLOGICO IDRAULICO 2 - ALBEGNA CAMPOREGIO</b>	<b>15</b>
5.1 RETICOLO IDRAULICO DI RIFERIMENTO	15
5.2 ANALISI IDROLOGICA	15
5.2.1 Modello idrologico	15
5.2.2 Sollecitazioni pluviometriche	16
5.2.3 Idrogrammi di piena	19
5.3 VERIFICHE IDRAULICHE	19
5.3.1 Caratterizzazione topografica dei corsi d'acqua e delle aree di interesse	19
5.3.2 Modello Idraulico	20
5.3.3 Verifiche Idrauliche implementate	20
5.3.4 Risultati	20
<b>6. MODELLO IDROLOGICO IDRAULICO 3 – TALAMONE</b>	<b>22</b>
6.1 RETICOLO IDRAULICO DI RIFERIMENTO	22
6.2 ANALISI IDROLOGICA	22
6.2.1 Modello idrologico	22
6.2.2 Sollecitazioni pluviometriche	24
6.2.3 Idrogrammi di piena	25
6.3 VERIFICHE IDRAULICHE	26
6.3.1 Caratterizzazione topografica dei corsi d'acqua e delle aree di interesse	26
6.3.2 Condizioni al contorno e parametri del modello idraulico	27
6.3.3 Verifiche Idrauliche implementate	27
6.3.4 Risultati	27
<b>7. MODELLO IDROLOGICO IDRAULICO 4 – ALBINIA</b>	<b>29</b>
7.1 RETICOLO IDRAULICO DI RIFERIMENTO	29
7.2 ANALISI IDROLOGICA	29
7.2.1 Modello idrologico	29
7.2.2 Sollecitazioni pluviometriche	31
7.2.3 Idrogrammi di piena	31
7.3 VERIFICHE IDRAULICHE	33
7.3.1 Caratterizzazione topografica dei corsi d'acqua e delle aree di interesse	33

7.3.2	Condizioni al contorno e parametri del modello idraulico .....	33
7.3.3	Verifiche Idrauliche implementate.....	34
7.3.4	Risultati .....	34
<b>8.</b>	<b>MODELLO IDROLOGICO IDRAULICO 5 – ORBETELLO SCALO .....</b>	<b>35</b>
8.1	<i>RETICOLO IDRAULICO DI RIFERIMENTO .....</i>	35
8.2	<i>ANALISI IDROLOGICA .....</i>	36
8.2.1	Modello idrologico.....	36
8.2.2	Sollecitazioni pluviometriche.....	37
8.2.3	Idrogrammi di piena .....	37
8.3	<i>VERIFICHE IDRAULICHE .....</i>	38
8.3.1	Caratterizzazione topografica dei corsi d'acqua e delle aree di interesse.....	38
8.3.2	Modello Idraulico.....	38
8.3.3	Verifiche Idrauliche implementate.....	39
8.3.4	Risultati.....	39
<b>9.</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLE AREE A PERICOLOSITÀ IDRAULICA.....</b>	<b>41</b>
	<b>APPENDICE A: MODELLISTICA IDROLOGICO-IDRAULICA.....</b>	<b>43</b>
A.1	<i>MODELLISTICA IDROLOGICA.....</i>	43
A.1.1	Regime pluviometrico – Studio Regionale LSPP.....	43
A.1.2	Calcolo della pioggia di progetto su un bacino idrografico .....	43
A.1.3	Calcolo degli idrogrammi di progetto .....	44
A.2	<i>MODELLISTICA IDRAULICA HEC-RAS .....</i>	48
A.2.1	Modellistica Idraulica Monodimensionale .....	48
A.2.2	Modellistica Idraulica Bidimensionale .....	49
A.3	<i>MODELLISTICA IDRAULICA MIKE .....</i>	50
A.3.1.	Modellistica Monodimensionale MIKE 11 .....	50
A.3.2.	Modellistica bidimensionale MIKE 21 .....	53
A.3.3.	Modellistica MIKE FLOOD .....	56

## Indice delle figure

Figura 6-1: Valutazione coerenza tra modellazione idrologica Collettore Occidentale (evento sintetico TR 200 – d=5 [h]) e PRP Talamone (TR 200 – d= 5.17 [h]) .....	25
Figura 8-1: Reticolo Idraulico di riferimento Modello 5 – Orbetello Scalo .....	35
Figura 8-2: Schema dei bacini e dei reticoli oggetto di analisi idrologica Modello 5 - Orbetello Scalo .....	36
Figura 8-3: Modello idraulico 2D bacino di monte Modello 5 Orbetello Scalo .....	38

## Indice delle tabelle

Tabella 2-1: Elenco dei corsi d'acqua oggetto di studio .....	7
Tabella 4-1: Parametri idrologici Modello 1 - Albegna Monte .....	11
Tabella 4-2: Eventi sintetici - Altezze di pioggia e coefficienti di ragguaglio Modello 1 - Albegna Monte .....	12
Tabella 4-3: Portate al colmo e volumi di piena Modello 1 - Albegna Monte .....	13
Tabella 5-1: Parametri idrologici Modello 2 – Albegna Camporegio .....	15
Tabella 5-2: Eventi sintetici - Altezze di pioggia e coefficienti di ragguaglio Modello 2 – Albegna Camporegio - $K_R$ F. Albegna .....	17
Tabella 5-3: Eventi sintetici - Altezze di pioggia e coefficienti di ragguaglio Modello 2 – Albegna Camporegio – $K_R$ reticolo minore .....	18
Tabella 5-4: Portate al colmo e volumi di piena Modello 2 – Albegna Camporegio .....	19
Tabella 6-1: Codifiche dei bacini e sottobacini oggetto di analisi idrologica Modello 3 - Talamone .....	22
Tabella 6-2: Parametri idrologici Modello 3 - Talamone .....	23
Tabella 6-3: Altezze di pioggia (mm) e coefficienti di ragguaglio Modello 3 - Talamone .....	24
Tabella 6-4: Elenco dei bacini e degli input idrologici alla modellazione idraulica Modello 3 – Talamone .....	25
Tabella 6-5: Portate massime [mc/s] e volumi di piena Modello 3 - Talamone .....	26
Tabella 7-1: Codifiche dei bacini e sottobacini oggetto di analisi idrologica Modello 4 - Abinia .....	29
Tabella 7-2: Parametri idrologici Modello 4 - Albinia .....	30
Tabella 7-3: Altezze di pioggia (mm) e coefficienti di ragguaglio Modello 4 - Albinia .....	31
Tabella 7-4: Elenco dei bacini e degli input idrologici alla modellazione idraulica Modello 4 – Albinia .....	32
Tabella 7-5: Portate massime [mc/s] e volumi di piena Modello 4 - Albinia .....	32
Tabella 8-1: Sintesi dei parametri idrologici Modello 5 - Orbetello Scalo .....	37
Tabella 8-2: Valori dei coefficienti a ed n delle LSPP Modello 5 - Orbetello Scalo .....	37
Tabella 8-3: Valori massimi di portata TR 30 e 200 anni e durata 1 ora Modello 5 - Orbetello Scalo .....	37

## 1. PREMESSA

Il presente lavoro costituisce lo Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale del Comune di Orbetello (GR), ed è finalizzato 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 idraulici 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 – per la definizione dei criteri generali di fattibilità idraulica degli interventi, che introduce la seguente classificazione:

- **scenario per alluvioni frequenti**: lo scenario di cui all'articolo 6, comma 2, lettera c), del d.lgs. 49/2010, individuato negli atti di pianificazione di bacino e definito dai medesimi atti con riferimento al tempo di ritorno non inferiore a trenta anni;
- **scenario per alluvioni poco frequenti**: lo scenario di cui all'articolo 6, comma 2, lettera b) del d.lgs. 49/2010, individuato negli atti di pianificazione di bacino e definito dai medesimi atti con riferimento al tempo di ritorno non inferiore a duecento anni.

Lo studio si propone di aggiornare la pericolosità idraulica all'interno del territorio comunale, rivedendo gli input idrologici e modellando i corsi d'acqua costituenti la rete idraulica superficiale nello scenario caratterizzante lo stato attuale del territorio, che ricomprenda sia il reticolo principale (Fiume Albegna, di competenza dell'Autorità di Distretto Appennino Settentrionale, per il quale lo studio si configura quale proposta di aggiornamento delle mappe di pericolosità del PGRA) che il reticolo secondario (di competenza del Genio Civile Toscana Sud).

Verrà pertanto aggiornata la pericolosità idraulica all'interno del territorio comunale sui principali corsi d'acqua costituenti la rete idraulica superficiale, al fine di caratterizzare le aree a pericolosità idraulica secondo la classificazione del DPGR 53R/2011, della L.R. 41/2018 e del PGRA.

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;
- definizione delle aree a pericolosità idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 e della L.R. 41/2018.

Il presente documento costituisce, unitamente agli elaborati grafici riemessi, la Revisione B dello studio che recepisce le richieste di integrazione dal Genio Civile Toscana Sud, con comunicazione esiti istruttoria prot. n. N. 48788/2020 del 23/12/2020.

In sintesi, i contenuti oggetto di approfondimento riguardano:

- Classificazione delle pericolosità idraulica derivanti dalle indagini idrologico-idrauliche sia ai sensi del DPGR n.53/R/2011 sia ai sensi della LR 41/2018 sia del PGRA, raccordando le pericolosità idrauliche derivanti dalle indagini oggetto del presente elaborato (costituenti proposta di aggiornamento al PGRA vigente) con le pericolosità individuate nel PGRA vigente sul reticolo non oggetto di studio.
- Elaborazione della magnitudo idraulica definita ai sensi della LR. 41/2018 (per la cui definizione si rimanda al capitolo §10);
- Aggiornamento della modellistica idrologica ed idraulica implementata per il *Modello 3 – Talamone*, al fine di:
  - garantire sul Collettore Occidentale la coerenza con gli studi idrologici – idraulici redatti a supporto del Piano Regolatore Portuale di Talamone redatto dall'Ing. Luca Moretti.
  - Dettagliare il modello digitale del terreno recependo i dati topografici lidar messi a disposizione dal Geoportale Nazionale del Ministero dell'Ambiente.
- Aggiornamento della modellistica idrologica ed idraulica implementata per il *Modello 4 – Albinia*, al fine di:
  - Recepire i più recenti dati topografici su Canale Principale 4 (intero tratto di studio) e Canale Principale 6 (sezione di attraversamento ferroviario), oggetto di nuovi rilievi eseguiti nel settembre 2020.

Inoltre:

- È stata corretta la denominazione dello strato informativo relativo al reticolo idrografico, ora denominato “*Reticolo Idrografico e di Gestione ai sensi della LR n.79/2012*”;
- È sono stati indicati gli eventi critici per il Torrente Osa, modellato nei Modelli Idraulici 2 e 3;
- È stata specificata la metodologia impiegata per la determinazione del tempo di corrivazione;
- È stato integrato l'*Allegato 1 – Modellistica Idrologica* con gli idrogrammi sollecitanti il *Modello 5 – Orbetello Scalo*;
- È stato redatto l'*Allegato 2 – Modellistica Idraulica* riportante le risultanze della modellistica idraulica per i modelli idraulici Talamone, Albinia e Orbetello Scalo. in termini di grandezze idrauliche significative su ogni sezione fluviale utilizzata nella modellazione;
- Sono stati corretti refusi all'interno della relazione e dell'*Allegato 1 – Modellistica Idrologica*.

Ogni modifica e/o integrazione rispetto ai documenti di prima stesura, è riportata nel presente documento in colore grigio.

## 2. AREA D'INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO

### 2.1 RETICOLO IDROGRAFICO E DI GESTIONE L.R. 79/2012

In *Tavola IDR.01 –Inquadramento* è evidenziato il reticolo idrografico e di gestione individuato dalla Regione Toscana ai sensi della L.R.79/2012, aggiornato con Delibera di Consiglio 20/2019 ed attualmente vigente, sul territorio comunale. Su tale reticolo si applicano le disposizioni della Normativa Idraulica vigente, ed in particolare i disposti di cui al RD 523/04, DPGR 25 ottobre 2011 n. 53/R, L.R. 41/2018.

### 2.2 CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO

L'ambito d'indagine comprende i principali corsi d'acqua che concorrono a definire il livello di pericolosità del territorio oggetto di studio. A partire dal reticolo idrografico individuato dalla Regione Toscana ai sensi della L.R.79/2012 sopra richiamato, sono stati individuati ed analizzati i principali corsi d'acqua, che concorrono a definire le condizioni di allagabilità del territorio del Comune di Orbetello. Nello specifico è stato scelto di sviluppare una serie di modelli idrologici idraulici di tipo analitico per le aste fluviali che interessano il territorio urbanizzato e/o che concorrono a determinare la pericolosità idraulica nelle aree in cui insistono le previsioni approvate in sede di Conferenza di Copianificazione ex art.25 della L.R.T. n.65/2014 in data 10/01/2020.

Gli areali indagati sono quelli riportati in *Tavola IDR.01 –Inquadramento*, in cui sono evidenziate le aree di studio ed il reticolo oggetto di modellazione. in particolare, si individuano:

- **Modello 1: Albegna Monte** – Reticolo: F. Albegna (dal Ponte della Marsiliana alla foce), T. Patrignone e T. Magione Radicata – Area di studio: 16 Km<sup>2</sup>;
- **Modello 2: Albegna Camporegio** – Reticolo: F. Albegna (tratto terminale), Controfossa Destra F. Albegna, T. Albegnaccia, Canale Principale 2, Canale Secondario 2, T. Osa, Controfossa Sinistra T. Osa – Area di studio: 16 Km<sup>2</sup>;
- **Modello 3: Talamone** – Reticolo: Collettore Occidentale, Collettore Orientale, Bufalareccia, T. Osa (tratto terminale), Controfossa Destra T.Osa, Giuncaie – Area di studio: 12 Km<sup>2</sup>;
- **Modello 4: Albinia** – Reticolo: Controfossa Sinistra F. Albegna, Canale Principale 4, Canale Principale 5, Canale Principale 6, Canale Secondario 16, Fosso 8 – Area di studio: 17 Km<sup>2</sup>;
- **Modello 5: Orbetello Scalo** – Reticolo: Quartaccio, Cervia, rete di canali tra la SS1 Aurelia e la linea ferroviaria Pisa-Roma – Area di studio: 4 Km<sup>2</sup>.

Nella Tabella 2-1 sono riportati, per ogni corso d'acqua studiato, il modello di riferimento, la lunghezza del tratto ed il numero di sezioni fluviali utilizzate, nonché la provenienza del dato topografico (lidar / anno di rilievo).

<b>Modello 1 – ALBEGNA MONTE</b>			
<b>Corso d'acqua</b>	<b>Lunghezza [m]</b>	<b>N. sezioni</b>	<b>Provenienza dato topografico</b>
Fiume Albegna	16018	130	Rilievo 2016
Torrente Patrignone	3819	50	Rilievo 2015
Torrente Magione Radicata	3270	53	Rilievo 2015
<b>Modello 2 – ALBEGNA CAMPOREGIO</b>			
<b>Corso d'acqua</b>	<b>Lunghezza [m]</b>	<b>N. sezioni</b>	<b>Provenienza dato topografico</b>
Fiume Albegna	4512	42	Rilievo 2016
Controfossa Destra F. Albegna	4542	68	Rilievo 2014/2016
Torrente Albegnaccia	5076	65	Rilievo 2014
Canale Principale 2	1577	21	Rilievo 2014
Canale Secondario 2	1361	18	Rilievo 2014
Torrente Osa	3219	70	Rilievo 2013
Controfossa Sinistra T. Osa	1814	23	Rilievo 2009
<b>Modello 3 – TALAMONE</b>			
<b>Corso d'acqua</b>	<b>Lunghezza [m]</b>	<b>N. sezioni</b>	<b>Provenienza dato topografico</b>
Collettore Occidentale	3057	28	Rilievo 2005
Collettore Orientale	4475	49	Rilievo 2014
Fosso della Bufalareccia	668	7	Rilievo 2014
Torrente Osa	1171	29	Rilievo 2013
Controfossa Destra F. Osa	3129	28	Rilievo 2009
Fosso delle Giuncaie	295	8	Rilievo 2010
<b>Modello 4 – ALBINIA</b>			
<b>Corso d'acqua</b>	<b>Lunghezza [m]</b>	<b>N. sezioni</b>	<b>Provenienza dato topografico</b>
Controfossa Sinistra F. Albegna	3565	22	Rilievo 2005/2010
Canale Principale 4	6887	37	Rilievo 2004/2020
Canale Principale 5	2602	63	Rilievo 2014
Canale Principale 6	1990	31	Rilievo 2010/2020
Canale Secondario 16	2109	34	Lidar
Fosso N.8	849	27	Lidar
<b>Modello 5 – ORBETELLO SCALO</b>			
<b>Corso d'acqua</b>	<b>Lunghezza [m]</b>	<b>N. sezioni</b>	<b>Provenienza dato topografico</b>
Fosso della Cervia	1776	Modellazione 2D	Lidar/CTR10k Regione Toscana
Fosso Quartaccio	1622	Modellazione 2D	Lidar/ CTR10k Regione Toscana

Tabella 2-1: Elenco dei corsi d'acqua oggetto di studio

## 2.3 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, o ottenuti dall'analisi del materiale di studi pregressi. In particolare, sono stati utilizzati i seguenti dati:

- Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:10000 e 1:2000 ove presente. Fonte: Regione Toscana - Carta Tecnica Regionale;
- LIDAR (1x1m e 2x2 m) del Ministero dell'Ambiente, Fonte dei dati: Regione Toscana – Morfologia - Lidar;
- LIDAR (1x1m) del Ministero dell'Ambiente, Fonte dei dati: Geoportale Nazionale;
- Shapefile del Reticolo Idrografico, approvato da Regione Toscana con Legge Regionale 27 dicembre 2012, n. 79 - Aggiornamento Del. 20/2019; Fonte dei dati: Regione Toscana;
- Shapefile della Carta Geologica Regionale. Fonte: Regione Toscana - DG Governo del Territorio - Sistema Informativo Territoriale ed Ambientale. Il dataset "Continuum Geologico - aggiornamento del 15/11/2013" è rilasciato con licenza CC BY 3.0 IT Il dataset è rilasciato in formato esri-shapefiles e dbf. I dati sono espressi nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Ovest (EPSG:3003).
- Shapefile dell'Uso e Copertura del Suolo. Fonte: Regione Toscana - Il dataset "Uso e copertura del suolo 2007-2013" è rilasciato con licenza CC BY 3.0 IT. Il dataset è rilasciato in formato esri-shapefiles e dbf. I dati sono espressi nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Ovest (EPSG:3003);
- 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;
- Griglie dei parametri caratteristici delle LSPP, a ed n, pubblicate dalla Regione Toscana nell'ambito dello Studio di Regionalizzazione delle Precipitazioni. Fonte: Regione Toscana.

### 3. APPROCCIO METODOLOGICO

Lo schema metodologico adottato si basa essenzialmente su criteri analitici che, partendo dagli eventi di precipitazione, conducono 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 quindi 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, il verificarsi di fenomeni esondativi.

La tipologia di modello idraulico adottata è di tipo integrato e permette di combinare l'approccio monodimensionale, per la modellazione idraulica in alveo, e quello bidimensionale per la modellazione idraulica delle aree inondabili. L'integrazione tra i modelli avviene in modo dinamico, garantendo 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.

L'approccio modellistico per la caratterizzazione della pericolosità idraulica è di tipo analitico e prevede una modellazione idraulica accoppiata 1D-2D con input idrologici derivanti dall'analisi idrologica e dati geometrici derivanti da rilievo topografico e/o rilievo Lidar. L'input idrologico è caratterizzato da idrogrammi di piena rappresentati da immissioni puntuali o distribuite lungo l'asta fluviale analizzata.

A tal fine sono stati implementati **5 modelli idraulici** distinti, richiamati al paragrafo 2.2, ed ampiamente descritti nei capitoli successivi. Gli scenari simulati riguardano eventi con **tempi di ritorno pari a 30 e 200 anni**. Le durate di pioggia simulate sono risultanti dalla modellistica idrologica e ricomprendono le durate critiche che massimizzano le portate di piena ed i volumi dei bacini dei corsi d'acqua principali e dei reticoli minori, nonché la loro mutua interazione.

## 4. MODELLO IDROLOGICO IDRAULICO 1 - ALBEGNA MONTE

Il presente modello idrologico idraulico riguarda il tratto del F. Albegna compreso tra il Ponte della Marsiliana e la foce ed i suoi principali affluenti, Torrente Patrignone e Torrente Magione Radicata. Tale studio è stato mutuato dalle verifiche idrologiche idrauliche redatte a supporto del Progetto Esecutivo I Stralcio della Cassa di Espansione di Campo Regio, che ricomprendono una dettagliata analisi idrologica idraulica dello stato attuale e valuta le criticità idrauliche attuali e la funzionalità delle opere idrauliche sul reticolo oggetto di analisi, a seguito dalla realizzazione degli interventi previsti dal “Piano degli interventi pubblici di ripristino e di messa in sicurezza per il superamento dell'emergenza” redatto a seguito dell'evento alluvionale che nei giorni 11-12 novembre 2012 ha colpito la Provincia di Grosseto ed in particolare il bacino del Fiume Albegna, ovvero:

- Argine Remoto tra il Ponte della Marsiliana e la confluenza del T. Patrignone (rif. intervento cod. “2012EGR0118 – Realizzazione dell'argine remoto del Fiume Albegna I Lotto”);
- Interventi di ricavatura dell'alveo del F. Albegna tra la confluenza del Fosso del Camerone e la confluenza con il Torrente Magione – Radicata (rif. interventi cod. “2012EGR02492 - Lavori per il ripristino delle sezioni di deflusso del fiume Albegna - prosecuzione dei lavori di rimozione macrorinterri in alveo (int. 24)” e cod. “2012EGR0258 Lavori per il ripristino delle sezioni di deflusso del fiume Albegna - prosecuzione dei lavori di rimozione macrorinterri in alveo (int. 36)”);
- Intervento di adeguamento idraulico del T. Magione Radicata (rif. intervento cod. “2012EGR0244 –Adeguamento idraulico del Magione Radicata e del Patrignone I stralcio funzionale, nel Comune di Orbetello (Gr)”).

Per tutti i dettagli si rimanda agli elaborati del pacchetto “D-Idrologia\_Idraulica” del “Progetto Esecutivo I Stralcio della Cassa di Espansione di Campo Regio”. Di seguito si riporta una sintesi delle analisi svolte.

### 4.1 RETICOLO IDRAULICO DI RIFERIMENTO

Nelle Tavole *IDR.10A Modello 1 Albegna Monte - Tavola 1 - Planimetria - Quadro 1* e *IDR.10B Modello 1 Albegna Monte - Tavola 1 - Planimetria - Quadro 2* si riporta il reticolo idraulico preso a riferimento nelle verifiche idrauliche del Modello 1 - Albegna Monte, che risulta così schematizzato:

- Reticolo principale: Fiume Albegna;
- Reticolo minore: Torrente Magione Radicata – Torrente Patrignone – Fosso del Camerone (solo contributo idrologico).

### 4.2 ANALISI IDROLOGICA

L'analisi idrologica implementata è finalizzata alla stima degli idrogrammi di piena nelle seguenti sezioni di chiusura:

- Fiume Albegna alla Marsiliana;
- Fosso del Camerone;
- Torrente Patrignone;
- Torrente Magione Radicata.

Si ipotizza che a monte del tratto di analisi le portate idrologiche dei corsi d'acqua siano interamente contenute in alveo senza causare esondazioni.

Gli scenari idrologici implementati riguardano i tempi di ritorno TR=30-200-500 anni e le durate di pioggia d=6-9-12-15 ore.

#### 4.2.1 MODELLO IDROLOGICO

Per tutti i corsi d'acqua di interesse è stata effettuata una classificazione geomorfologica del reticolo fluviale secondo il criterio di Horton-Strahler.

Per la stima delle perdite è stato adottato il metodo dell'infiltrazione a soglia.

I parametri  $I_a$  e  $K_s$ , intercettazione iniziale e coefficiente di infiltrazione a saturazione per la depurazione idrologica, sono stati ricavati dall'analisi delle carte dell'Uso del Suolo e della Geologia della Regione Toscana.

Come modello di trasformazione afflussi-deflussi è stato adottato l'idrogramma istantaneo unitario geomorfologico (GIUH), i cui parametri  $n$  e  $k$  sono stati ricavati dalla gerarchizzazione.

Una sintesi dei parametri idrologici utilizzati è riportata nella tabella seguente.

Corso d'acqua	Modello di Infiltrazione			Trasformazione afflussi-deflussi	
	A [kmq]	la [mm]	Ks [mm/h]	n [-]	k [h]
F. Albegna alla Marsiliana	537.7	10.956	1.633	2.643	3.167
F. del Camerone	6.1	19.533	1.497	0.693	2.066
Interbacino F. Albegna al Camerone	7.6	11.531	0.274	0.771	2.066
T. Patrignone	62	9.567	1.147	1.518	3.036
T. Magione Radicata	53.7	15.954	2.583	0.922	2.994

Tabella 4-1: Parametri idrologici Modello 1 - Albegna Monte

Tutti i risultati della modellistica idrologica implementata sono riportati nell'elaborato IDR.00B - Allegato 1 - Modellistica Idrologica. Per approfondimenti sui fondamenti teorici della modellistica idrologica utilizzata si rimanda all'Appendice A – Modellistica Idrologica Idraulica.

#### 4.2.2 SOLLECITAZIONI PLUVIOMETRICHE

La sollecitazione pluviometrica è stata stimata sulla base delle griglie delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica  $a$  ed  $n$  pubblicate dalla Regione Toscana nell'ambito dello Studio di Regionalizzazione delle Precipitazioni.

Seguendo la procedura indicata nella "Guida all'Uso" fornita dalla Regione Toscana, sono state stimate le altezze di pioggia per le durate (6-9-12-15 ore) ed i tempi di ritorno (30-200-500 anni) di progetto. La pioggia lorda così calcolata è stata opportunamente ragguagliata in funzione dell'area del bacino e della durata dell'evento meteorico.

Si precisa che per il calcolo del coefficiente di ragguaglio areale,  $K_r$ , è stata utilizzata la formulazione suggerita nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana:

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

dove  $t$  è la durata dell'evento,  $A$  è l'area del bacino sotteso e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono parametri dipendenti dal bacino considerato ed assunti pari a:

$\alpha = 0.036a'$  con  $a'$  = parametro delle cpp nella forma trinomia  $h = a' T^{m'} D^{n'}$

$\beta = 0.25$

$\gamma = 0.01$

Pertanto, per il calcolo del  $K_r$  è stata eseguita la scomposizione dei due fattori  $a$  e  $n$  delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica dello Studio di Regionalizzazione in tre fattori  $a'$   $n'$   $m'$  mediante regressione logaritmica multipla. L'area del bacino sotteso è stata assunta pari alla superficie del bacino complessivo, ovvero quello del F. Albegna a valle della confluenza del T. Magione Radicata.

La distribuzione temporale della precipitazione utilizzata nelle verifiche è di tipo rettangolare, ovvero ad intensità costante.

La seguente Tabella 4-2 sintetizza i risultati ottenuti.

	Eventi sintetici TR=30 anni															
	Durata 6 ore				Durata 9 ore				Durata 12 ore				Durata 15 ore			
	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	
Corso d'acqua																
F. Albegna alla Marsigliana	98.7	0.769	75.9	109.8	0.802	88.1	118.4	0.825	97.7	125.6	0.841	105.7				
F. del Camerone	108.6	0.710	77.1	123.2	0.746	91.9	134.8	0.771	103.9	144.5	0.792	114.4				
Interbacino F. Albegna al Camerone	106.8	0.698	74.6	121.6	0.735	89.3	133.4	0.759	101.3	143.2	0.768	110.1				
T. Patrignone	98.5	0.688	67.7	111.6	0.724	80.8	121.8	0.749	91.3	130.5	0.778	101.6				
T. Maglione Radicata	109.9	0.713	78.3	124.8	0.749	93.4	136.6	0.773	105.6	146.5	0.789	115.6				

	Eventi sintetici TR=200 anni															
	Durata 6 ore				Durata 9 ore				Durata 12 ore				Durata 15 ore			
	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	
Corso d'acqua																
F. Albegna alla Marsigliana	141.6	0.769	108.9	160.8	0.802	129.0	176.0	0.825	145.2	188.9	0.841	188.9				
F. del Camerone	169.2	0.710	120.2	197.1	0.746	147.0	219.5	0.771	169.2	238.7	0.792	189.0				
Interbacino F. Albegna al Camerone	166.4	0.698	116.2	194.5	0.735	142.8	217.2	0.759	164.9	236.6	0.768	181.8				
T. Patrignone	151.8	0.688	104.4	176.3	0.724	127.6	196.0	0.749	146.9	212.9	0.778	165.7				
T. Maglione Radicata	171.2	0.713	122.1	199.5	0.749	149.4	222.4	0.773	172.0	241.9	0.789	190.9				

	Eventi sintetici TR=500 anni															
	Durata 6 ore				Durata 9 ore				Durata 12 ore				Durata 15 ore			
	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	
Corso d'acqua																
F. Albegna alla Marsigliana	163.2	0.769	125.4	186.5	0.802	149.6	205.0	0.825	169.1	220.8	0.841	185.7				
F. del Camerone	199.4	0.710	141.6	233.4	0.746	174.1	261.1	0.771	201.2	284.7	0.792	225.5				
Interbacino F. Albegna al Camerone	196.0	0.698	136.9	230.3	0.735	169.2	258.3	0.759	196.2	282.3	0.768	216.9				
T. Patrignone	178.3	0.688	122.6	208.3	0.724	150.8	232.5	0.749	174.2	253.3	0.778	197.2				
T. Maglione Radicata	201.7	0.713	143.8	236.3	0.749	177.0	264.5	0.773	204.5	288.6	0.789	227.8				

Tabella 4-2: Eventi sintetici - Altezze di pioggia e coefficienti di ragguaglio Modello 1 - Albegna Monte

### 4.2.3 IDROGRAMMI DI PIENA

Alla luce di quanto argomentato ai paragrafi precedenti, gli idrogrammi di piena risultanti sono riportati nella tabella seguente.

Corso d'acqua	TR30 anni d=06h		TR30 anni d=09h		TR30 anni d=12h		TR30 anni d=15h	
	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]						
F. Albegna alla Marsiliana	760	29.624	792	33.559	766	36.093	712	37.772
F. del Camerone	19	0.293	15	0.355	12	0.400	10	0.434
Interbacino F. Albegna al Camerone	25	0.466	20	0.572	17	0.656	15	0.728
T. Patrignone	127	3.179	122	3.773	108	4.212	95	4.554
T. Magione Radicata	139	2.516	114	2.909	92	3.147	77	3.288

Corso d'acqua	TR200 anni d=06h		TR200 anni d=09h		TR200 anni d=12h		TR200 anni d=15h	
	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]						
F. Albegna alla Marsiliana	1204	47.379	1289	55.567	1273	61.626	1205	66.365
F. del Camerone	31	0.553	25	0.687	21	0.794	19	0.882
Interbacino F. Albegna al Camerone	40	0.782	33	0.978	28	1.140	25	1.279
T. Patrignone	213	5.451	207	6.678	187	7.658	167	8.478
T. Magione Radicata	246	4.863	207	5.913	175	6.710	152	7.345

Corso d'acqua	TR500 anni d=06h		TR500 anni d=09h		TR500 anni d=12h		TR500 anni d=15h	
	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]						
F. Albegna alla Marsiliana	1427	56.279	1538	66.630	1527	74.491	1452	80.797
F. del Camerone	37	0.681	30	0.851	26	0.987	23	1.101
Interbacino F. Albegna al Camerone	47	0.939	39	1.178	34	1.377	30	1.549
T. Patrignone	255	6.580	249	8.113	226	9.353	203	10.404
T. Magione Radicata	298	6.029	253	7.393	215	8.457	189	9.329

Tabella 4-3: Portate al colmo e volumi di piena Modello 1 - Albegna Monte

## 4.3 VERIFICHE IDRAULICHE

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

La caratterizzazione geometrica del fiume Albegna è stata ricavata in parte dalla campagna di indagini topografiche eseguite a supporto della Progettazione Esecutiva della Cassa di Espansione di Camporegio (tratto terminale dalla loc. Barca dei Grazi alla foce, circa 4.5 km, sezioni dalla 00020\_\_16 alla 00480\_\_16) ed in parte dai dati di progetto e di contabilità dei lavori relativi alle perizie 2012EGR0249 e 2012EGR0258 fornite dal Consorzio di Bonifica n.6 Toscana Sud (tratto dal ponte della Marsiliana alla loc. Barca dei Grazi, circa 11.5 km, sezioni dalla a 01608\_\_15 alla 00492PC15), per un totale di 130 sezioni.

La caratterizzazione geometrica del reticolo minore (T. Patrignone e T. Magione Radicata) è stata mutuata dagli elaborati del Progetto Esecutivo dell'intervento di adeguamento idraulico del Magione Radicata e del Patrignone, l stralcio funzionale - Cod. Intervento n. 2012EGR0244 e riguarda il tratto terminale del T. Patrignone, circa 3.8 km, dalla confluenza del T. Argello in loc. P. del Mulino all'immissione nel F. Albegna per un totale di 50 sezioni dalla 00385\_\_15 alla 00001\_\_15, e il tratto terminale del T. Magione Radicata, circa 3.2 km, dal ponte di loc. Torretta all'immissione nel F. Albegna, un totale di 53 sezioni dalla 00327\_\_15 alla 00007\_\_15.

Per l'individuazione planimetrica delle sezioni fluviali utilizzate nella modellazione idraulica si rimanda agli elaborati IDR.10A e IDR.10B - Modello 1 Albegna Monte - Tavola 1 - Planimetria - Quadro 1 e Quadro 2.

Per la modellazione dei territori limitrofi è stato costruito un modello digitale del terreno con i voli Lidar disponibili verificati ed integrati con le informazioni planoaltimetriche delle indagini topografiche di supporto al progetto (loc. Pian del Tesoro) e degli interventi realizzati sul territorio (argine remoto).

### 4.3.2 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 mutuato dai risultati delle indagini topografiche.

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.

Per ulteriori dettagli si rimanda all'Appendice A - Modellistica Idrologica Idraulica.

### 4.3.3 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 al seguente scenario geometrico:

- Stato **Post-Lavori Consorzio**: rappresenta la configurazione territoriale attuale, che ricomprende la realizzazione degli interventi cod. 2012EGR0118 (Realizzazione dell'argine remoto I stralcio), cod. 2012EGR0244 (Adeguamento idraulico del Magione Radicata e del Patrignone I stralcio) e cod. 2012EGR0249 e 2012EGR0258 (Interventi di somma urgenza e ripristino delle sezioni di deflusso del fiume Albegna).

Gli scenari idrologici implementati sono quelli già richiamati e descritti al precedente paragrafo, ovvero gli eventi di piena con TR=30-200-500 anni durate di pioggia d=6-9-12-15 ore.

### 4.3.4 RISULTATI

Sulla base del quadro conoscitivo su descritto, si è giunti alla caratterizzazione delle condizioni di pericolosità idraulica indotte dal reticolo idrografico tenendo conto degli effetti prodotti dalla realizzazione degli interventi sul bacino del F. Albegna nel tratto a monte di Camporegio, ovvero argine remoto, ricavatura dell'alveo del F. Albegna ed adeguamento idraulico del T. Magione Radicata.

Le verifiche idrologiche idrauliche del modello Albegna Monte mostrano, su tutti gli scenari geometrici implementati, risultati di allagabilità nelle aree di fondovalle prossime al F. Albegna nel tratto compreso tra il Ponte della Marsiliana e la confluenza del T. Patrignone, già per eventi con TR=30 anni.

A valle della confluenza del T. Patrignone, il F. Albegna, pur con franchi di sicurezza talora ridotti e con criticità in corrispondenza dei ponti, riesce a contenere in alveo gli idrogrammi di piena attesi su tutti gli scenari idrologici cimentati (TR<=500 anni).

I risultati in forma grafica delle sezioni fluviali del modello idraulico con l'indicazione del livello massimo atteso per TR=30-200-500 anni (involuppo dei livelli per le varie durate di pioggia) sono riportati nell'elaborato *IDR.15 - Modello 1 Albegna Monte - Tavola 6 - Libretti sezioni con livelli idrometrici TR=30-200 anni*.

Per quanto riguarda le 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:

*IDR.11A-B - Modello 1 Albegna Monte - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni - Quadro 1-2;*

*IDR.12A-B - Modello 1 Albegna Monte - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni - Quadro 1-2;*

*IDR.13A-B - Modello 1 Albegna Monte - Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni - Quadro 1-2;*

*IDR.14A-B - Modello 1 Albegna Monte - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni - Quadro 1-2.*

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).

## 5. MODELLO IDROLOGICO IDRAULICO 2 - ALBEGNA CAMPOREGIO

Il presente modello idrologico idraulico riguarda la modellazione idrologica e idraulica dell'area di Camporegio ed è stato mutuato dalle verifiche idrologiche idrauliche redatte a supporto del Progetto Esecutivo I Stralcio della Cassa di Espansione di Campo Regio, finalizzata alla valutazione delle criticità idrauliche attuali del territorio oggetto di intervento e della funzionalità delle opere idrauliche esistenti.

Per tutti i dettagli si rimanda agli elaborati del pacchetto "D-Idrologia\_Idraulica" del "Progetto Esecutivo I Stralcio della Cassa di Espansione di Campo Regio". Di seguito si riporta una sintesi delle analisi svolte.

### 5.1 RETICOLO IDRAULICO DI RIFERIMENTO

Nella Tavola IDR.20 - Modello 2 Albegna Camporegio - Tavola 1 – Planimetria si riporta il reticolo idraulico preso a riferimento nelle verifiche idrauliche di Camporegio che risulta così schematizzato:

- Reticolo principale: Fiume Albegna (tratto terminale);
- Reticolo minore: Torrente Osa – Controfossa Sinistra T. Osa – Controfossa Destra F. Albegna – Torrente Albegnaccia – Canale Principale 2 – Canale Secondario 2 – Fosso Tizzano (solo contributo idrologico).

### 5.2 ANALISI IDROLOGICA

L'analisi idrologica implementata è finalizzata alla stima degli idrogrammi di piena nelle seguenti sezioni di chiusura:

- Controfossa Destra del F. Albegna a monte della confluenza con il Torrente Albegnaccia;
- Torrente Albegnaccia alla confluenza con la Controfossa Destra del F. Albegna;
- Canale Principale 2;
- Canale Secondario 2;
- Fosso di Tizzano;
- Torrente Osa;
- Controfossa Sinistra T. Osa.

Si ipotizza che a monte del tratto di analisi le portate idrologiche dei corsi d'acqua siano interamente contenute in alveo senza causare esondazioni.

Gli idrogrammi di piena del Fiume Albegna alla Barca dei Grazi sono stati mutuati dai risultati del Modello 1 - Albegna Monte riportati nel capitolo precedente.

#### 5.2.1 MODELLO IDROLOGICO

Per tutti i corsi d'acqua di interesse è stata effettuata una classificazione geomorfologica del reticolo fluviale secondo il criterio di Horton-Strahler.

Per la stima delle perdite è stato adottato il metodo dell'infiltrazione a soglia.

I parametri  $la$  e  $Ks$ , intercettazione iniziale e coefficiente di infiltrazione a saturazione per la depurazione idrologica, sono stati ricavati dall'analisi delle carte dell'Uso del Suolo e della Geologia della Regione Toscana.

Come modello di trasformazione afflussi-deflussi è stato adottato l'idrogramma istantaneo unitario geomorfologico (GIUH), i cui parametri  $n$  e  $k$  sono stati ricavati dalla gerarchizzazione.

Una sintesi dei parametri idrologici utilizzati è riportata nella tabella seguente.

Corso d'acqua	Modello di Infiltrazione			Trasformazione afflussi-deflussi	
	A [kmq]	la [mm]	Ks [mm/h]	n [-]	k [h]
Controfossa Destra F. Albegna	5.9	3.685	0.775	3.010	1.936
T. Albegnaccia	14.9	3.430	0.835	2.985	1.861
Canale Principale 2	5.0	3.448	0.702	2.778	1.501
Canale Secondario 2	0.6	3.441	0.359	2.016	1.616
F. Tizzano	2.2	3.300	0.775	2.928	1.482
T. Osa	78.6	6.916	1.392	3.106	1.294
Controfossa Sinistra T. Osa	4.9	5.287	0.708	3.048	0.434

Tabella 5-1: Parametri idrologici Modello 2 – Albegna Camporegio

Tutti i risultati della modellistica idrologica implementata sono riportati nell'elaborato IDR.00B - Allegato 1 - Modellistica Idrologica.

Per approfondimenti sui fondamenti teorici della modellistica idrologica utilizzata si rimanda all'Appendice A – Modellistica Idrologica Idraulica.

### 5.2.2 SOLLECITAZIONI PLUVIOMETRICHE

Per la stima degli idrogrammi sintetici, la sollecitazione pluviometrica è stata stimata sulla base delle griglie delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica  $a$  ed  $n$  pubblicate dalla Regione Toscana nell'ambito dello Studio di Regionalizzazione delle Precipitazioni.

Seguendo la procedura indicata nella "Guida all'Uso" fornita dalla Regione Toscana, sono state stimate le altezze di pioggia per le durate (6-9-12-15 ore) ed i tempi di ritorno (30-200-500 anni) di progetto. La pioggia lorda così calcolata è stata opportunamente ragguagliata in funzione dell'area del bacino e della durata dell'evento meteorico.

Si precisa che per il calcolo del coefficiente di ragguaglio areale,  $K_r$ , è stata utilizzata la formulazione suggerita nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana:

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

dove  $t$  è la durata dell'evento,  $A$  è l'area del bacino sotteso e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono parametri dipendenti dal bacino considerato ed assunti pari a:

$\alpha = 0.036a'$  con  $a'$  = parametro delle cpp nella forma trinomia  $h = a' T r^{m'} D^n$

$\beta = 0.25$

$\gamma = 0.01$

Pertanto, per il calcolo del  $K_r$  è stata eseguita la scomposizione dei due fattori  $a$  e  $n$  delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica dello Studio di Regionalizzazione in tre fattori  $a'$   $n'$   $m'$  mediante regressione logaritmica multipla. L'area del bacino sotteso è stata assunta pari alla superficie del bacino complessivo del F. Albegna. La seguente Tabella 5-2 sintetizza i risultati ottenuti.

Per gli eventi di durata 6 ore (durata critica per il reticolo di bonifica) è stato inoltre calcolato il coefficiente di ragguaglio areale per i soli bacini del reticolo minore, al fine di massimizzare le piogge e gli effetti attesi. I risultati ottenuti sono sintetizzati in Tabella 5-3.

Gli idrogrammi di pioggia di progetto sono stati assunti ad intensità costante.

	Eventi sintetici TR=30 anni												
	Durata 6 ore			Durata 9 ore			Durata 12 ore			Durata 15 ore			
	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	
Corso d'acqua													
Controfossa Destra F. Albegna	111.2	0.697	77.5	127.9	0.733	93.7	141.3	0.758	107.1	152.6	0.777	118.5	
T. Albegnaccia	108.8	0.689	74.9	125.2	0.725	90.8	138.3	0.750	103.8	149.4	0.769	114.9	
Canale Principale 2	112.0	0.691	77.4	129.5	0.728	94.2	143.5	0.753	108.0	155.5	0.772	120.0	
Canale Secondario 2	112.1	0.692	77.5	129.6	0.728	94.4	143.7	0.753	108.2	155.6	0.772	120.2	
F. Tizzano	113.4	0.697	79.0	131.1	0.733	96.0	145.2	0.758	110.1	157.3	0.777	122.2	
T. Osa	99.7	0.670	66.8	113.8	0.707	80.4	125.0	0.732	91.5	134.4	0.752	101.0	
Controfossa Sinistra T. Osa	109.1	0.687	74.9	125.7	0.723	90.9	139.1	0.748	104.1	150.4	0.767	115.4	

	Eventi sintetici TR=200 anni												
	Durata 6 ore			Durata 9 ore			Durata 12 ore			Durata 15 ore			
	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	
Corso d'acqua													
Controfossa Destra F. Albegna	173.2	0.697	120.7	204.5	0.733	149.9	230.0	0.758	174.4	252.0	0.777	195.8	
T. Albegnaccia	169.6	0.689	116.8	200.2	0.725	145.1	225.2	0.750	169.0	246.8	0.769	189.9	
Canale Principale 2	174.5	0.691	120.6	207.0	0.728	150.6	233.7	0.753	175.9	256.8	0.772	198.1	
Canale Secondario 2	174.7	0.692	120.8	207.2	0.728	150.9	233.9	0.753	176.2	257.0	0.772	198.5	
F. Tizzano	176.7	0.697	123.1	209.6	0.733	153.6	236.5	0.758	179.2	259.8	0.777	201.8	
T. Osa	155.3	0.670	104.0	181.9	0.707	128.5	203.5	0.732	149.0	222.0	0.752	166.9	
Controfossa Sinistra T. Osa	170.0	0.687	116.7	201.1	0.723	145.4	226.5	0.748	169.5	248.4	0.767	190.7	

	Eventi sintetici TR=500 anni												
	Durata 6 ore			Durata 9 ore			Durata 12 ore			Durata 15 ore			
	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	$h_{lorda}$ [mm]	Kr [-]	$h_{regg}$ [mm]	
Corso d'acqua													
Controfossa Destra F. Albegna	204.1	0.697	142.2	242.2	0.733	177.6	273.6	0.758	207.4	300.7	0.777	233.6	
T. Albegnaccia	199.7	0.689	137.5	237.1	0.725	171.9	267.9	0.750	201.0	294.4	0.769	226.5	
Canale Principale 2	205.5	0.691	142.1	245.2	0.728	178.4	278.0	0.753	209.2	306.3	0.772	236.4	
Canale Secondario 2	205.8	0.692	142.3	245.5	0.728	178.7	278.2	0.753	209.6	306.6	0.772	236.8	
F. Tizzano	208.2	0.697	145.0	248.3	0.733	181.9	281.3	0.758	213.2	309.9	0.777	240.7	
T. Osa	183.0	0.670	122.6	215.5	0.707	152.3	242.0	0.732	177.2	264.8	0.752	199.1	
Controfossa Sinistra T. Osa	200.2	0.687	137.5	238.2	0.723	172.2	269.4	0.748	201.6	296.4	0.767	227.5	

Tabella 5-2: Eventi sintetici - Altezze di pioggia e coefficienti di ragguaglio Modello 2 – Albegna Camporegio - Kr F. Albegna

<b>Eventi sintetici TR=30 anni RM</b>			
<b>Durata 6 ore</b>			
<b>Corso d'acqua</b>	<b><math>h_{lorda}</math> [mm]</b>	<b><math>K_r</math> [-]</b>	<b><math>h_{ragg}</math> [mm]</b>
Controfossa Destra F. Albegna	111.2	0.795	88.4
T. Albegnaccia	108.8	0.790	85.9
Canale Principale 2	112.0	0.792	88.6
Canale Secondario 2	112.1	0.792	88.8
F. Tizzano	113.4	0.795	90.2
T. Osa	99.7	0.777	77.5
Controfossa Sinistra T. Osa	109.1	0.789	86.0

<b>Eventi sintetici TR=200 anni RM</b>			
<b>Durata 6 ore</b>			
<b>Corso d'acqua</b>	<b><math>h_{lorda}</math> [mm]</b>	<b><math>K_r</math> [-]</b>	<b><math>h_{ragg}</math> [mm]</b>
Controfossa Destra F. Albegna	173.2	0.795	137.8
T. Albegnaccia	169.6	0.790	133.9
Canale Principale 2	174.5	0.792	138.1
Canale Secondario 2	174.7	0.792	138.3
F. Tizzano	176.7	0.795	140.5
T. Osa	155.3	0.777	120.7
Controfossa Sinistra T. Osa	170.0	0.789	134.0

<b>Eventi sintetici TR=500 anni RM</b>			
<b>Durata 6 ore</b>			
<b>Corso d'acqua</b>	<b><math>h_{lorda}</math> [mm]</b>	<b><math>K_r</math> [-]</b>	<b><math>h_{ragg}</math> [mm]</b>
Controfossa Destra F. Albegna	204.1	0.795	162.3
T. Albegnaccia	199.7	0.790	157.8
Canale Principale 2	205.5	0.792	162.7
Canale Secondario 2	205.8	0.792	163.0
F. Tizzano	208.2	0.795	165.5
T. Osa	183.0	0.777	142.2
Controfossa Sinistra T. Osa	200.2	0.789	157.9

Tabella 5-3: Eventi sintetici - Altezze di pioggia e coefficienti di ragguaglio Modello 2 – Albegna Camporegio –  $K_R$  reticolo minore

## 5.2.3 IDROGRAMMI DI PIENA

Alla luce di quanto argomentato ai paragrafi precedenti, gli idrogrammi di piena risultanti sono riportati di seguito.

Il suffisso RM nelle figure e tabelle seguenti indica gli idrogrammi ricavati utilizzando il  $K_R$  calcolato sui soli bacini del reticolo minore.

Corso d'acqua	TR30 anni d=06h RM		TR30 anni d=06h		TR30 anni d=09h		TR30 anni d=12h		TR30 anni d=15h	
	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]
Controfossa Destra F. Albegna	15	0.469	13	0.405	13	0.487	13	0.551	11	0.605
T. Albegnaccia	39	1.133	34	0.991	33	1.190	31	1.346	28	1.475
Canale Principale 2	16	0.408	14	0.351	13	0.425	11	0.484	10	0.534
Canale Secondario 2	2.2	0.051	1.9	0.044	1.7	0.054	1.5	0.062	1.3	0.068
F. Tizzano	7.0	0.178	6.0	0.154	5.6	0.186	5.0	0.211	4.4	0.233
T. Osa	207	4.886	173	4.044	156	4.786	135	5.331	116	5.751
Controfossa Sinistra T. Osa	19	0.374	16	0.320	13	0.388	11	0.441	9	0.487

Corso d'acqua	TR200 anni d=06h RM		TR200 anni d=06h		TR200 anni d=09h		TR200 anni d=12h		TR200 anni d=15h	
	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]
Controfossa Destra F. Albegna	25	0.758	22	0.658	22	0.816	21	0.945	20	1.057
T. Albegnaccia	63	1.870	54	1.614	56	2.000	52	2.318	48	2.592
Canale Principale 2	26	0.657	22	0.569	21	0.709	19	0.826	17	0.928
Canale Secondario 2	3.4	0.082	3.0	0.071	2.7	0.089	2.4	0.104	2.2	0.117
F. Tizzano	11.1	0.288	9.7	0.250	9.3	0.311	8.4	0.362	7.6	0.405
T. Osa	343	8.284	291	6.973	270	8.569	239	9.848	212	10.923
Controfossa Sinistra T. Osa	29	0.609	25	0.524	21	0.654	18	0.761	16	0.854

Corso d'acqua	TR500 anni d=06h RM		TR500 anni d=06h		TR500 anni d=09h		TR500 anni d=12h		TR500 anni d=15h	
	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]	Qmax [mc/s]	Volumi [Mmc]
Controfossa Destra F. Albegna	29	0.902	26	0.784	27	0.978	26	1.139	24	1.279
T. Albegnaccia	75	2.226	65	1.924	67	2.399	63	2.795	58	3.138
Canale Principale 2	31	0.781	26	0.677	25	0.849	23	0.994	21	1.120
Canale Secondario 2	4.0	0.097	3.5	0.084	3.2	0.106	2.9	0.124	2.6	0.140
F. Tizzano	13.2	0.342	11.5	0.297	11.1	0.372	10.1	0.435	9.2	0.490
T. Osa	411	9.971	349	8.427	326	10.432	290	12.063	259	13.452
Controfossa Sinistra T. Osa	35	0.725	30	0.626	25	0.785	22	0.918	20	1.034

Tabella 5-4: Portate al colmo e volumi di piena Modello 2 – Albegna Camporegio

## 5.3 VERIFICHE IDRAULICHE

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

La caratterizzazione geometrica del Fiume Albegna e del reticolo minore è stata ricavata dalla campagna di indagini topografiche eseguite a supporto della progettazione della cassa di espansione di Camporegio.

Le indagini topografiche sono state svolte in due tempi; nel 2014 come supporto alla progettazione definitiva e nel 2016 ad integrazione di quanto precedentemente realizzato.

Complessivamente, l'area oggetto di rilievo si estende lungo la linea ferroviaria Grosseto-Roma, a partire dal Torrente Osa a Nord sino ad arrivare al Fiume Albegna a Sud, più o meno parallelamente alla linea di costa, per una lunghezza di circa 5 Km, ed una larghezza (dalla linea ferroviaria verso l'interno) di circa 1.2-1.5 km. Lungo il fiume Albegna, in destra idraulica, risale poi dalla foce fino alla loc. Barca dei Grazi.

All'interno di detta area, sono stati definiti tramite la restituzione di idonei modelli numerici tridimensionali, gli alvei dei canali principali, la viabilità esistente oltre al terreno generico, andando ad integrare ed ampliare le aree coperte dai voli Lidar già in possesso della Regione Toscana.

Oltre alla definizione tridimensionale del terreno, sono stati rilevati e restituiti i prospetti delle opere di interferenza degli alvei, gli insediamenti civili e rurali, distinguendoli per tipo di delimitazione del loro perimetro, ovvero, privi di recinzione, recinzione con reti varie, recinzione con manufatti in muratura.

In totale sono stati rilevati:

- circa 37 km di alvei fluviali principali;
- circa 20 km di viabilità di vario genere;
- oltre 650 ha di piani quotati, di cui circa 100 ha in sovrapposizione con l'area coperta da Lidar;
- circa 50 prospetti di opere di interferenza sugli alvei;
- circa 900 punti di presa fotografica.

A partire dalle campagne topografiche succitate, è stato possibile caratterizzare i seguenti tratti fluviali:

- F. Albegna: tratto terminale del corso d'acqua dalla loc. Barca dei Grazi allo sbocco a mare, lunghezza 4.5 km, 42 sezioni fluviali (codifica da 00480\_\_16 a 00020\_\_16);
- Controfossa Destra F. Albegna: tratto terminale del corso d'acqua loc. Barca dei Grazi allo sbocco nel F. Albegna, lunghezza

- 4.5 km, 68 sezioni fluviali (codifica da 00506\_\_16 a 00017\_\_14);
- Torrente Albegnaccia: tratto terminale del corso d'acqua, da monte della Strada Provinciale n. 56 di San Donato fino alla confluenza con la Controfossa Destra F. Albegna, lunghezza 5.1 km, 67 sezioni fluviali (codifica da 00680\_\_14 a 00167\_\_14);
- Canale Principale 2: tratto afferente alle aree di cassa fino alla confluenza con il T. Albegnaccia, lunghezza 1.6 km, 21 sezioni fluviali (codifica 00159\_\_14 da a 0002PC14);
- Canale Secondario 2: tratto afferente alle aree di cassa fino alla confluenza con il Canale Principale 2, lunghezza 1.4 km, 18 sezioni fluviali (codifica da 00136\_\_14 a 0001PC14).

Ad integrazione di quanto sopra sono stati caratterizzati:

- Torrente Osa: tratto terminale del corso d'acqua dalla Strada Provinciale n. 56 di San Donato alla foce, lunghezza 4 km, 70 sezioni fluviali (codifica da 00345\_\_13 a 00023\_\_13); mutate dal rilievo post Evento Novembre 2012 eseguito dal Consorzio di Bonifica Toscana Sud a supporto dei lavori di sagomatura della sezione d'alveo;
- Controfossa Sinistra T. Osa: tratto terminale del corso d'acqua di lunghezza pari a 1.9 Km, sezioni fluviali (codifica da 00210\_\_09 a 00030\_\_09) mutate dagli studi idrologici ed idraulici di supporto al RUC di Orbetello.

Per la modellazione dell'area di cassa e dei territori limitrofi è stato costruito un modello digitale del terreno a partire dalle informazioni piano altimetriche delle indagini topografiche di supporto al progetto integrate ed ampliate con i voli Lidar disponibili.

### 5.3.2 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 mutuato dai risultati delle indagini topografiche.

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.

Per ulteriori dettagli si rimanda all'*Appendice A – Modellistica Idrologica Idraulica*.

### 5.3.3 VERIFICHE IDRAULICHE IMPLEMENTATE

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

Nel caso in esame, si fa riferimento al seguente scenario geometrico:

- **Stato Attuale:** rappresenta l'attuale configurazione del territorio dell'area di Camporegio.

A partire dall'analisi idrologica implementata e descritta al precedente paragrafo, è stato scelto di sollecitare il reticolo idraulico di Camporegio con i seguenti scenari idrologici:

- Eventi TR=30-200-500 anni critici per il reticolo minore (codici TR030 d=06h RM; TR200 d=06h RM; TR500 d=06h RM), ovvero con durata dell'evento di pioggia pari a 6 ore e utilizzando per la stima degli idrogrammi di piena del reticolo minore un coefficiente di ragguglio areale ricavato dai soli bacini minori. Per il F. Albegna la condizione al contorno di monte viene assunta pari all'idrogramma delle portate attese per l'evento TR=30 anni di durata 6 ore risultante dal Modello 1 - Albegna Monte (coefficiente di ragguglio areale ricavato sull'intero bacino F. Albegna);
- Eventi TR=200-500 anni di durata 6-9-12-15 ore calcolati utilizzando un coefficiente di ragguglio areale calcolato sul bacino complessivo.

### 5.3.4 RISULTATI

Sulla base del quadro conoscitivo, si è giunti alla caratterizzazione delle condizioni di pericolosità e rischio idraulico attuale delle aree di Camporegio.

Le verifiche implementate sullo Stato Attuale mostrano criticità idrauliche marcate e diffuse su tutto il territorio oggetto di studio.

Tutto il reticolo idraulico minore risulta fortemente insufficiente al contenimento degli eventi di piena ed è causa di allagamenti diffusi.

Le condizioni di allagabilità del territorio sono evidenziate nelle planimetrie di cui alle Tavole IDR21 - *Modello 2 Albegna Camporegio - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni* e IDR22 - *Modello 2 Albegna Camporegio - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni*.

Si precisa che, per il tempo di ritorno  $TR=30$  anni, le aree allagate sono relative all'evento di durata 6 ore utilizzando i valori di pioggia ragguagliata sull'area dei bacini del reticolo minore (suffisso RM), mentre per i tempi di ritorno duecentennale e cinquecentennale sono rappresentati gli inviluppi delle aree soggette ad esondazione derivati dalle simulazioni di tutte le durate derivate dall'analisi idrologica (6-9-12-15 ore con  $K_r$  calcolato sull'intero bacino del F. Albegna e 6 ore con  $K_r$  calcolato sul bacino del reticolo minore).

La capacità di invaso del tratto finale del fiume Albegna risulta fortemente limitata dalla presenza dei ponti della Ferrovia e della SS1 Aurelia che presentano quote dell'intradosso dell'impalcato inferiori alla testa arginale e provocano evidenti fenomeni di rigurgito e rischi in termini di sicurezza delle strutture.

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).

## 6. MODELLO IDROLOGICO IDRAULICO 3 – TALAMONE

Il presente modello riguarda la modellazione idrologica e idraulica del reticolo afferente al territorio di Talamone e delle aree in destra idraulica del Torrente Osa, non ricomprese nel Modello 2 – Albegna Camporegio.

L'analisi idrologica idraulica descritta di seguito è stata sviluppata ex novo a supporto del presente Piano Strutturale.

### 6.1 RETICOLO IDRAULICO DI RIFERIMENTO

Nella Tavola IDR.30 - Modello 3 Talamone - Tavola 1 – Planimetria si riporta il reticolo idraulico preso a riferimento nelle verifiche idrauliche, ovvero:

- Collettore Occidentale;
- Collettore Orientale e suo affluente Fosso della Bufalareccia;
- Torrente Osa (tratto terminale);
- Controfossa Destra F. Osa e suo affluente Fosso delle Giuncaie.

### 6.2 ANALISI IDROLOGICA

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. Per ogni sottobacino è stato quindi determinato un input idrologico di natura puntuale o distribuita a seconda delle caratteristiche del bacino analizzato.

Sulla base di questo sono stati individuati bacini e sottobacini identificati da un codice di 4 caratteri, 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.

NOME	CODICE	AREA
<b>Collettore Orientale Totale</b>	<b>1000</b>	<b>15.75</b>
Collettore Orientale Monte	1001	10.69
Grancina	1002	3.61
Bufalareccia	1003	1.23
<b>Collettore Occidentale Totale</b>	<b>2000</b>	<b>30.23</b>
Collettore Occidentale Monte	2001	24.54
<b>Interbacino Acque Basse</b>	<b>3000</b>	<b>4.30</b>
<b>Controfossa Destra F. Osa Totale</b>	<b>4000</b>	<b>2.70</b>
Controfossa Destra F. Osa Monte	4001	0.82
Fosso delle Giuncaie	4002	0.56
Controfossa Destra F. Osa Valle	4003	1.32

Tabella 6-1: Codifiche dei bacini e sottobacini oggetto di analisi idrologica Modello 3 - Talamone

Si precisa che per il Torrente Osa i parametri idrologici sono stati mutuati dal Modello 2 Albegna Camporegio (rif. Tabella 5-1).

Il bacino delle acque basse (cod. 3000) è stato utilizzato solo per il calcolo del coefficiente di ragguaglio delle piogge (vedi paragrafo 6.2.2).

#### 6.2.1 MODELLO IDROLOGICO

I modelli idrologici utilizzati consentono la determinazione dei contributi idrologici al reticolo idraulico oggetto di studio e sono composti da un modello di infiltrazione, per il calcolo delle perdite idrologiche, e da un modello afflussi-deflussi per la trasformazione degli input pluviometrici, depurati dalle perdite succitate, in idrogrammi sollecitanti il reticolo idraulico.

Nel caso in esame, in funzione delle caratteristiche morfologiche ed idrologiche dei bacini analizzati, sono stati utilizzati diversi approcci modellistici.

Per i corsi d'acqua poco gerarchizzati che interessano un territorio a vocazione prevalentemente agricola e bacini caratterizzati da basse pendenze, la stima delle perdite idrologiche è stata effettuata mediante il metodo CN del Soil Conservation Service (SCS).

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, stimati a partire dalla pedologia e dall'uso del suolo, 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.

I valori di CN utilizzati si riferiscono a condizioni di saturazione del terreno elevate (AMC III).

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.

La definizione dei bacini contribuenti 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.

Per i corsi d'acqua maggiormente gerarchizzati e che presentano quantomeno una porzione del bacino scolante collinare caratterizzata da pendenze più marcate, si è optato per la seguente modellazione idrologica:

- Metodo dell'Infiltrazione a Soglia per la stima delle perdite idrologiche;
- Modello di Nash a parametri concentrati per la stima degli idrogrammi di piena.

Il modello di infiltrazione asintotico a soglia richiede la definizione di due parametri:

- $I_a$  (mm), volume unitario di perdita iniziale che il terreno assorbe durante i primi istanti di precipitazione;
- $K_s$  (mm/h), coefficiente di infiltrazione a saturazione.

La stima di tali parametri deriva dall'analisi delle carte dell'uso del suolo e della geologia.

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi di Nash schematizza i bacini idrografici in una serie di serbatoi lineari disposti in serie e che dipende dai seguenti parametri:

- $n$  (-), numero di serbatoi lineari che rappresentano il bacino nella schematizzazione del modello di Nash;
- $k$  (h), tempo caratteristico che rappresenta il tempo di svuotamento del serbatoio.

Tali parametri sono stati ottenuti dalla gerarchizzazione del reticolo idrografico secondo il criterio di Horton e Strahler.

Fa eccezione a quanto sopra descritto il Collettore Occidentale per il quale è stato mutuato, in virtù delle integrazioni richieste tramite parere del Genio Civile Toscana Sud e dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, l'approccio metodologico adottato nell'ambito degli studi idraulici redatti a supporto del Piano Regolatore Portuale di Talamone dall'Ing. Moretti Luca. È stata dunque impiegata la seguente metodologia:

- Metodo del Curve Number (SCS-CN) per la stima delle perdite idrologiche;
- Modello di Nash a parametri concentrati per la stima degli idrogrammi di piena.

Il modello di infiltrazione SCS-CN richiede la definizione del parametro curve number (CN), per cui è stato utilizzato lo shapefile fornito da Regione Toscana sopra descritto. In conformità a quanto fatto nell'ambito degli studi idraulici, sia a supporto del PRP sia nei bacini dei modelli del presente studio le cui perdite sono state stimate con il metodo del CN, si è adottato un curve number corrispondente alla condizione di umidità antecedente AMC=III (di seguito indicato come CN III).

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi di Nash caratterizza i bacini idrografici attraverso i parametri  $n$  e  $k$ , precedentemente descritti ed ottenuti tramite gerarchizzazione del reticolo idrografico secondo il criterio di Horton e Strahler.

Per un approfondimento di quanto sopra riportato in merito al Collettore Occidentale si rimanda al paragrafo §6.2.3.

Per i dettagli sulla modellistica idrologica si rimanda all'Appendice A: *Modellistica idrologico-idraulica*. Una sintesi dei parametri idrologici utilizzati per ciascun bacino è riportata nella tabella seguente.

Codice Bacino	Nome Bacino	A [kmq]	$I_a$ [mm]	$K_s$ [mm/h]	$n$ -	$k$ [h]	Tl [h]
1000	Collettore Orientale Totale	15.75	7.29	0.72	2.69	0.58	1.57
1001	Collettore Orientale Monte	10.69	8.83	1.06	2.60	0.60	1.55
1002	Grancina	3.61	4.16	0.94	2.29	0.41	0.94
1003	Buřalareccia	1.23	3.80	0.46	2.58	0.15	0.39

Codice Bacino	Nome Bacino	A [kmq]	CN III	$n$ -	$k$ [h]	Tl [h]
2000	Collettore Occidentale Totale	30.2	81.4	2.749	0.930	2.556
2001	Collettore Occidentale Monte	24.5	84.4	2.686	0.720	1.935

Codice Bacino	Nome Bacino	A [km <sup>2</sup> ]	$H_{max}$ [m slm]	$H_{min}$ [m slm]	$H_m$ [m slm]	L [km]	CN [-]	tc [h]
4000	Controfossa Destra Osa Totale	2.7	121.0	0.2	31.7	3.5	89.0	2.6
4001	Controfossa Destra Osa Monte	0.8	120.4	2.6	23.9	1.5	88.8	1.6
4002	Fosso delle Giuncaie	0.6	121.0	4.4	58.3	1.1	89.9	0.8
4003	Controfossa Destra Osa Valle	1.3	101.3	0.2	25.2	2.0	88.8	1.9

Tabella 6-2: Parametri idrologici Modello 3 – Talamone

## 6.2.2 SOLLECITAZIONI PLUVIOMETRICHE

Gli eventi meteorici studiati fanno riferimento a tempi di ritorno di 30 e 200 anni. Come durate di pioggia si è scelto di studiare un set di durate dell'evento meteorico sintetico a cavallo della "durata critica" (durata che massimizza la portata al colmo) di ciascun contributo idrologico. Questa scelta ci consente di studiare anche gli eventi che possono avere maggiori esondazioni in termini di volumi, anche se caratterizzati da picchi dell'onda di piena minori.

L'aggiornamento dell'analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme fino all'anno 2012, elaborata nell'ambito dell'Accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012 e pubblicata da parte della Regione Toscana, costituisce la base dati aggiornata su cui implementare le analisi idrologiche.

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.

In Tabella 6-3 sono riportate le altezze di pioggia lorda (in mm) calcolate secondo la metodologia individuata dalla Regione Toscana. Per ogni tempo di ritorno considerato sono riportate le altezze di pioggia al variare della durata dell'evento meteorico considerato.

La pioggia lorda così calcolata, stimata sul bacino complessivo del reticolo studiato (circa 53 Km<sup>2</sup>) è stata opportunamente ragguagliata in funzione dell'area del bacino e della durata dell'evento meteorico.

Per il calcolo del coefficiente di ragguaglio areale, Kr, è stata utilizzata la formulazione suggerita nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana:

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

dove t è la durata dell'evento, A è l'area del bacino sotteso e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono parametri dipendenti dal bacino considerato ed assunti pari a:

$\alpha = 0.036a'$  con  $a'$  = parametro delle cpp nella forma trinomia  $h = a' T^m D^n$

$\beta = 0.25$

$\gamma = 0.01$

Pertanto, per il calcolo del Kr è stata eseguita la scomposizione dei due fattori a e n delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica dello Studio di Regionalizzazione in tre fattori a' n' m' mediante regressione logaritmica multipla.

L'area del bacino sotteso per il calcolo di Kr è stata assunta pari alla superficie del bacino complessivo di Talamone (bacini 1000+2000+3000, circa 50 km<sup>2</sup>) per il ragguaglio delle piogge attese sui bacini del Collettore Occidentale ed Orientale, e pari al bacino complessivo della Controfossa Destra del T. Osa (bacino 4000, circa 3 km<sup>2</sup>) per i bacini in destra idraulica del Torrente Osa. In tal modo risultano massimizzati gli effetti attesi nei due comprensori.

Gli ietogrammi di pioggia sono stati assunti ad intensità costante.

Codice Bacino	Nome Bacino	TR [anni]	d [h]	h <sub>lorda</sub> [mm]	Kr [-]	h <sub>ragg</sub> [mm]
1000-2000-3000	Talamone	30	1	56.3	0.807	45.5
			2.5	76.4	0.839	64.1
			4	89.4	0.856	76.5
			6	102.3	0.871	89.1
		200	1	78.4	0.807	63.2
			2.5	112.7	0.839	94.6
			4	135.7	0.856	116.2
			6	159.4	0.871	138.9
4000	Controfossa Destra T.Osa	30	1	56.3	0.988	55.6
			2.5	76.4	0.990	75.6
			4	89.4	0.991	88.5
			6	102.3	0.992	101.4
		200	1	78.4	0.988	77.4
			2.5	112.7	0.990	111.5
			4	135.7	0.991	134.5
			6	159.4	0.992	158.1

Tabella 6-3: Altezze di pioggia (mm) e coefficienti di ragguaglio Modello 3 – Talamone

### 6.2.3 VALUTAZIONI DI COERENZA CON GLI STUDI A SUPPORTO DEL PIANO REGOLATORE PORTUALE DI TALAMONE

In virtù delle integrazioni pervenute a seguito del parere reso dall’Autorità di Bacino Distrettuale dell’Appennino Settentrionale, relativamente alle condizioni al contorno da implementare nella modellistica idraulica del Collettore Occidentale, si è adottato l’approccio metodologico assunto per le indagini redatte a supporto del Piano Regolatore Portuale (PRP) di Talamone redatto ai sensi dell’art.86 della L.R. 65/2014 dall’Ing. Luca Moretti con lo scopo di garantire coerenza tra i due studi.

Per la modellazione idrologica è stata dunque impiegata la metodologia basata sul Metodo del Curve Number (SCS-CN) per la stima delle perdite idrologiche e sul Modello di Nash a parametri concentrati per la stima degli idrogrammi di piena, così come descritto al paragrafo §6.2.1.

Si precisa che, date le diverse finalità dei due studi, questi sono stati cimentati su eventi sintetici con set di durate non coincidenti ed una discretizzazione dei bacini diversa. Difatti, nell’ambito del PRP di Talamone si è fatto riferimento al bacino totale e ad un evento di durata critica per il bacino complessivo (pari a  $d=5.17$  h), mentre nel presente studio tale bacino è suddiviso in un bacino di monte ed un interbacino di valle con riferimento ad un set di durate pari a  $d= 1, 2.5, 4$  e  $6$  ore.

Inoltre, gli input pluviometrici utilizzati per la determinazione degli idrogrammi da utilizzare nella modellazione idraulica del presente studio sono stati ragguagliati sulla superficie del bacino complessivo di Talamone (bacini  $1000+2000+3000$ , circa  $50$  kmq) al fine di valutare gli effetti attesi sull’intero comprensorio.

Tuttavia, allo scopo di mostrare la coerenza tra i due studi, si è provveduto ad implementare, a titolo di esempio, un evento sintetico di durata pari a  $5$  h e tempo di ritorno  $200$  anni sul bacino complessivo, utilizzando un coefficiente di ragguaglio areale calcolato sull’area del solo bacino del Collettore Occidentale. Tale comparazione è riportata in Figura 6-1 e mostra una sostanziale concordanza di risultati.

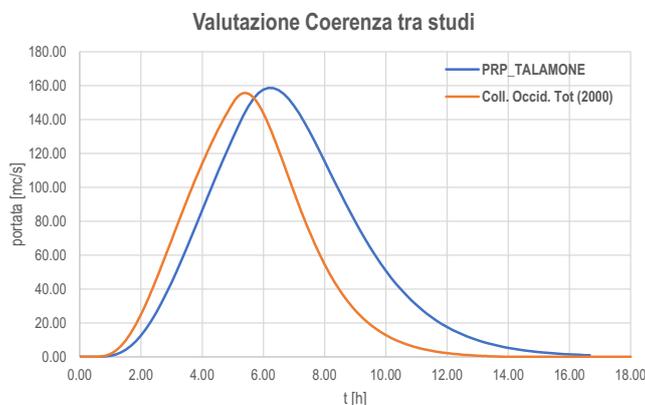


Figura 6-1: Valutazione coerenza tra modellazione idrologica Collettore Occidentale (evento sintetico TR 200 –  $d=5$  [h]) e PRP Talamone (TR 200 –  $d= 5.17$  [h])

### 6.2.4 IDROGRAMMI DI PIENA

Per ognuna delle altezze di pioggia calcolate (caratterizzate da un tempo di ritorno e una durata dell’evento meteorico), opportunamente ragguagliate e depurate delle perdite idrologiche così come argomentato ai paragrafi precedenti, si sono determinati gli idrogrammi di piena su ciascuno bacino/interbacino di interesse.

Nella Tabella 6-4 si riporta l’elenco degli input idrologici, suddivisi per bacini e corsi d’acqua, utilizzati nella modellistica idraulica. La tabella riporta il corso d’acqua di riferimento, il tipo di immissione (CM identifica le condizioni al contorno di monte, CP i contributi puntuali inseriti lungo l’asta fluviale e CD i contributi distribuiti), una descrizione sintetica dell’immissione, la/e sezione/i sollecitate.

CORSO D’ACQUA	TIPO IMMISSIONE	CODICE CONTRIBUTIVO IDROLOGICO	DESCRIZIONE	SEZIONE
COLLETTORE OCCIDENTALE	CM	2001	Collettore Occidentale - Bacino di monte	00313_05
	CD	2000-2001	Collettore Occidentale - Interbacino	00310_05-00030_05
COLLETTORE ORIENTALE	CM	1001	Collettore Orientale - Bacino di monte	00452_14
	CP	1002	Grancina	00219_14
BUFALARECCIA	CM	1003	Bufalareccia	00067_14
TORRENTE OSA	CM	---	T. Osa	00140_13
CONTROFOSSA DESTRA T.OSA	CM	4001	Controfossa Dx Osa - Bacino di monte	00344_06
	CD	4003	Controfossa Dx Osa - Interbacino di valle	00190_09-00075PA09
GIUNCAIE	CM	4002	Giuncaie	00029_10

Tabella 6-4: Elenco dei bacini e degli input idrologici alla modellazione idraulica Modello 3 – Talamone

Si precisa a tal proposito che il contributo dell’interbacino di valle del Collettore Occidentale è stato calcolato per differenza tra l’idrogramma del bacino complessivo (cod. 2000) e l’idrogramma del sottobacino di monte (2001).

Per il Torrente Osa gli idrogrammi sono stati calcolati utilizzando la parametrizzazione idrologica del Modello 2, mentre gli input pluviometrici (pioggia lorda e coefficienti di ragguaglio) sono stati ricalcolati, per i tempi di ritorno e le durate considerate, sul bacino complessivo del T. Osa (78.6 kmq).

I risultati dell'analisi idrologica sono sintetizzati in Tabella 6-5, in cui si riportano i valori di portata di picco [mc/s] e di volumi [mcx1000] stimati per gli scenari di evento su cui è stato cimentato il modello idraulico. Gli idrogrammi completi sono riportati nell'elaborato IDR.00B Allegato 1 - Modellistica Idrologica.

Codice	Corso d'acqua	Tr030 d=1h		Tr030 d=2.5h		Tr030 d=4h		Tr030 d=6h	
		Qmax	Volumi	Qmax	Volumi	Qmax	Volumi	Qmax	Volumi
1001	Collettore Orientale - bacino di monte	50.6	380	59.0	563	51.5	678	40.8	790
1002	Grancina	28.2	146	24.0	208	18.2	248	14.0	286
1003	Bufulareccia	14.9	51	8.6	73	6.4	87	4.9	101
2001	Collettore Occidentale - bacino di monte	42.6	385	71.3	725	78.8	967	75.7	1225
2000-2001	Collettore Occidentale - interbacino	5.8	66	12.5	145	16.1	193	17.8	224
---	Torrente Osa	143.0	143	201.5	202	222.2	222	220.2	220
4001	Controfossa Destra T. Osa - bacino di monte	4.3	24	4.8	39	4.2	49	3.5	59
4002	Giuncaie	4.9	18	4.0	28	3.1	35	2.5	42
4003	Controfossa Destra T. Osa - bacino di monte	5.9	40	7.2	62	6.6	79	5.5	95

Codice	Corso d'acqua	Tr200 d=1h		Tr200 d=2.5h		Tr200 d=4h		Tr200 d=6h	
		Qmax	Volumi	Qmax	Volumi	Qmax	Volumi	Qmax	Volumi
1001	Collettore Orientale - bacino di monte	75.3	570	90.6	888	80.4	1102	65.4	1321
1002	Grancina	40.2	210	36.0	318	28.2	391	22.3	466
1003	Bufulareccia	20.8	72	12.8	110	9.8	136	7.7	163
2001	Collettore Occidentale - bacino di monte	77.7	705	129.5	1346	142.3	1825	134.0	2326
2000-2001	Collettore Occidentale - interbacino	12.5	142	25.9	303	32.8	400	35.0	470
---	Torrente Osa	213.1	213	316.1	316	358.5	358	364.0	364
4001	Controfossa Destra T. Osa - bacino di monte	6.9	41	7.9	66	6.9	84	5.7	103
4002	Giuncaie	7.6	29	6.3	47	5.0	59	4.0	72
4003	Controfossa Destra T. Osa - bacino di monte	9.6	65	11.9	107	10.8	136	9.1	167

Tabella 6-5: Portate massime [mc/s] e volumi di piena Modello 3 - Talamone

Si precisa in ultimo che per il Torrente Osa, oggetto di modellazione sia nel Modello 2 – Camporegio sia nel Modello 3 - Talamone, le risultanze del Modello Idraulico 3 appena descritte (riassunte in Tabella 6-5) sono da considerarsi le critiche per il torrente stesso in quanto ottenute ragguagliando le altezze di pioggia sull'area del bacino del Torrente stesso al fine di massimizzarne gli effetti. Nell'ambito del Modello 2 gli eventi di pioggia sono invece stati ragguagliati rispettivamente sull'area complessiva del bacino del Fiume Albegna e sull'area complessiva del reticolo minore (eventi con suffisso RM), al fine di massimizzare gli effetti di allagamento dell'intero sistema fluviale indagato.

## 6.3 VERIFICHE IDRAULICHE

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

Il software utilizzato per la modellazione idraulica è HEC-RAS 5.0.7 distribuito da US Army Corps of Engineers. Il modello permette di effettuare analisi idrauliche monodimensionali, bidimensionali ed accoppiate mono-bidimensionali. Quest'ultima tipologia di modellazione è particolarmente indicata per la simulazione degli eventi di piena in cui il flusso nell'alveo fluviale viene schematizzato con un moto 1D, mentre la propagazione della piena sulle aree inondabili, attraverso un moto 2D.

Per ulteriori dettagli si rimanda all'Appendice A: Modellistica idrologico-idraulica.

Il modello idraulico implementato è un modello accoppiato mono-bidimensionale che ricomprende:

- l'asta principale del Collettore Occidentale;
- l'asta principale del Collettore Orientale e del suo affluente, Fosso della Bufulareccia;
- il tratto terminale del Torrente Osa;
- l'asta principale della Controfossa Destra del T. Osa e del suo affluente, Fosso delle Giuncaie.

Il tratto modellato del Collettore Occidentale si estende dalla loc. Podere San Giuseppe allo sbocco a mare, per circa 3 km. La caratterizzazione geometrica del corso d'acqua è stata mutuata dalle sezioni di rilievo del 2005.

L'asta del Collettore Orientale oggetto di modellazione si estende dalla loc. Podere Laschi fino al mare, per circa 4.5 km. Con esso viene studiato il Fosso della Bufulareccia, suo affluente in sinistra idraulica, per un tratto di circa 600 m. È stato inoltre inserito il contributo idrologico del Fosso della Grancina. La caratterizzazione geometrica deriva da rilievi eseguiti nel 2014.

Gli altri corsi d'acqua inseriti nel modello sono il tratto terminale del T. Osa (circa 1.4 Km, sezioni del 2013), la Controfossa Destra del T. Osa (3 km), e il suo affluente Fosso delle Giuncaie (300 m), utilizzando sezioni di rilievo del 2009-2010.

Il territorio potenzialmente soggetto ad allagabilità dal sistema fluviale sopra descritto, modellato tramite un DTM ricavato da Lidar (e da CTR10k ove non presente la copertura LIDAR) ricomprende un areale complessivo di circa 12 Km<sup>2</sup>. Si precisa che tale DTM è stato ricavato tramite il Lidar fornito dal Regione Toscana e, ove non presente, tramite il Lidar fornito dal Ministero dell'Ambiente.

Le sezioni fluviali utilizzate nella modellazione monodimensionale sono individuate attraverso un codice alfanumerico che contiene al proprio interno le seguenti informazioni:

(Esempio: sezione 01542PB03)

- 5 caratteri (Esempio: 00320) identificativo del codice della sezione;
- 2 caratteri (Esempio: PB) identificativo delle opere idrauliche; se non presenti si utilizzano i caratteri: \_\_
- 2 caratteri (Esempio:13) identificativo dell'anno del rilievo topografico.

Su ciascuna sezione è stata individuata la quota di "sfioro" (quote del massimo contenimento delle acque in alveo), in destra e sinistra idraulica, che rappresenta l'informazione necessaria al software HEC-RAS per l'accoppiamento del modello monodimensionale a quello bidimensionale.

La risoluzione generale della cella di calcolo della mesh è stata assegnata pari a 10x10 m, ad eccezione dell'area di acque basse compresa tra il Collettore Orientale ed il Collettore Occidentale alla quale è stata assegnata una cella pari a 20 x 20 m data la morfologia pianeggiante dell'area. Ove necessario, la mesh è stata successivamente infittita e dettagliata in corrispondenza dei limiti significativi aventi funzionalità idraulica (viabilità, attraversamenti, ecc...) sino ad una risoluzione di 5 m circa dove necessario.

I tratti dei corsi d'acqua oggetto di studio, le sezioni fluviali e le opere dell'arte implementate, il dominio dell'area 2D, le breaklines utilizzate per infittire la mesh sono riportati nell'elaborato IDR.30 - Modello 3 Talamone - Tavola 1 – Planimetria. Tale elaborato è corredato anche delle condizioni al contorno implementate e descritte nel seguente paragrafo.

### 6.3.2 CONDIZIONI AL CONTORNO E PARAMETRI DEL MODELLO IDRAULICO

Le condizioni al contorno dei modelli idraulici analitici sono rappresentate da:

- Sollecitazioni idrologiche in testa ad ogni tratto simulato idraulicamente;
- Immissioni idrologiche puntuali in corrispondenza delle confluenze con corsi d'acqua non oggetto di simulazione idraulica;
- Immissioni idrologiche distribuite, nel caso di contributo derivante da un interbacino che non presenta un reticolo idrografico di riferimento;
- Idrogramma dei livelli alla foce, che in questo caso è rappresentato da un livello costante del mare posto pari a 1 m slm per il sistema Osa ed affluenti, e 0.75 m slm per il sistema Collettori ed affluenti al fine di garantire la congruenza con il PRP Talamone.

In Tabella 6-5 sono riportati i massimi valori di portata  $Q_{max}$  [mc/s] associati agli idrogrammi impiegati come condizioni di monte alle aste fluviali o come immissioni puntuali e distribuite per i diversi tempi di ritorno (30 e 200 anni) e per le diverse durate di pioggia: 1, 2.5, 4.0 e 6.0 ore. Gli idrogrammi completi sono riportati in *IDR.00B Allegato 1 - Modellistica Idrologica*.

Per ciò che attiene ai coefficienti di scabrezza da associare alle singole sezioni fluviali, attraverso il confronto con i parametri riportati in letteratura ed il supporto dei sopralluoghi effettuati, è stato possibile associare ad ogni corso d'acqua, il coefficiente di scabrezza, secondo Manning, più appropriato.

In particolare, è stato scelto di adottare un coefficiente di Manning pari a  $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$  per il T. Osa e la Controfossa Destra,  $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$  per il fosso delle Giuncaie e  $0.033 \text{ s/m}^{1/3}$  ~~0.033 s/m<sup>1/3</sup>~~  $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$  sugli altri corsi d'acqua (al fine di garantire la congruenza con il PRP Talamone).

Per quanto riguarda la scabrezza delle aree limitrofe ai corsi d'acqua, simulate dal modello bidimensionale, si è scelto di adottare una scabrezza ~~unica~~ pari a  $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$  per il Torrente Osa ed i suoi affluenti, mentre sulle aree di Talamone si è adottata una scabrezza pari a  $0.06 \text{ s/m}^{1/3}$  (al fine di garantire la congruenza con il PRP Talamone).

### 6.3.3 VERIFICHE IDRAULICHE IMPLEMENTATE

Le verifiche idrauliche sono state svolte nello scenario geometrico dello stato attuale per gli eventi con TR 30 e 200 anni e durate di pioggia pari a 1.0-2.5-4.0-6.0 ore.

### 6.3.4 RISULTATI

L'implementazione della modellistica idraulica di tipo analitico fornisce, per ciascuno degli eventi studiati, i valori di massimo livello e portata in alveo per ciascuna sezione dei corsi d'acqua analizzati, ed i battenti e velocità nelle aree soggette ad allagamento.

Per ogni tempo di ritorno sono stati inviluppati i massimi livelli in alveo ed i battenti e le velocità nelle aree allagate risultanti dalle simulazioni idrauliche svolte sulle varie durate di pioggia. Con questa impostazione si restituiscono:

- Inviluppo dei battenti idrometrici massimi nelle aree allagate per TR=30-200 anni:

- IDR.31 - Modello 3 Talamone - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni;*  
*IDR.32 - Modello 3 Talamone - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni;*
- Inviluppo delle velocità massime nelle aree allagate per TR=30-200 anni:  
*IDR.33 - Modello 3 Talamone – Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni;*  
*IDR.34 - Modello 3 Talamone - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni;*
  - Inviluppo dei livelli massimi attesi in alveo per TR=30-200 anni:  
*IDR.35 - Modello 3 Talamone - Tavola 6 - Libretti sezioni e profili con livelli idrometrici TR=30-200 anni.*

Per ogni altro risultato di output si rimanda alla consultazione dei files del modello idraulico allegato allo studio.

## 7. MODELLO IDROLOGICO IDRAULICO 4 – ALBINIA

Il presente modello riguarda la modellazione idrologica e idraulica del reticolo posto in sinistra idraulica del Fiume Albegna, in prossimità dell'abitato di Albinia, come illustrato in Tavola IDR.40 - Modello 4 Albinia - Tavola 1 – Planimetria.

L'analisi idrologica idraulica descritta di seguito è stata sviluppata ex novo a supporto del presente Piano Strutturale.

### 7.1 RETICOLO IDRAULICO DI RIFERIMENTO

Nella Tavola IDR.40 - Modello 4 Albinia - Tavola 1 – Planimetria si riporta il reticolo idraulico preso a riferimento nelle verifiche idrauliche, ovvero:

- Controfossa Sinistra F. Albegna;
- Canale Principale n.4;
- Canale Principale n.5;
- Canale Principale n.6;
- Canale Secondario N.16 e Fosso n.8.

### 7.2 ANALISI IDROLOGICA

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. Per ogni sottobacino è stato quindi determinato un input idrologico di natura puntuale o distribuita a seconda delle caratteristiche del bacino analizzato.

Sulla base di questo sono stati individuati bacini e sottobacini identificati da un codice di 4 caratteri, 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.

NOME	CODICE	AREA
<b>Controfossa Sinistra F.Albegna totale</b>	<b>5000</b>	<b>7.3</b>
Controfossa Sinistra F.Albegna monte	5001	6.8
Controfossa Sinistra F.Albegna interbacino	5002	0.2
Controfossa Sinistra F.Albegna valle	5003	0.3
<b>Canale Principale 4 totale</b>	<b>6000</b>	<b>23.5</b>
Canale Principale 4 monte	6001	10.2
Canale Principale 4 Fosso N.3	6002	5.8
Canale Principale 4 Intebacino DX	6003	1.4
Canale Principale 4 Intebacino SX	6004	1.9
Fosso N.8	6005	1.4
Canale Secondario 16	6006	1.7
Canale Principale 4 Intebacino Valle	6007	1.2
<b>Canale Principale 5 totale</b>	<b>7000</b>	<b>3.5</b>
<b>Canale Principale 6 totale</b>	<b>8000</b>	<b>2.2</b>
Canale Principale 6 monte	8001	1.7
Canale Principale 6 interbacino	8002	0.4
Canale Principale 6 valle	8003	0.2

Tabella 7-1: Codifiche dei bacini e sottobacini oggetto di analisi idrologica Modello 4 - Albinia

#### 7.2.1 MODELLO IDROLOGICO

I modelli idrologici utilizzati consentono la determinazione dei contributi idrologici al reticolo idraulico oggetto di studio e sono composti da un modello di infiltrazione, per il calcolo delle perdite idrologiche, e da un modello afflussi-deflussi per la trasformazione degli input pluviometrici, depurati dalle perdite succitate, in idrogrammi sollecitanti il reticolo idraulico.

Nel caso in esame, in funzione delle caratteristiche morfologiche ed idrologiche dei bacini analizzati, sono state utilizzati diversi approcci modellistici.

Per i corsi d'acqua poco gerarchizzati che interessano un territorio a vocazione prevalentemente agricola e bacini caratterizzati da basse pendenze, la stima delle perdite idrologiche è stata effettuata mediante il metodo CN del Soil Conservation Service (SCS)

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, stimati a partire dalla pedologia e dall'uso del suolo, 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.

I valori di CN utilizzati si riferiscono a condizioni di saturazione del terreno elevate (AMC III).

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.

La definizione dei bacini contribuenti 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.

Per i corsi d'acqua maggiormente gerarchizzati e che presentano quantomeno una porzione del bacino scolante collinare caratterizzata da pendenze più marcate, si è optato per la seguente modellazione idrologica:

- Metodo dell'Infiltrazione a Soglia per la stima delle perdite idrologiche;
- Modello di Nash a parametri concentrati per la stima degli idrogrammi di piena.

Il modello di infiltrazione asintotico a soglia richiede la definizione di due parametri:

- $la$  (mm), volume unitario di perdita iniziale che il terreno assorbe durante i primi istanti di precipitazione;
- $Ks$  (mm/h), coefficiente di infiltrazione a saturazione.

La stima di tali parametri deriva dall'analisi delle carte dell'uso del suolo e della geologia.

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi di Nash schematizza i bacini idrografici in una serie di serbatoi lineari disposti in serie e che dipende dai seguenti parametri:

- $n$  (-), numero di serbatoi lineari che rappresentano il bacino nella schematizzazione del modello di Nash;
- $k$  (h), tempo caratteristico che rappresenta il tempo di svuotamento del serbatoio.

Tali parametri sono stati ottenuti dalla gerarchizzazione del reticolo idrografico secondo il criterio di Horton e Strahler.

Per i dettagli sulla modellistica idrologica si rimanda all'Appendice A: *Modellistica idrologico-idraulica*.

Una sintesi dei parametri idrologici utilizzati per ciascun bacino è riportata nella tabella seguente.

<b>Codice Bacino</b>	<b>Nome Bacino</b>	<b>A [kmq]</b>	<b>Hmax [m slm]</b>	<b>Hmin [m slm]</b>	<b>Hm [m slm]</b>	<b>L [km]</b>	<b>CN III [-]</b>	<b>tc [h]</b>
<b>5000</b>	<b>Controfossa Sinistra F.Albegna totale</b>	<b>7.3</b>	<b>22.76</b>	<b>0.99</b>	<b>9.29</b>	<b>7.70</b>	<b>89</b>	<b>9.69</b>
5001	Controfossa Sinistra F.Albegna monte	6.8	22.76	3.83	9.70	4.13	92	8.56
5002	Controfossa Sinistra F.Albegna interbacino	0.2	9.59	3.58	4.93	0.99	87	3.71
5003	Controfossa Sinistra F.Albegna valle	0.3	5.85	0.99	3.19	2.58	91	5.06
<b>6000</b>	<b>Canale Principale 4 totale</b>	<b>23.5</b>	<b>353.81</b>	<b>0.24</b>	<b>102.73</b>	<b>14.90</b>	<b>83</b>	<b>5.16</b>
6003	Canale Principale 4 Intebacino DX	1.4	7.59	1.52	4.13	1.88	92	5.90
6004	Canale Principale 4 Intebacino SX	1.9	29.07	1.47	8.99	0.94	84	3.15
6005	Fosso N.8	1.4	145.00	4.68	26.06	0.93	79	1.66
6006	Canale Secondario 16	1.7	9.18	0.57	3.91	2.07	86	5.66
6007	Canale Principale 4 Intebacino Valle	1.1	4.67	0.24	2.22	2.47	92	7.10
<b>7000</b>	<b>Canale Principale 5 totale</b>	<b>3.5</b>	<b>233.05</b>	<b>0.21</b>	<b>19.86</b>	<b>2.41</b>	<b>82</b>	<b>3.12</b>
<b>8000</b>	<b>Canale Principale 6 totale</b>	<b>2.2</b>	<b>6.46</b>	<b>0.43</b>	<b>1.86</b>	<b>3.38</b>	<b>91</b>	<b>11.55</b>
8001	Canale Principale 6 monte	1.7	6.45	0.42	1.92	2.48	91	9.17
8002	Canale Principale 6 interbacino	0.3	3.54	0.87	1.54	0.32	92	4.34
8003	Canale Principale 6 valle	0.2	3.68	0.65	1.87	0.57	90	2.79

<b>Codice Bacino</b>	<b>Nome Bacino</b>	<b>A [kmq]</b>	<b>L [km]</b>	<b>la [mm]</b>	<b>Ks [mm/h]</b>	<b>n -</b>	<b>k [h]</b>	<b>Tl [h]</b>
6001	Canale Principale 4 monte	10.2	5.20	11.09	4.20	2.81	0.46	1.29
6002	Canale Principale 4 Fosso N.3	5.8	3.81	13.59	3.91	2.63	0.49	1.29

Tabella 7-2: Parametri idrologici Modello 4 - Albinia

## 7.2.2 SOLLECITAZIONI PLUVIOMETRICHE

Gli eventi meteorici studiati fanno riferimento a tempi di ritorno di 30 e 200 anni. Come durate di pioggia si è scelto di studiare un set di durate dell'evento meteorico sintetico a cavallo della "durata critica" (durata che massimizza la portata al colmo) di ciascun contributo idrologico. Questa scelta ci consente di studiare anche gli eventi che possono avere maggiori esondazioni in termini di volumi, anche se caratterizzati da picchi dell'onda di piena minori.

L'aggiornamento dell'analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme fino all'anno 2012, elaborata nell'ambito dell'Accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012 e pubblicata da parte della Regione Toscana, costituisce la base dati aggiornata su cui implementare le analisi idrologiche.

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.

In Tabella 6-3 sono riportate le altezze di pioggia lorda (in mm) calcolate secondo la metodologia individuata dalla Regione Toscana. Per ogni tempo di ritorno considerato sono riportate le altezze di pioggia al variare della durata dell'evento meteorico considerato.

La pioggia lorda così calcolata, stimata sul bacino complessivo del reticolo studiato (circa 37 Km<sup>2</sup>) è stata opportunamente ragguagliata in funzione dell'area del bacino e della durata dell'evento meteorico.

Per il calcolo del coefficiente di ragguaglio areale, Kr, è stata utilizzata la formulazione suggerita nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana:

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

dove t è la durata dell'evento, A è l'area del bacino sotteso e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono parametri dipendenti dal bacino considerato ed assunti pari a:

$\alpha = 0.036a'$  con  $a'$  = parametro delle cpp nella forma trinomia  $h = a' Tr^m D^n$

$\beta = 0.25$

$\gamma = 0.01$

Pertanto, per il calcolo del Kr è stata eseguita la scomposizione dei due fattori a e n delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica dello Studio di Regionalizzazione in tre fattori a' n' m' mediante regressione logaritmica multipla.

L'area del bacino sotteso per il calcolo di Kr è stata assunta pari alla superficie del bacino complessivo (bacini 5000+6000+7000+8000, circa 37 km<sup>2</sup>).

Gli ietogrammi di pioggia sono stati assunti ad intensità costante.

Codice Bacino	Nome Bacino	TR [anni]	d [h]	h <sub>lorda</sub> [mm]	Kr [-]	h <sub>ragg</sub> [mm]
6000-7000- 8000-9000	Albinia	30	3	87.8	0.888	78.0
			6	110.3	0.908	100.2
			9	126.1	0.919	115.9
			12	138.6	0.927	128.5
		200	3	130.9	0.888	116.3
			6	171.9	0.908	156.1
			9	201.6	0.919	185.3
			12	225.7	0.927	209.2

Tabella 7-3: Altezze di pioggia (mm) e coefficienti di ragguaglio Modello 4 - Albinia

## 7.2.3 IDROGRAMMI DI PIENA

Per ognuna delle altezze di pioggia calcolate (caratterizzate da un tempo di ritorno e una durata dell'evento meteorico), opportunamente ragguagliate e depurate delle perdite idrologiche così come argomentato ai paragrafi precedenti, si sono determinati gli idrogrammi di piena su ciascuno bacino/interbacino di interesse.

Nella Tabella 7-4 si riporta l'elenco degli input idrologici, suddivisi per bacini e corsi d'acqua, utilizzati nella modellistica idraulica. La tabella riporta il corso d'acqua di riferimento, il tipo di immissione (CM identifica le condizioni al contorno di monte, CP i contributi puntuali inseriti lungo l'asta fluviale e CD i contributi distribuiti), una descrizione sintetica dell'immissione, la/e sezione/i sollecitate.

CORSO D'ACQUA	TIPO IMMISSIONE	CODICE CONTRIBUTIVO IDROLOGICO	DESCRIZIONE	SEZIONE
CONTROFOSSA SINISTRA F. ALBEGNA	CM	5001	Controfossa Sinistra F. Albegna - bacino di monte	00555PB10
	CD	5002	Controfossa Sinistra F. Albegna - interbacino 1	00555PC10-00484PB10
	CD	5003	Controfossa Sinistra F. Albegna - interbacino 2	00476__10-00260__05
CANALE PRINCIPALE N.4	CM	6001	Canale Principale N.4 - bacino di monte	00364__04
	CP	6002	Fosso N.3	00311__04
	CD	6003	Canale Principale N.4 - interbacino dx	00305PD04-00276PA04
	CD	6004	Canale Principale N.4 - interbacino sx	00305PD04-00276PA04
	CD	6005	Canale Principale N.4 - interbacino di valle	00276PC04-00166PC04
CANALE PRINCIPALE N.5	CD	7000	Canale Principale N.5	00261__14-00045PB14
CANALE PRINCIPALE N.6	CM	8001	Canale Principale N.6 - bacino di monte	00216__10
	CD	8002	Canale Principale N.6 - interbacino 1	00187PB10-00166__10
	CD	8003	Canale Principale N.6 - interbacino 2	00163PC10-00109PB10
CANALE SECONDARIO N. 16	CD	6006	Canale Secondario N.16	00001__10-00203__10
FOSSO N. 8	CM	6005	Fosso N. 8	00261__10

Tabella 7-4: Elenco dei bacini e degli input idrologici alla modellazione idraulica Modello 4 – Albinia

I risultati dell'analisi idrologica sono sintetizzati in Tabella 7-5 in cui si riportano i valori di portata di picco [mc/s] e di volumi [mcx1000] stimati per gli scenari di evento su cui è stato cimentato il modello idraulico. Gli idrogrammi completi sono riportati nell'elaborato IDR.00B Allegato 1 - Modellistica Idrologica.

Codice	Corso d'acqua	Tr030 d=3h		Tr030 d=6h		Tr030 d=9h		Tr030 d=12h	
		Qmax	Volumi	Qmax	Volumi	Qmax	Volumi	Qmax	Volumi
5001	Controfossa sx Albegna - bacino di monte	14.3	388	17.7	529	17.9	628	17.0	700
5002	Controfossa sx Albegna - interbacino	0.8	11	0.8	15	0.7	19	0.6	21
5003	Controfossa sx Albegna - bacino di valle	0.9	15	1.0	21	0.9	25	0.8	29
6001	Canale Principale N.4 - bacino di monte	59.3	574	35.5	682	24.7	724	18.5	730
6002	Canale Principale N.4 - Fosso N.3	33.7	315	20.5	382	14.3	410	10.9	421
6003	Canale Principale N.4 - Interbacino DX	4.1	80	4.6	110	4.3	132	3.9	150
6004	Canale Principale N.4 - Interbacino SX	6.4	77	6.5	113	5.7	140	4.9	161
6005	Fosso N.8	5.4	45	4.8	69	4.0	87	3.5	103
6006	Canale Secondario N.16	3.9	72	4.6	104	4.5	128	4.2	147
6007	Canale Principale N.4 - Interbacino Valle	2.9	66	3.4	90	3.3	108	3.0	121
7000	Canale Principale N.5	11.0	130	11.3	194	10.0	241	8.9	280
8001	Canale Principale N.6 - bacino di monte	3.2	93	4.1	128	4.3	153	4.1	170
8002	Canale Principale N.6 - interbacino	1.3	20	1.3	27	1.1	32	1.0	37
8003	Canale Principale N.6 - bacino di valle	5.4	62	4.8	87	4.0	106	3.4	121

Codice	Corso d'acqua	Tr200 d=3h		Tr200 d=6h		Tr200 d=9h		Tr200 d=12h	
		Qmax	Volumi	Qmax	Volumi	Qmax	Volumi	Qmax	Volumi
5001	Controfossa sx Albegna - bacino di monte	23.5	637	29.7	897	30.2	1085	28.8	1227
5002	Controfossa sx Albegna - interbacino	1.4	19	1.4	28	1.3	35	1.1	40
5003	Controfossa sx Albegna - bacino di valle	1.5	25	1.6	36	1.5	44	1.3	51
6001	Canale Principale N.4 - bacino di monte	95.0	960	62.1	1246	46.6	1420	37.6	1539
6002	Canale Principale N.4 - Fosso N.3	53.7	531	35.4	698	26.7	802	21.6	873
6003	Canale Principale N.4 - Interbacino DX	6.8	133	7.7	189	7.3	230	6.6	264
6004	Canale Principale N.4 - Interbacino SX	11.5	140	11.3	210	9.9	262	8.6	306
6005	Fosso N.8	9.9	88	8.6	137	7.2	174	6.3	206
6006	Canale Secondario N.16	6.9	129	8.2	191	8.0	238	7.3	275
6007	Canale Principale N.4 - Interbacino Valle	4.7	108	5.7	154	5.6	186	5.1	212
7000	Canale Principale N.5	20.1	242	20.3	368	17.8	464	15.7	542
8001	Canale Principale N.6 - bacino di monte	5.4	155	7.0	221	7.3	268	7.1	303
8002	Canale Principale N.6 - interbacino	2.1	33	2.1	46	1.9	57	1.7	65
8003	Canale Principale N.6 - bacino di valle	9.0	106	8.0	153	6.7	188	5.8	216

Tabella 7-5: Portate massime [mc/s] e volumi di piena Modello 4 - Albinia

## 7.3 VERIFICHE IDRAULICHE

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

Il software utilizzato per la modellazione idraulica è HEC-RAS 5.0.7 distribuito da US Army Corps of Engineers. Il modello permette di effettuare analisi idrauliche monodimensionali, bidimensionali ed accoppiate mono-bidimensionali. Quest'ultima tipologia di modellazione è particolarmente indicata per la simulazione degli eventi di piena in cui il flusso nell'alveo fluviale viene schematizzato con un moto 1D, mentre la propagazione della piena sulle aree inondabili, attraverso un moto 2D.

Per ulteriori dettagli si rimanda all'Appendice A: *Modellistica idrologico-idraulica*.

Il modello idraulico implementato è un modello accoppiato mono-bidimensionale che ricomprende:

- l'asta principale della Controfossa Sinistra del F. Albegna;
- l'asta principale del Canale Principale N.4;
- l'asta principale del Canale Principale N.5;
- l'asta principale del Canale Principale N.6;
- l'asta principale del Canale Secondario N.16 e del suo affluente Fosso N.8.

Il tratto modellato della Controfossa Sinistra del F. Albegna si estende dal Torrente Magione Radicata alla confluenza nel Canale Principale N.4, per circa 3.5 km. La caratterizzazione geometrica del corso d'acqua è stata mutuata dalle sezioni di rilievo del 2005 e del 2010.

L'asta del Canale Principale N.4 oggetto di modellazione si estende dalla loc. Priorato fino alla confluenza nel F. Albegna, per circa 7 km. La caratterizzazione geometrica deriva da rilievi eseguiti nel 2004 e 2020.

Sono altresì modellati il Canale Principale N.6, per circa 2 km, con sezioni di rilievo del 2010 (ad eccezione del sottoattraversamento ferroviario, oggetto di rilievo aggiornato al 2020), ed il Canale Principale N.5, per circa 2.6 km, con sezioni di rilievo del 2014.

Gli altri corsi d'acqua inseriti nel modello sono il Canale Secondario 16 (circa 2 Km), ed il Fosso N.8 (850 m). Per tali corsi d'acqua non risultano disponibili rilievi topografici, per cui la modellazione geometrica delle sezioni fluviali è stata ricavata dal Lidar. Per tali corsi d'acqua non è stato pertanto possibile modellare le strutture idrauliche (ponti) presenti lungo il percorso.

Il territorio potenzialmente soggetto ad allagabilità dal sistema fluviale sopra descritto, modellato tramite un DTM ricavato da Lidar (e da CTR10k ove non presente la copertura LIDAR) ricomprende un areale complessivo di circa 17 Km<sup>2</sup>. Si precisa che nel DTM utilizzato per la modellazione idraulica è stato inserito anche il rilevato stradale della variante della Strada Regionale 74 (Maremma), in quanto non presente sul rilievo Lidar fornito da Regione Toscana (antecedente alla realizzazione della viabilità), mutuandolo dallo "Studio idrologico - idraulico a supporto del contributo relativo al procedimento di formazione del Piano Strutturale. Zona indagine Albinia (GR)" redatto dall'Ing. Stefano Liberatori.

Le sezioni fluviali utilizzate nella modellazione monodimensionale sono individuate attraverso un codice alfanumerico che contiene al proprio interno le seguenti informazioni:

(Esempio: sezione 01542PB03)

- 5 caratteri (Esempio: 00320) identificativo del codice della sezione;
- 2 caratteri (Esempio: PB) identificativo delle opere idrauliche; se non presenti si utilizzano i caratteri: \_\_
- 2 caratteri (Esempio:13) identificativo dell'anno del rilievo topografico.

Su ciascuna sezione è stata individuata la quota di "sfioro" (quote del massimo contenimento delle acque in alveo), in destra e sinistra idraulica, che rappresenta l'informazione necessaria al software HEC-RAS per l'accoppiamento del modello monodimensionale a quello bidimensionale.

La risoluzione generale della cella di calcolo della mesh è stata assegnata pari a 30x30 m e successivamente dettagliata in corrispondenza dei limiti significativi aventi funzionalità idraulica (viabilità, attraversamenti, ecc.) sino ad una risoluzione di 10 m circa dove necessario.

I tratti dei corsi d'acqua oggetto di studio, le sezioni fluviali e le opere dell'arte implementate, il dominio dell'area 2D, le breaklines utilizzate per infittire la mesh riportati nell'elaborato IDR.40 - Modello 4 Albinia - Tavola 1 – Planimetria. Tale elaborato è corredato anche delle condizioni al contorno implementate e descritte nel seguente paragrafo.

### 7.3.2 CONDIZIONI AL CONTORNO E PARAMETRI DEL MODELLO IDRAULICO

Le condizioni al contorno dei modelli idraulici analitici sono rappresentate da:

- Sollecitazioni idrologiche in testa ad ogni tratto simulato idraulicamente;
- Immissioni idrologiche puntuali in corrispondenza delle confluenze con corsi d'acqua non oggetto di simulazione idraulica;
- Immissioni idrologiche distribuite, nel caso di contributo derivante da un interbacino che non presenta un reticolo idrografico di

riferimento;

- Idrogramma dei livelli a valle, che in questo caso è rappresentato da un livello costante pari a 0.6 m slm per il Canale Principale N. 5 (con recapito nello Stagnone dei Lombardi) e da un livello costante nel F. Albegna pari a 1.45 m slm per il Canale Principale N. 4 (che corrisponde al livello massimo sul F. Albegna per eventi con TR=200 anni di durata 6 ore, mutuato dal Modello 2).

In Tabella 6-5 sono riportati i massimi valori di portata  $Q_{max}$  [mc/s] associati agli idrogrammi impiegati come condizioni di monte alle aste fluviali o come immissioni puntuali e distribuite per i diversi tempi di ritorno (30 e 200 anni) e per le diverse durate di pioggia: 3, 6, 9 e 12 ore. Gli idrogrammi completi sono riportati in *IDR.00B Allegato 1 - Modellistica Idrologica*.

Per ciò che attiene ai coefficienti di scabrezza da associare alle singole sezioni fluviali, attraverso il confronto con i parametri riportati in letteratura ed il supporto dei sopralluoghi effettuati, è stato possibile associare ad ogni corso d'acqua, il coefficiente di scabrezza, secondo Manning, più appropriato.

In particolare, è stato scelto di adottare un coefficiente di Manning pari a 0.04 s/m<sup>1/3</sup> per il Controfossa Sinistra del F. Albegna, 0.035 s/m<sup>1/3</sup> per il Canale Secondario N.16 ed il Fosso N.8 e 0.03 s/m<sup>1/3</sup> sugli altri corsi d'acqua.

Per quanto riguarda la scabrezza delle aree limitrofe al corso d'acqua, simulate dal modello bidimensionale, si è scelto di adottare una scabrezza unica pari a 0.06 s/m<sup>1/3</sup>.

### 7.3.3 VERIFICHE IDRAULICHE IMPLEMENTATE

Le verifiche idrauliche sono state svolte nello scenario geometrico dello stato attuale per gli eventi con TR 30 e 200 anni e durate di pioggia pari a 3-6-9-12 ore.

### 7.3.4 RISULTATI

L'implementazione della modellistica idraulica di tipo analitico fornisce, per ciascuno degli eventi studiati, i valori di massimo livello e portata in alveo per ciascuna sezione dei corsi d'acqua analizzati, ed i battenti e velocità nelle aree soggette ad allagamento.

Per ogni tempo di ritorno sono stati inviluppati i massimi livelli in alveo ed i battenti e le velocità nelle aree allagate risultanti dalle simulazioni idrauliche svolte sulle varie durate di pioggia. Con questa impostazione si restituiscono:

- Inviluppo dei battenti idrometrici massimi nelle aree allagate per TR=30-200 anni:  
*IDR.41 - Modello 4 Albinia - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni;*  
*IDR.42 - Modello 4 Albinia - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni;*
- Inviluppo delle velocità massime nelle aree allagate per TR=30-200 anni:  
*IDR.43 - Modello 4 Albinia - Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni;*  
*IDR.44 - Modello 4 Albinia - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni.*
- Inviluppo dei livelli massimi attesi in alveo per TR=30-200 anni:  
*IDR.45 - Modello 4 Albinia - Tavola 6 - Libretti sezioni e profili con livelli idrometrici TR=30-200 anni.*

Per ogni altro risultato di output si rimanda alla consultazione dei file del modello idraulico allegato allo studio.

## 8. MODELLO IDROLOGICO IDRAULICO 5 – ORBETELLO SCALO

Il presente modello riguarda la modellazione idrologica e idraulica del reticolo minore interferente con la linea ferroviaria Pisa - Roma e la Strada Statale n.1 Aurelia nella zona di Orbetello Scalo, ed è stato mutuato dalle verifiche idrologiche idrauliche redatte a supporto dello studio "Analisi delle criticità idrauliche del reticolo minore interferente con la linea ferroviaria Pisa - Roma e la Strada Statale n.1 Aurelia nella zona di Orbetello Scalo nel Comune Di Orbetello" a firma dell'Ing. Andrea Benvenuti incaricato dal Commissario Delegato ex L. 228/2012 nell'ambito dell'ordinanza del Commissario Delegato Calamità Naturali n. 22 del 25/05/2015.

In particolare, le analisi idrologiche sono state interamente mutate dallo studio succitato, mentre i risultati delle verifiche idrauliche dello stato attuale sono stati completati mediante l'implementazione di un modello idraulico bidimensionale per la porzione di monte del bacino del reticolo del Fosso della Cervia e del Fosso Quartaccio posta a monte della SS1 Aurelia, non ricompresa nel modello idraulico dello studio, così come descritto ai paragrafi seguenti.

Per tutti i dettagli del modello idrologico idraulico svolto nello studio "Analisi delle criticità idrauliche del reticolo minore interferente con la linea ferroviaria Pisa - Roma e la Strada Statale n.1 Aurelia nella zona di Orbetello Scalo nel Comune Di Orbetello" si rimanda agli elaborati a firma dell'Ing. Andrea Benvenuti. Di seguito si riporta una sintesi delle analisi svolte nello studio succitato e la descrizione del modello idraulico di completamento per il bacino di monte del Fosso della Cervia e del Fosso Quartaccio.

### 8.1 RETICOLO IDRAULICO DI RIFERIMENTO

La rete di canali presa in esame risulta piuttosto complessa ed interconnessa con numerosi attraversamenti sulle principali vie di comunicazione, la SS 1- Aurelia e la linea ferroviaria, ed un altrettanto elevato numero di manufatti sulla viabilità secondaria e minore. Sui principali corsi d'acqua interferenti con la linea ferroviaria e l'Aurelia nel 2018 è stato eseguito un rilievo topografico che ha evidenziato per alcuni corsi d'acqua tracciati diversi rispetto a quelli individuati nel reticolo di gestione ai sensi della LR 79/2012. In alcuni casi (Fosso Sant'Angelo, Fosso Pisana Alta e altri) manca proprio un reticolo idraulico a monte della SS1 Aurelia con conseguenti problemi di drenaggio delle aree sottese e di recapito controllato dei deflussi superficiali in corrispondenza delle sezioni di attraversamento dell'infrastruttura stradale. In altri casi (Fosso del Pitorsino) è il reticolo a valle che segue un tracciato autonomo rispetto a quello del Fosso della Provincialaccia con restituzione diretta nella laguna di Orbetello.

Tali modifiche al sistema di drenaggio superficiale a monte della SS1- Aurelia sono da ascrivere, verosimilmente, alle trasformazioni subite dal territorio negli ultimi decenni a seguito delle progressive urbanizzazioni che non hanno previsto alcuna opera di regimazione delle acque meteoriche fino al rilevato stradale della SS 1- Aurelia che costituisce, di fatto, una barriera allo scorrimento delle acque provenienti da monte.

La rete di canali modellata è riportata nella figura seguente e nell'elaborato IDR.50 - Modello 5 Orbetello Scalo - Tavola 1 – Planimetria.

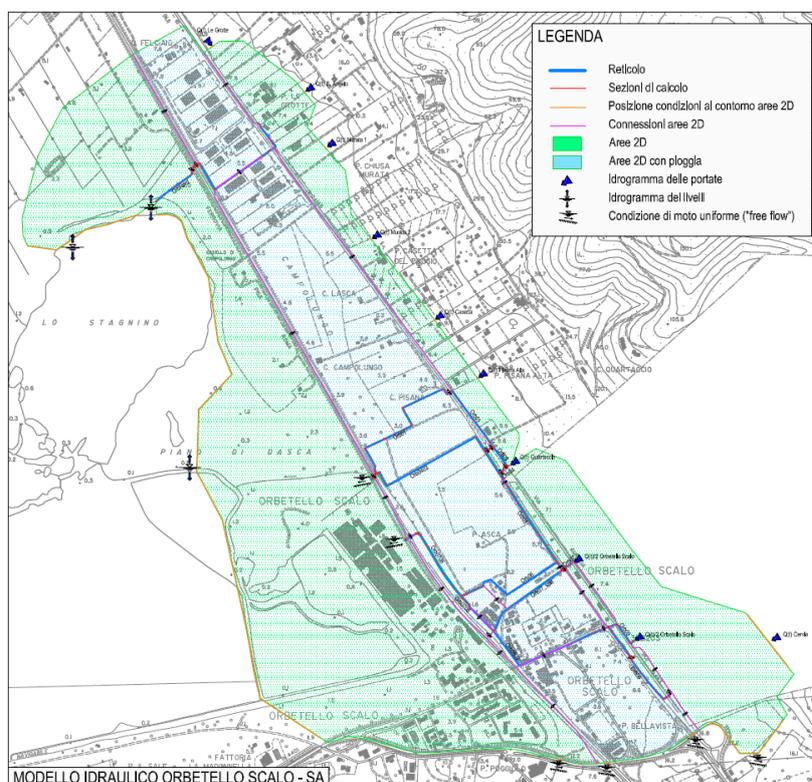


Figura 8-1: Reticolo Idraulico di riferimento Modello 5 – Orbetello Scalo

A tale schema idraulico si aggiunge la modellazione 2D della porzione del reticolo di Cervia e Quartaccio, a completamento delle analisi svolte nello studio dell'Ing. Benvenuti.

## 8.2 ANALISI IDROLOGICA

I bacini idrografici sono stati individuati a partire dai bacini già determinati nell'ambito dello "Studio idrologico idraulico sul reticolo minore afferente il F. Albegna, il T. Osa e l'ambito di Orbetello Scalo interessato dagli eventi del 10-12 Novembre 2102" e del "Progetto Definitivo Autostrada A12 Rosignano Civitavecchia, Lotto 5B, Tratto Fonteblanda Ansedonia". Per affinare la posizione degli spartiacque nella zona di valle, è stata effettuata un'analisi di identificazione dei bacini con il supporto dei dati LIDAR.

Si riportano in Figura 8-2 bacini delle acque alte che sono stati impiegati per la determinazione degli idrogrammi di piena da utilizzare per la modellazione idrologica ed i bacini delle acque basse su cui calcolare le piogge nette, unitamente al reticolo idrologico ed a quello idraulico.

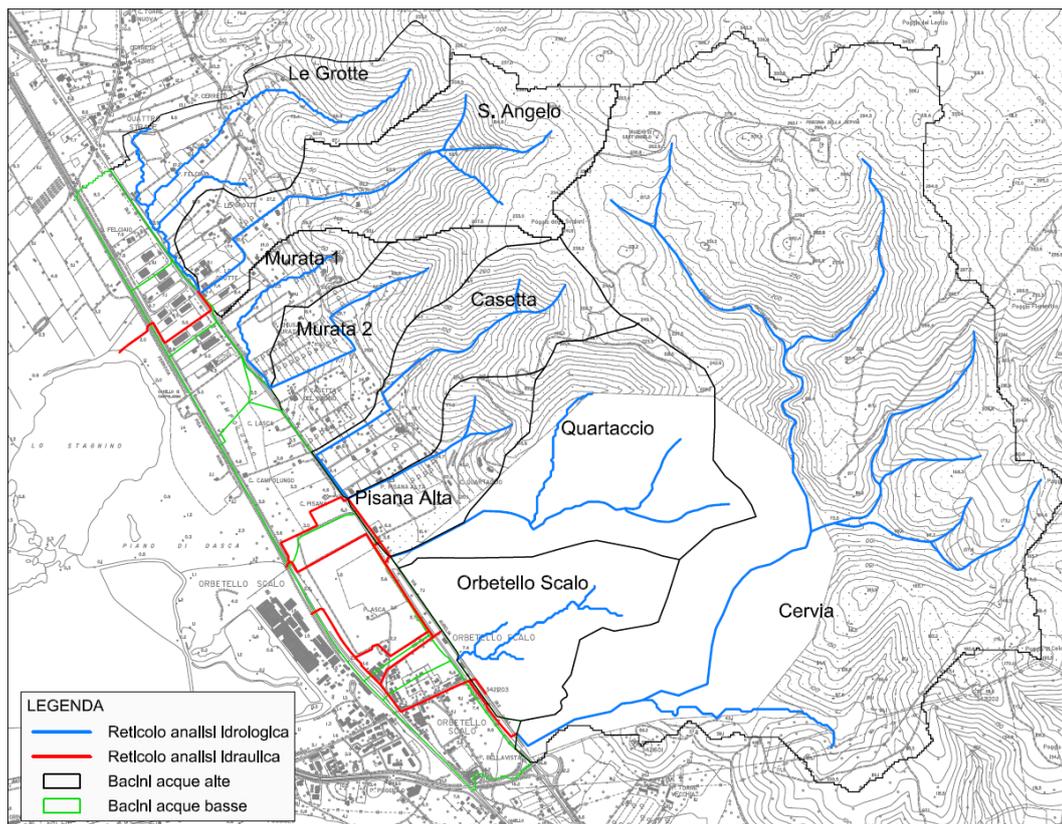


Figura 8-2: Schema dei bacini e dei reticoli oggetto di analisi idrologica Modello 5 - Orbetello Scalo

### 8.2.1 MODELLO IDROLOGICO

Il modello di infiltrazione del terreno prevede l'utilizzo di un assorbimento iniziale  $la$  ed una perdita per filtrazione  $Ks$ , durante tutto l'evento proporzionale al valore del coefficiente di permeabilità del suolo. Tali valori sono stati calcolati a partire dagli shapefile della carta di uso del suolo e della carta geologica.

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi prevede il calcolo dei parametri  $k$  ed  $n$  dell'idrogramma istantaneo unitario di Nash, che risultano dipendenti dalle caratteristiche geomorfologiche di ciascun bacino. Per il calcolo di  $n$  e  $k$  è stata eseguita la gerarchizzazione secondo Horton-Strahler del reticolo e dei bacini.

La Tabella 8-1 riportano i parametri caratteristici di ciascun bacino necessari per l'analisi idrologica.

	Nome	k [ore]	n [-]	la [mm]	Ks [mm/ora]	Area [kmq]	Area Kr [kmq]
<b>Bacini</b>	Le_Grotte	0.243	3.083	23.16	3.703	0.608	1.689
	S_Angelo	0.182	1.931	23.85	4.234	0.901	1.689
	Murata_1	0.253	1.696	23.29	3.471	0.448	8.293
	Murata_2	0.316	1.696	23.29	3.471	0.202	8.293
	Casetta	0.154	1.460	23.64	4.191	0.558	8.293
	Pisana_Alta	0.110	1.580	22.89	3.668	0.304	8.293
	Quartaccio	0.185	2.502	8.55	0.682	0.866	8.293
	Orbetello_Scalo	0.075	2.711	3.30	3.404	0.537	8.293
	Cervia	0.341	2.774	21.19	4.633	4.573	8.293
<b>Aree 2D piogge nette</b>	2DA_01Mo	-	-	5.73	1.550	-	-
	2DA_02Mo	-	-	19.88	1.550	-	-
	2DA_03	-	-	23.75	1.550	-	-
	2DA_05	-	-	23.71	1.550	-	-
	2DA_06Va	-	-	11.38	1.550	-	-
	2DA_09	-	-	13.09	1.550	-	-
	2DA_10	-	-	3.33	1.550	-	-

Tabella 8-1: Sintesi dei parametri idrologici Modello 5 - Orbetello Scalo

### 8.2.2 SOLLECITAZIONI PLUVIOMETRICHE

Le piogge di progetto per gli eventi con TR 30 e 200 anni sono state determinate a partire dalle LSPP aggiornate dalla Regione Toscana (2012), per ogni sottobacino analizzato.

In Tabella 8-2 si riportano i valori di a ed n per i diversi bacini.

	TR 30 anni		TR 200 anni	
	a [mm]	n [-]	a [mm]	n [-]
Le_Grotte	61.75	0.317	85.89	0.380
S_Angelo	61.77	0.315	85.93	0.378
Murata_1	61.83	0.313	86.00	0.376
Murata_2	61.83	0.313	86.00	0.376
Casetta	61.84	0.312	86.01	0.376
Pisana_Alta	61.97	0.311	86.20	0.374
Quartaccio	61.87	0.312	86.06	0.376
Orbetello_Scalo	61.97	0.311	86.19	0.374
Cervia	61.83	0.313	86.01	0.377
Acque Basse	61.89	0.309	86.09	0.372

Tabella 8-2: Valori dei coefficienti a ed n delle LSPP Modello 5 - Orbetello Scalo

### 8.2.3 IDROGRAMMI DI PIENA

A partire dalla pioggia di progetto e dal modello di trasformazione afflussi-deflussi descritto in precedenza, sono stati determinati gli idrogrammi di piena.

Gli idrogrammi di piena sono stati generati per la durata dell'evento che massimizza la pericolosità idraulica. Tale durata è pari ad 1 ora. In Tabella 8-3 si riportano i massimi di portata per ciascun corso d'acqua studiato per gli eventi con TR 30 e 200 anni e durata di pioggia pari ad 1 ora.

	Q <sub>max</sub> [mc/s]	
	TR 30 anni	TR 200 anni
Le_Grotte	5.660	9.180
S_Angelo	12.080	18.260
Murata_1	5.300	8.180
Murata_2	2.080	3.310
Casetta	7.400	10.790
Pisana_Alta	4.130	5.890
Quartaccio	12.940	18.310
Orbetello_Scalo	8.260	11.690
Cervia	33.360	54.860

Tabella 8-3: Valori massimi di portata TR 30 e 200 anni e durata 1 ora Modello 5 - Orbetello Scalo

## 8.3 VERIFICHE IDRAULICHE

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

La geometrizzazione della rete dei canali modellata deriva dai rilievi svolti a supporto dello studio dell'Ing. Benvenuti (2018). Per i tratti del Fosso della Cervia e del Quartaccio posti a monte della SS1 Aurelia, oggetto di una modellazione idraulica integrativa, non è stato possibile reperire alcun rilievo topografico del reticolo, per cui è stata svolta una modellazione solo bidimensionale utilizzando i dati Lidar, ove presenti, integrati con le informazioni altimetriche della CTR 10k della Regione Toscana.

### 8.3.2 MODELLO IDRAULICO

La modellistica idraulica implementata sul software HEC-RAS 5.0.5 è stata realizzata accoppiando un modello idraulico monodimensionale per la dinamica della rete dei canali ed un modello bidimensionale per la propagazione dell'onda di piena sulle aree inondabili.

Le condizioni al contorno di monte per i corsi d'acqua analizzati sono dettagliatamente riportate sugli elaborati grafici dello studio, acui si rimanda per la consultazione. Per alcuni corsi d'acqua per i quali non è chiaramente identificabile un alveo a monte del rilievo, è stato assegnato un idrogramma costante con valori bassi di portata (ordine di 0.1 - 0.5 mc/s) per garantire la stabilità del modello. Per tali corsi d'acqua gli idrogrammi sono stati imposti sul bordo delle aree a modellazione bidimensionale. In tal modo la quota parte di portata che arriva in alveo dipende dalle caratteristiche morfologiche del terreno circostante.

Per i corsi d'acqua per i quali è chiaramente identificabile un alveo a monte dell'ultima sezione di rilievo, è stato direttamente imposto su di essa l'idrogramma delle portate.

Relativamente alle le condizioni al contorno di valle, è stata assunta una condizione di livello idraulico costante pari a 0.1 m s.l.m. della Laguna di Orbetello.

Le aree a modellazione bidimensionale sono realizzate con una mesh con celle di dimensioni medie 4m x 4m e sono messe in collegamento con il reticolo per mezzo di "Lateral Structure" (LS) che fungono da sfioratori laterali di portata quando i livelli in alveo superano la sommità della LS stessa.

Le condizioni al contorno applicate alle aree a modellazione bidimensionale dipendono dalla posizione del confine del dominio di calcolo. Sui bordi che si affacciano sulla Laguna di Orbetello è stata posta una condizione di livello costante nel tempo pari a 0.1 m s.l.m., mentre sui bordi che tagliano zone caratterizzate da avvallamenti, sono state poste condizioni di efflusso libero ("Free Flow") in moto uniforme, controllate dalla pendenza locale del terreno.

Alle aree 2D poste tra la Via Aurelia e la linea ferroviaria è stata assegnata una ulteriore condizione al contorno che prescrive uno idrogramma netto di pioggia ricadente sul bacino come calcolato nell'ambito della modellistica idrologica.

I valori di scabrezza utilizzati sono a 0.03 s/m<sup>1/3</sup> in alveo e 0.05 s/m<sup>1/3</sup> per le aree allagabili.

Ad integrazione del modello su descritto, è stata sviluppata una modellazione bidimensionale per la porzione dei bacini di monte dei fossi Cervia e Quartaccio, così come schematizzato in Figura 8-3.

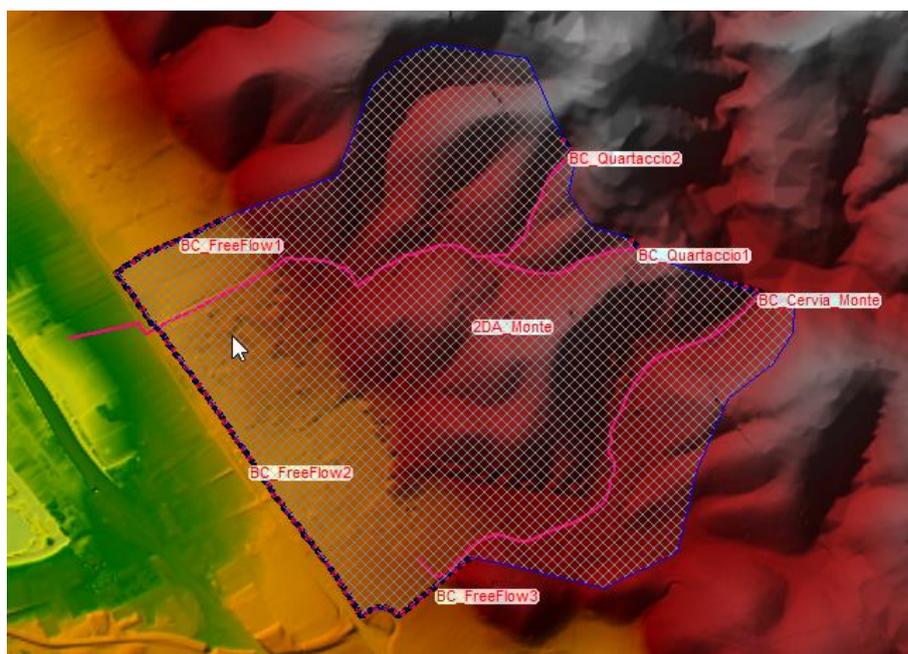


Figura 8-3: Modello idraulico 2D bacino di monte Modello 5 Orbetello Scalo

In coerenza con il modello di valle, come condizioni al contorno di monte sono stati utilizzati gli stessi input idrologici, ovvero gli idrogrammi derivanti dall'analisi idrologica per i fossi Cervia e Quartaccio. Le aree a modellazione bidimensionale sono state realizzate

con una mesh con celle di dimensioni 10mx10m, con valori di scabrezza pari a  $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$  e successivamente dettagliata in corrispondenza dei corsi d'acqua fino ad una risoluzione di 4x4 m.

Come condizione al contorno di valle è stata posta una condizione di efflusso libero ("Free Flow") in moto uniforme, controllata dalla pendenza locale del terreno (0.0005 m/m), che fosse altresì congruente con i risultati del modello di valle nelle aree prossime alla SS1 Aurelia.

### **8.3.3 VERIFICHE IDRAULICHE IMPLEMENTATE**

Le verifiche idrauliche sono state svolte nello scenario geometrico dello stato attuale per gli eventi con TR 30 e 200 anni e durata di pioggia pari ad 1 ora.

### **8.3.4 RISULTATI**

L'evento con TR 30 anni produce criticità diffuse su tutta la rete, la quale risulta significativamente insufficiente per le portate di piena analizzate. La maggior parte degli areali analizzati risultano allagati con battenti che raggiungono anche 1.50 m.

L'evento con TR 200 anni produce un incremento sia dei battenti che delle aree allagate.

Il modello di monte sviluppato a completamento delle analisi svolte dallo studio dell'Ing. Benvenuti, danno risultati di allagabilità, che sostanzialmente si configurano come volumi di transito che rimangono confinati nell'intorno del reticolo principale nel tratto di monte, mentre si distribuiscono in maniera più ampia laddove i terreni diminuiscono significativamente le pendenze. Nelle aree immediatamente a monte della SS1 Aurelia, in parte sovrapposte agli areali modellati dallo studio dell'Ing. Benvenuti i battenti attesi sono del tutto coerenti e confrontabili. In ogni caso, a favore di sicurezza, nella definizione delle carte dei battenti e delle velocità (rif. *IDR.51 - Modello 5 Orbetello Scalo - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni; IDR.52 - Modello 5 Orbetello Scalo - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni; IDR.53 - Modello 5 Orbetello Scalo - Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni; IDR.54 - Modello 5 Orbetello Scalo - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni*) laddove risultano sovrapposizioni tra le due modellistiche, si è assunto il valore massimo tra i due.

È stato inoltre restituito l'involuppo dei livelli massimi attesi in alveo per TR=30-200 anni del sistema idraulico di studio (mutuato dallo studio dell'Ing. Benvenuti):

- *IDR.55 - Modello 5 Orbetello Scalo - Tavola 6 - Libretti sezioni e profili con livelli idrometrici TR=30-200 anni.*

Per ogni altro risultato di output si rimanda alla consultazione dei file del modello idraulico allegato allo studio.

## 9. DETERMINAZIONE DELLE AREE A PERICOLOSITÀ IDRAULICA ANALITICA

Per ciascuno dei 5 modelli idrologici idraulici oggetto di studio, per ogni tempo di ritorno e durata dell'evento meteorico, sono stati ricavati battenti e velocità massime per le aree allagabili.

Inviluppando i valori massimi risultanti dalle singole simulazioni, si sono ottenuti i battenti e le velocità massime per ciascun tempo di ritorno. Tali risultanze sono riportate nelle già richiamate Tavole:

IDR.11A Modello 1 Albegna Monte - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni - Quadro 1  
IDR.11B Modello 1 Albegna Monte - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni - Quadro 2  
IDR.12A Modello 1 Albegna Monte - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni - Quadro 1  
IDR.12B Modello 1 Albegna Monte - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni - Quadro 2  
IDR.13A Modello 1 Albegna Monte - Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni - Quadro 1  
IDR.13B Modello 1 Albegna Monte - Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni - Quadro 2  
IDR.14A Modello 1 Albegna Monte - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni - Quadro 1  
IDR.14B Modello 1 Albegna Monte - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni - Quadro 2

IDR.21 Modello 2 Albegna Camporegio - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni  
IDR.22 Modello 2 Albegna Camporegio - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni  
IDR.23 Modello 2 Albegna Camporegio - Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni  
IDR.24 Modello 2 Albegna Camporegio - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni

IDR.31 Modello 3 Talamone - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni  
IDR.32 Modello 3 Talamone - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni  
IDR.33 Modello 3 Talamone - Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni  
IDR.34 Modello 3 Talamone - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni

IDR.41 Modello 4 Albinia - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni  
IDR.42 Modello 4 Albinia - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni  
IDR.43 Modello 4 Albinia - Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni  
IDR.44 Modello 4 Albinia - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni

IDR.51 Modello 5 Orbetello Scalo - Tavola 2 - Battenti Idrometrici massimi TR 30 anni  
IDR.52 Modello 5 Orbetello Scalo - Tavola 3 - Battenti Idrometrici massimi TR 200 anni  
IDR.53 Modello 5 Orbetello Scalo - Tavola 4 - Velocità Massime TR 30 anni  
IDR.54 Modello 5 Orbetello Scalo - Tavola 5 - Velocità Massime TR 200 anni

Gli inviluppi dei battenti su ciascun tempo di ritorno ha quindi permesso la definizione delle pericolosità idrauliche di carattere analitico, ai sensi del D.P.G.R. 53R/2011, 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.

Tali classi di pericolosità corrispondono, rispettivamente, ai sensi della L.R. 41/2018:

- **scenario per alluvioni frequenti**: lo scenario con riferimento al tempo di ritorno non inferiore a trenta anni;
- **scenario per alluvioni poco frequenti**: lo scenario con riferimento al tempo di ritorno non inferiore a duecento anni.

ovvero, ai fini della proposta di aggiornamento del PGRA, D.Lgs 49/2010:

- **Aree a pericolosità da alluvione elevata (P3)**, allagabili per eventi con tempo di ritorno inferiore a 30 anni;
- **Aree a pericolosità da alluvione media (P2)**, allagabili per eventi con tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni.

Le aree a pericolosità idraulica derivanti dalla modellazione analitica e determinate come sopra indicato sono riportate nelle seguenti tavole:

IDR.60 Planimetria della Pericolosità Idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 analitica - Quadro 1  
IDR.61 Planimetria della Pericolosità Idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 analitica - - Quadro 2  
IDR.62 Planimetria della Pericolosità Idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 analitica - - Quadro 3  
IDR.63 Planimetria della Pericolosità Idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 analitica - - Quadro 4  
IDR.64 Planimetria della Pericolosità Idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 analitica - - Quadro 5.

## 10. DETERMINAZIONE DELLA MAGNITUDO IDRAULICA AI SENSI DELLA L.R. 41/2018

La Legge Regionale 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 - aggiorna la disciplina della gestione del rischio di alluvioni in relazione alle trasformazioni del territorio e la tutela dei corsi d'acqua.

Ai sensi della L.R. 41/2018, vengono introdotti i seguenti concetti (art. 2):

- “**scenario per alluvioni frequenti**”: lo scenario di cui all'articolo 6, comma 2, lettera c), del d.lgs. 49/2010, individuato negli atti di pianificazione di bacino e definito dai medesimi atti con riferimento al tempo di ritorno non inferiore a trenta anni;
- “**scenario per alluvioni poco frequenti**”: lo scenario di cui all'articolo 6, comma 2, lettera b) del d.lgs. 49/2010, individuato negli atti di pianificazione di bacino e definito dai medesimi atti con riferimento al tempo di ritorno non inferiore a duecento anni;
- “**magnitudo idraulica**”: la combinazione del battente e della velocità della corrente in una determinata area, associata allo scenario relativo alle alluvioni poco frequenti:
  - “**magnitudo idraulica moderata**”: valori di battente inferiore o uguale a 0.5 metri e velocità inferiore o uguale a 1 metro per secondo (m/s). Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente uguale o inferiore a 0.3 metri
  - “**magnitudo idraulica severa**”: valori di battente inferiore o uguale a 0.5 metri e velocità superiore a 1 metro per secondo (m/s) oppure battente superiore a 0.5 metri e inferiore o uguale a 1 metro e velocità inferiore o uguale a 1 metro per secondo (m/s). Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente superiore a 0.3 metri e inferiore o uguale a 0,5 metri;
  - “**magnitudo idraulica molto severa**”: battente superiore a 0.5 metri e inferiore o uguale a 1 metro e velocità superiore a 1 metro per secondo (m/s) oppure battente superiore a 1 metro. Nei casi in cui la velocità non sia determinata battente superiore a 0.5 metri.

Alla luce delle definizioni di cui sopra, a partire dai risultati ottenuti per i modelli idraulici implementati per la definizione delle aree soggette ad inondazione per eventi con TR=200 anni, descritti nei precedenti capitoli, sono stati estrapolati i dati relativi ai battenti ed alle velocità della corrente attese sul territorio allagato e restituite le carte degli inviluppi dei battenti e delle velocità massime attese su tutti gli scenari idrologici duecentennali esaminati.

A partire dagli inviluppi dei battenti e delle velocità massime su tutti gli scenari duecentennali, si è proceduto alla definizione della magnitudo idraulica, così come definita nella L.R. 41/2018, su tutte le aree soggette ad allagabilità per alluvioni poco frequenti.

Il risultato finale delle elaborazioni svolte è riportato negli elaborati seguenti:

- MODELLO 1 – ALBEGNA MONTE  
IDR.16A - Modello 1 Albegna Monte - Tavola 7 - Carta della Magnitudo Idraulica - Quadro 1;  
IDR.16B - Modello 1 Albegna Monte - Tavola 7 - Carta della Magnitudo Idraulica - Quadro 2;
- MODELLO 2 – ALBEGNA CAMPOREGIO  
IDR.26 - Modello 2 Albegna Camporegio - Tavola 7 - Carta della Magnitudo Idraulica;
- MODELLO 3 – TALAMONE  
IDR.36 - Modello 3 Talamone - Tavola 7 - Carta della Magnitudo Idraulica;
- MODELLO 4 – ALBINIA  
IDR.46 - Modello 4 Albinia - Tavola 7 - Carta della Magnitudo Idraulica;
- MODELLO 5 – ORBETELLO SCALO  
IDR.56 - Modello 5 Orbetello Scalo - Tavola 7 - Carta della Magnitudo Idraulica.

## **11. DETERMINAZIONE DELLE AREE A PERICOLOSITÀ IDRAULICA DEL TERRITORIO COMUNALE**

Al fine di determinare la pericolosità idraulica su tutto il territorio comunale, per le porzioni di territorio non coperte dagli studi idrologico-idraulici di cui al presente studio, si è provveduto al recepimento delle pericolosità derivanti dal vigente Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA).

Le aree a pericolosità così individuate sono riportate nelle seguenti tavole:

- IDR.70 Planimetria della Pericolosità Idraulica del territorio comunale - Quadro 1
- IDR.71 Planimetria della Pericolosità Idraulica del territorio comunale - Quadro 2
- IDR.72 Planimetria della Pericolosità Idraulica del territorio comunale - Quadro 3
- IDR.73 Planimetria della Pericolosità Idraulica del territorio comunale - Quadro 4
- IDR.74 Planimetria della Pericolosità Idraulica del territorio comunale - Quadro 5

## APPENDICE A: MODELLISTICA IDROLOGICO-IDRAULICA

### A.1 MODELLISTICA IDROLOGICA

La modellistica idrologica per la determinazione dell'idrogramma di piena in una o più sezioni fluviali di un bacino idrografico deve significativamente rappresentare tutte le fasi che si hanno a partire dalla distribuzione delle piogge insistenti sul bacino, fino alla valutazione dell'onda di piena.

La trasformazione da pioggia al suolo a portata nella sezione di chiusura avviene secondo una cascata di processi. L'ingresso principale al modello è costituito da una serie di misurazioni di pioggia. La quota parte di tali precipitazioni che andrà in scorrimento superficiale, detta anche precipitazione efficace (netta), viene valutata con un opportuno *modello di trasformazione afflussi-deflussi*, per la stima della produzione di deflusso idealmente in ciascun punto del bacino, avente la dimensione di una portata per unità di area. Infine, il processo di concentrazione dei deflussi nel reticolo idrografico e di trasferimento lungo questo fino alla sezione di chiusura verrà rappresentato tramite un opportuno *modello di formazione dell'onda di piena*.

La metodologia alla base degli studi effettuati mira ad un'agevole caratterizzazione degli eventi in termini di tempi di ritorno e durata dell'evento meteorico; conseguenza diretta, la possibilità di definire i livelli di rischio in funzione della probabilità di accadimento. Ciò si ottiene facilmente attraverso una procedura semplificata di generazione di eventi sintetici, che si basa sulle seguenti ipotesi:

- isofrequenza fra evento meteorico e portata in alveo ( $T_r$  evento di pioggia =  $T_r$  idrogramma di piena).

#### A.1.1 REGIME PLUVIOMETRICO – STUDIO REGIONALE LSPP

Il regime pluviometrico è stato caratterizzato sulla base dei risultati prodotti dal gruppo di lavoro dell'attività "Modellazione idrologica", nell'ambito dell'Accordo stipulato tra la Regione Toscana e il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze, per lo sviluppo di attività di ricerca sulla Mitigazione del Rischio Idraulico nella Regione Toscana.

Nell'ambito di tale lavoro è stata fornita la stima dell'altezza di pioggia per le diverse durate caratteristiche (1, 3, 6, 12 e 24 ore e giornaliera) e i diversi tempi di ritorno fissati (2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 500 anni). Per le durate caratteristiche, sono state elaborate le griglie di risoluzione 1 km dei valori estremi delle altezze di pioggia, per i tempi di ritorno.

La previsione quantitativa dei valori estremi di pioggia in un determinato punto è stata effettuata anche attraverso la determinazione della curva o linea segnalatrice di probabilità pluviometrica (LSPP), cioè della relazione che lega l'altezza di precipitazione alla sua durata, 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.

Note le altezze di pioggia per durate e tempi di ritorno fissati, attraverso una regressione logaritmica è possibile determinare le griglie di 1 km su tutta la regione dei parametri  $a$  e  $n$ .

Una volta noti i parametri  $a$  e  $n$  della LSPP per i tempi di ritorno fissati è possibile calcolare l'altezza di pioggia di durata desiderata in punto della Regione Toscana.

#### A.1.2 CALCOLO DELLA PIOGGIA DI PROGETTO SU UN BACINO IDROGRAFICO

Dalle linee guida della Regione Toscana è possibile definire la metodologia di calcolo delle altezze di pioggia su un bacino idrografico.

Per calcolare l'altezza di pioggia su un bacino idrografico è necessario individuare lo spartiacque del bacino imbrifero e, una volta scelto il tempo di ritorno, è possibile utilizzare due metodologie per la valutazione delle altezze di pioggia.

**A. Utilizzo dei parametri  $a$  e  $n$  della LSPP** - Noti i parametri  $a$  e  $n$  della LSPP per assegnato  $T_r$ , viene definita la durata  $t$  dell'evento. Per un bacino idrografico si usa  $t = t_{cr}$  (tempo critico), solitamente assunto pari al tempo di corrivazione  $t_c$ . È possibile quindi trovare l'altezza di pioggia in ogni cella tramite la relazione:

$$h(t) = a t_c^n \quad (4)$$

con:  $h$  = altezza di pioggia [mm];  $t_c$  = tempo di corrivazione [ore],  $a$  e  $n$  parametri caratteristici.

La stima dell'altezza di pioggia con l'equazione (4) può essere effettuata tramite software GIS con un *tool* tipo **Raster Calculator**. Una volta trovata l'altezza di pioggia  $h$  in ogni cella, per la durata e il tempo di ritorno stabilito, è sufficiente calcolare il valore medio sul bacino idrografico.

### A.1.3 CALCOLO DEGLI IDROGRAMMI DI PROGETTO

#### MODELLO DI INFILTRAZIONE - METODO DELL'INFILTRAZIONE A SOGLIA

La modellistica idrologica per la determinazione dell'idrogramma di piena in una o più sezioni fluviali di un bacino idrografico deve significativamente rappresentare tutte le fasi che si hanno a partire dalla distribuzione delle piogge insistenti sul bacino, fino alla valutazione dell'onda di piena.

La trasformazione da pioggia al suolo a portata nella sezione di chiusura avviene secondo una cascata di processi. L'ingresso principale al modello è costituito da una serie di misurazioni di pioggia, di tipo puntuale (registrazioni pluviometriche) sull'area d'interesse, che dovranno essere, in generale, interpolate per ottenere l'andamento delle precipitazioni lorde al suolo nello spazio e nel tempo, in termini di afflussi per unità di area. La quota parte di tali precipitazioni che andrà in scorrimento superficiale, detta anche precipitazione efficace (netta), viene valutata con un opportuno *modello di trasformazione afflussi-deflussi*, per la stima della produzione di deflusso idealmente in ciascun punto del bacino, avente le dimensioni di una portata per unità di area. Infine, il processo di concentrazione dei deflussi nel reticolo idrografico e di trasferimento lungo questo fino alla sezione di chiusura verrà rappresentato tramite un opportuno *modello di formazione dell'onda di piena*.

La metodologia alla base degli studi effettuati mira ad un'agevole caratterizzazione degli eventi in termini di tempi di ritorno; conseguenza diretta, la possibilità di definire i livelli di rischio in funzione della probabilità di accadimento. Ciò si ottiene facilmente attraverso una procedura semplificata di generazione di eventi sintetici, che si basa sulle seguenti ipotesi:

- eventi meteorici sintetici uniformemente distribuiti sul bacino;
- isofrequenza fra evento meteorico e portata in alveo ( $Tr$  evento di pioggia =  $Tr$  idrogramma di piena).

La determinazione degli idrogrammi di piena non può prescindere dai parametri, ormai generalmente utilizzati e condivisi, della procedura di *Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana*. Tale procedura parte dalla teoria dell'*Idrogramma Istantaneo Unitario (Instantaneous Unit Hydrograph, IUH)*, dove i parametri in gioco sono stati ricavati dalle caratteristiche geomorfologiche del bacino, ottenendo così un *Idrogramma Istantaneo Unitario Geomorfologico* di cui vengono riportate di seguito le linee principali. Il modello di formazione dell'onda di piena adottato è quello proposto da Nash.

L'input meteorico è rappresentato da uno "*ietogramma sintetico ad intensità costante*" con il quale si assume che l'intensità di precipitazione sia costante durante l'intera evoluzione del fenomeno e pari al valor medio fornito dalle curve di possibilità climatica (o pluviometrica, di seguito *CPP*) illustrate in seguito. Tale ietogramma consente la determinazione della portata al colmo di assegnato tempo di ritorno sulla base del metodo dell'*evento critico*, individuando la durata di pioggia efficace che massimizza il valore al colmo dell'onda di piena fornita dal modello di trasformazione afflussi - deflussi.

Le CPP consentono di rappresentare il regime delle piogge di breve durata e forte intensità in una certa zona. Per la loro determinazione è necessaria un'analisi delle serie pluviometriche disponibili dalla rete di telemisura presente sul territorio a partire dall'esame dei topoi, o poligoni di Thiessen. Dall'analisi statistica delle precipitazioni estreme, in adattamento alla distribuzione TCEV, si perviene appunto alla determinazione delle CPP, che stabiliscono un legame tra le altezze di pioggia e la durata dell'evento piovoso, in funzione della probabilità di accadimento dell'evento stesso.

Il valore della pioggia lorda deve essere depurato delle perdite. La trasformazione afflussi-deflussi adottata prevede l'adozione di un "approccio asintotico a soglia" che richiede la stima di due parametri: la *perdita iniziale*, schematizzata introducendo un *volume unitario di perdita iniziale* (indicato con  $I_a$ ), che il terreno assorbe completamente durante i primi istanti di precipitazione (dall'inizio dell'evento  $t=0$  all'istante  $t=t_a$ ), e la perdita per infiltrazione nel suolo durante l'evento, schematizzata con una *infiltrazione cumulata costante a saturazione* (indicata con  $K_s$ ).

$$\begin{cases} I_a(t) = I_a(0) + \int_0^{t_a} (P(\tau) - K_s) d\tau & \text{per } t < t_a \\ P_n(t) = 0 & \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_a(t) = I_a & \text{per } t \geq t_a \\ P_n(t) = P(t) - K_s & \end{cases}$$

dove:

$P(t)$  intensità di precipitazione lorda sul bacino [mm/h];

$P_n(t)$  intensità di precipitazione netta sul bacino [mm/h];

$I_a(t)$  volume unitario di perdita iniziale all'istante  $t$  dell'evento [mm];

$I_a = I_a(t_a)$  volume di perdita iniziale per unità di area [mm];

$K_s$  velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h].

I valori di  $I_a$  e  $K_s$ , nel lavoro di regionalizzazione, sono calcolati in funzione dell'uso del suolo e dalla geologia dei bacini, resi indipendenti dalle dimensioni del bacino idrografico.

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, è stato applicato 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 dal bacino considerato.

#### MODELLO DI INFILTRAZIONE - METODO SCS-CURVE NUMBER

Su alcuni bacini per il calcolo delle perdite di bacino è stato adottato il metodo del Curve Number, modello di rifiuto del terreno sviluppato dal Soil Conservation Service degli Stati Uniti.

Si tratta di un modello empirico che stima la predisposizione dei suoli a contribuire ai deflussi di piena mediante l'analisi di tre fattori: le caratteristiche di permeabilità dei terreni superficiali e degli strati geologici immediatamente sottostanti, l'uso del suolo e la copertura vegetale, lo stato di imbibimento del terreno all'inizio della sollecitazione meteorica.

La relazione fondamentale per la stima della precipitazione efficace è la seguente:

$$\begin{cases} P_{eff} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & P \geq I_a \\ P_{eff} = 0 & P < I_a \end{cases}$$

dove  $P_{eff}$  è la precipitazione efficace cumulata al tempo  $t$ ,  $P$  è la precipitazione totale cumulata allo stesso istante,  $I_a$  è la perdita iniziale ed  $S$  è il fattore di ritenzione potenziale, ovvero il massimo volume specifico di acqua che il terreno può trattenere in condizioni di saturazione.

Con l'introduzione di  $I_a$  si vuol tenere conto di quel complesso di fenomeni, quali l'intercettazione da parte della vegetazione e l'accumulo nelle depressioni superficiali del terreno, che ritardano il verificarsi del deflusso superficiale.

I due parametri  $I_a$  ed  $S$  si dovranno determinare mediante operazioni di taratura del modello. Dall'analisi di risultati ottenuti dall' SCS in numerosi piccoli bacini sperimentali americani, è stata proposta una relazione empirica che lega i 2 parametri:

$$I_a = cS$$

con  $c$  posto pari a 0.2.

In questo modo è possibile definire il deflusso netto in funzione dell'afflusso meteorico, una volta fissato il valore di  $S$ .

Il parametro  $S$  dipende dalla possibilità di infiltrazione dell'acqua in condizioni di terreno già saturato, dall'insieme delle condizioni del suolo (uso, trattamento della superficie, drenaggio) e dal contenuto di umidità iniziale dello stesso (AMC, Antecedent Moisture Condition).

L'effetto di tutti questi fenomeni viene rappresentato globalmente introducendo un parametro adimensionale, il Curve Number (CN), legato ad  $S$  tramite la relazione:

$$S = S_0 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right)$$

dove  $S_0$  è una costante di scala dimensionale, che riflette l'unità di misura adottata.

Nel sistema metrico,  $S_0 = 254$  mm.

Il parametro  $CN$  è un numero adimensionale che varia da 100, per corpi idrici, a circa 30, per suoli permeabili con elevati tassi di infiltrazione, che dipende, innanzitutto, dalle caratteristiche idrologiche del suolo (struttura, tessitura e permeabilità).

Per identificare il tipo idrologico di suolo bisogna analizzare le caratteristiche geopedologiche del bacino. L'SCS ha classificato il suolo in quattro gruppi:

- Gruppo A: suoli aventi scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla, ghiaie profonde molto permeabili. Capacità di infiltrazione molto elevata.
- Gruppo B: suoli aventi moderata potenzialità di deflusso. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A e con maggiore aliquota di argilla e limo. Elevate capacità di infiltrazione anche in condizioni di saturazione.
- Gruppo C: suoli aventi potenzialità di deflusso moderatamente alta. Suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali. Scarsa capacità di infiltrazione.
- Gruppo D: suoli con potenzialità di deflusso molto elevata. Argille con elevata capacità di rigonfiamento, suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie. Scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.

Una volta individuato il tipo idrologico di suolo, per determinare il  $CN$  occorre analizzare la tipologia di uso del suolo stesso.

Nelle tabelle seguenti si riportano i valori caratteristici del parametro  $CN$ , che si ottengono per combinazione delle caratteristiche idrologiche del suolo, secondo i 4 tipi idrologici A-B-C-D a permeabilità decrescente, e delle caratteristiche di uso prevalente del suolo stesso.

Per quanto riguarda l'influenza dello stato di imbibimento del suolo all'inizio dell'evento meteorico, l'SCS individua tre classi caratterizzate da differenti condizioni iniziali ( $AMC$ , *Antecedent Moisture Condition*) a seconda del valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei cinque giorni precedenti l'evento meteorico:

$AMC I$ : potenziale di scorrimento superficiale minimo. Suolo asciutto.

$AMC II$ : potenziale di scorrimento medio. Suolo mediamente umido.

$AMC III$ : potenziale di scorrimento massimo. Suolo saturo.

La categoria a cui fare riferimento si può individuare in base alla precipitazione totale dei 5 giorni precedenti quello dell'evento meteorico ed in base alla stagione, vegetativa o non vegetativa.

I valori di  $CN$  ricavati dallo shapefile pubblicato dalla Regione Toscana si riferiscono a condizioni di saturazione del terreno medie ( $AMC II$ ).

I parametri richiesti dal modello SCS Curve Number sono un valore dell'indice  $CN$  per ogni interbacino in cui è stato discretizzato il bacino, e le condizioni iniziali, ovvero le perdite iniziali espresse come rapporto con la ritenzione potenziale ( $I_a/S$ , *initial abstraction ratio*, in genere posto pari a 0.2), da specificare per ogni sottobacino.

### MODELLO DI FORMAZIONE DELL'ONDA DI PIENA - MODELLO DI NASH E GIUH

L'*Idrogramma Istantaneo Unitario* (IUH) rappresenta l'idrogramma di piena causato da un evento impulsivo di pioggia di volume unitario e durata tendente a zero. Ipotizzando un comportamento del sistema bacino idrografico lineare e stazionario, la risposta  $Q(t)$  ad una sollecitazione meteorica di intensità  $p(t)$ , supposta costante su tutti i punti del bacino (approccio di tipo integrato), è data dall'integrale di convoluzione fra ietogramma di pioggia efficace e IUH:

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

dove:

$Q(t)$  è la portata defluente;

$p(t) = A i(t)$ , con  $A$  area del bacino e  $i(t)$  intensità di pioggia netta ragguagliata sul bacino;

$U(t)$  è l'idrogramma unitario

$$\begin{cases} U(0) = 1 \\ U(t > 0) = 0 \end{cases} \quad \int_0^{\infty} U(t) dt = 1$$

La caratterizzazione di un modello di formazione della piena basato su tale principio consiste quindi essenzialmente nella determinazione della forma della funzione  $U(t)$ , che può essere stimata fissandone la struttura sulla base di considerazioni teoriche, e stimandone i parametri o per taratura, utilizzando dati sperimentali contemporanei di afflussi sul bacino e deflussi nella sezione di chiusura, o sulla base di caratteristiche geomorfologiche del bacino. Uno dei più diffusi modelli concettuali utilizzati per determinare la forma della funzione  $U(t)$  è quello basato sull'ipotesi che il bacino idrografico si comporti come un insieme di  $n$  serbatoi lineari disposti in serie. L'espressione dell'idrogramma istantaneo unitario che ne deriva per un singolo serbatoio lineare è:

$$U(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{t}{k}}$$

dove  $k$  è la costante del serbatoio che rappresenta il tempo caratteristico di svuotamento del serbatoio.

Supponendo che il bacino si comporti come una serie di  $n$  serbatoi, ciascuno con uguale tempo caratteristico  $k$ , la portata in uscita dall'intero bacino come risposta ad un input impulsivo distribuito sul bacino rappresenterà l'idrogramma istantaneo unitario del bacino alla sua chiusura, nota come *Idrogramma Istantaneo Unitario di Nash*:

$$U(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{(n-1)} e^{-\left(\frac{t}{k}\right)}$$

dove la funzione  $\Gamma(n)=(n-1)!$ .

Il momento di primo ordine dell'IUH rispetto all'origine viene detto *tempo di ritardo (lag)  $Tl$*  ed è dato da:

$$Tl = \int_0^{\infty} U(t) t dt$$

In questo schema il tempo di ritardo è dato dal prodotto  $nk$  (pari proprio alla media dell'idrogramma unitario). I parametri  $n$ ,  $k$  dell'IUH di Nash sono stati ricavati sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del reticolo idrografico, mediante le seguenti espressioni:

$$n = 3.29(Rb/Ra)^{0.78} Rl^{0.07}$$

$$k = 0.7(Ra/(Rb \cdot Rl))^{0.48} Lc/v$$

in unità congruenti, dove:

$R_b$  = rapporto di biforcazione;

$R_l$  = rapporto di lunghezza;

$R_a$  = rapporto di area;

$L_c$  = lunghezza del canale principale (dalla sorgente alla sezione di interesse);

$v$  = fattore cinematico legato alla velocità della piena ("media spazio-temporale di scorrimento dell'acqua o di propagazione dell'onda di piena").

I parametri geomorfologici sopra elencati permettono di rappresentare lo sviluppo della rete idrografica mediante una descrizione gerarchica e possono quindi essere calcolati, una volta ordinato il reticolo idrografico secondo il metodo di gerarchizzazione e classificazione geomorfologica di Horton e Strahler.

La gerarchizzazione di una rete idrografica si esegue attribuendo un ordine a ciascun segmento fluviale; un'asta che non nasce dalla confluenza di altre due è di primo ordine; un'asta di ordine  $n$  e un'asta di ordine  $n-1$  congiungendosi danno origine a un'asta di ordine  $n$ ; due aste di ordine  $n$  congiungendosi danno origine a un'asta di ordine  $n+1$ . Per ogni bacino idrografico esiste una relazione fra il numero dei rami fluviali aventi un certo ordine e l'ordine stesso: in genere, il valore del primo diminuisce all'aumentare del secondo.

L'organizzazione della rete idrografica e quindi il suo grado di gerarchizzazione possono essere espressi mediante parametri quantitativi che definiscono la geometria del reticolo idrografico e il suo grado di organizzazione gerarchica. Il parametro di base è il rapporto di biforcazione  $R_b$ , che esprime il rapporto fra il numero di segmenti fluviali di un certo ordine ed il numero dei segmenti dell'ordine immediatamente successivo. Considerando invece la lunghezza media delle aste di un certo ordine si ottiene il rapporto fra le lunghezze,  $R_l$ . Analogamente, si definisce anche il rapporto fra le aree,  $R_a$ .

I tre parametri appena descritti vengono determinati sulla base delle seguenti relazioni:

$$N_u = R_b^{\omega-u}$$

$$\bar{L}_u = \bar{L}_1 R_l^{u-1}$$

$$\bar{A}_u = \bar{A}_1 R_a^{u-1}$$

dove

$\omega$  è l'ordine massimo del reticolo;

$N_u$  il numero delle aste di ordine  $u$ , con  $u=1, 2, 3, \dots$ ;

$\bar{L}_u$  la lunghezza media delle aste di ordine  $u$ , con  $u=1, 2, 3, \dots$ ;

$\bar{A}_u$  l'area media sottesa da aste di ordine  $u$ , con  $u=1, 2, 3, \dots$

Lo studio di Regionalizzazione delle Portate di Piena, attraverso la taratura sistematica dei dati relativi ad eventi registrati nei 42 bacini strumentati dal Servizio Idrografico, ha fornito una relazione fra i valori di  $Tl$  ed i parametri geomorfologici:

$$Tl = 0.42 \left( \frac{Rb}{Ra} \right)^{0.3} Rl^{-0.41} \frac{Lmc}{A^{0.075}} \quad [h]$$

dove  $A$  è l'area del bacino espressa in  $[kmq]$  e  $Lmc$  la lunghezza del reticolo in  $[km]$ , calcolata come cumulata delle lunghezze medie per i vari ordini gerarchici.

## A.2 MODELLISTICA IDRAULICA HEC-RAS

Il software utilizzato per la modellazione idraulica è HEC-RAS 5.0.7 distribuito da US Army Corps of Engineers. Il modello permette di effettuare analisi idrauliche monodimensionali, bidimensionali ed accoppiate mono-bidimensionali. Quest'ultima tipologia di modellazione è particolarmente indicata per la simulazione degli eventi di piena in cui il flusso nell'alveo fluviale viene schematizzato con un moto 1D, mentre la propagazione della piena sulle aree inondabili, attraverso un moto 2D.

### A.2.1 MODELLISTICA IDRAULICA MONODIMENSIONALE

La dinamica fluviale in alveo è stata modellata con schema monodimensionale in moto vario attraverso le equazioni di De Saint Venant.

In particolare, il modello di moto vario risolve in forma numerica le equazioni di continuità e della quantità di moto che risultano:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_L = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QU}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial H}{\partial x} + S_f + S_h \right) = 0 \end{cases}$$

in cui:

- A = area della sezione liquida [mq];
- Q = portata [mc/s];
- $q_L(x)$  = portata laterale (positiva se entrante) [mq/s];
- H = z+h è la quota del pelo libero (z quota del fondo e h battente idraulico) [m];
- g = accelerazione di gravità [ $m/s^2$ ];
- U = velocità media della corrente [m/s];
- $S_f$  = perdite di carico distribuite per unità di lunghezza [m/m];
- $S_h$  = perdite di carico concentrate [m/m].

Assumendo la gradualità spazio-temporale del fenomeno, la perdita di carico effettivo può essere stimata con un'equazione analoga a quella adottata per il moto uniforme:

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

dove R [m] è il raggio idraulico e n è il coefficiente di Manning [ $s/m^{1/3}$ ].

Per includere nel modello gli effetti dissipativi indotti da variazioni di sezione, quali allargamenti o restringimenti, si valutano le perdite di carico effettivo addizionali,  $S_h$ , mediante la formula:

$$S_h = \frac{d}{dx} \left( C \frac{Q^2}{2g} \frac{1}{A^2} \right)$$

in cui C è un coefficiente funzione della velocità, del battente e delle proprietà geometriche della sezione.

Per la risoluzione del sistema di equazioni è necessario conoscere le condizioni al contorno di ciascun tratto sia a monte che a valle.

La condizione di valle può essere costituita da un idrogramma di livelli idrometrici, oppure da un legame funzionale tra portata e livelli ovvero una scala di deflusso. A monte invece è necessario imporre una condizione sulla portata in ingresso attraverso un idrogramma di piena, che è stato ricavato sulla base dell'analisi idrologica già descritta al paragrafo precedente.

Dal punto di vista numerico, il sistema di equazioni monodimensionali viene risolto con uno schema implicito alle differenze finite.

Per quel che riguarda le aree simulate attraverso celle di accumulo, il fenomeno non stazionario è descritto attraverso la sola legge d'invaso:

$$A_{ck} \frac{\partial h_k}{\partial t} = \sum_i Q_{ki}(h_k, h_i)$$

dove  $A_{ck}$  e  $h_k$  rappresentano rispettivamente l'area e il livello idrico della cella k-esima,  $h_i$  il livello idrico nella generica cella i-esima circostante, e  $Q_{ki}$  la portata scambiata con detta cella.

Per accoppiare la dinamica in alveo alle aree inondabili simulate attraverso celle di accumulo vengono utilizzate le cosiddette "Lateral Structure" che simulano il comportamento di uno stramazzo a cui possono essere associate diverse caratteristiche di funzionamento.

## A.2.2 MODELLISTICA IDRAULICA BIDIMENSIONALE

La modellistica bidimensionale prevede la risoluzione numerica delle equazioni "Shallow Water", le quali risultano da un'approssimazione delle equazioni di Navier-Stokes in cui le velocità in direzione x ed y sono mediate sulla verticale e l'effetto delle tensioni turbolente di Reynolds è simulato attraverso l'introduzione un parametro di viscosità turbolenta. Inoltre si assumono valide le seguenti ipotesi:

- scala spaziale verticale sia << scala spaziale orizzontale
- fluido incomprimibile;
- componente verticale della velocità trascurabile;
- distribuzione della pressione idrostatica lungo la verticale.

L'equazione di continuità risulta:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} + q = 0$$

dove  $H(x,y,t) = z(x,y) + h(x,y,t)$  con z la quota del fondo ed h il battente idraulico, u e v rispettivamente I componente lungo x e lungo y della velocità mediata sulla verticale e q il termine che tiene conto di possibili immissioni/rimozioni di portata.

L'equazione della quantità di moto risulta:

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

dove g è l'accelerazione di gravità,  $v_t$  è il coefficiente di viscosità turbolenta orizzontale,  $c_f$  è il coefficiente di resistenza ed f è il parametro di Coriolis. Il coefficiente di viscosità turbolenta è a sua volta calcolato come:

$$v_t = Dhu_s$$

in cui D è una costante empirica adimensionale e  $u_s$  è la velocità di attrito che può essere calcolata come segue:

$$u_s = \sqrt{gRS} = \frac{\sqrt{g}}{C} |U| = \frac{n\sqrt{g}}{R^{1/6}} |U|$$

con R il raggio idraulico, S la pendenza della linea dell'energia, n il numero di Manning ed |U| il modulo della velocità. I valori da assegnare alla costante D sono riportati in Tabella 0 1.

Il coefficiente di attrito  $c_f$  è ottenuto attraverso la formula di Manning:

$$c_f = \frac{n^2 g}{R^{4/3}} |U|$$

mentre il parametro di Coriolis è:

$$f = 2\omega \sin \varphi$$

con  $\omega$  la velocità angolare della terra e  $\varphi$  la latitudine.

D	Intensità di mescolamento	Geometria e superficie
0.11 – 0.26	bassa	canali rettilinei, superfici lisce
0.30 – 0.77	moderata	meandri poco accentuati, irregolarità moderate
2.0 – 5.0	alta	meandri molto accentuati, superfici scabre

Tabella A.2- 1: Valori suggeriti da assegnare alla costante D.

Le equazioni "Shallow Water" possono essere ulteriormente semplificate quando, nell'equazione della quantità di moto, i termini associati all'accelerazione di gravità ed all'attrito sono predominanti rispetto a quelli inerziali. Attraverso opportune manipolazioni algebriche sostituendo la versione semplificata dell'equazione della quantità di moto nell'equazione di continuità, si ottiene la forma approssimata detta "Diffusion Wave Approximation":

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0$$

dove:  $\beta = \frac{R(H)^{5/3}}{n|\nabla H|^{1/2}}$

Le condizioni al contorno da assegnare sui bordi del dominio di calcolo possono essere di tre differenti tipologie:

- livello della superficie libera;
- gradiente della superficie libera in direzione perpendicolare al dominio di calcolo;
- portata che attraversa il bordo del dominio.

La griglia di calcolo è non strutturata e può essere utilizzato un approccio con “sotto-griglia” (Casulli, 2008) per cui le celle di calcolo hanno passo maggiore rispetto alla batimetria impiegata (Figura A-2 1) e contengono informazioni aggiuntive quali raggio idraulico e area bagnata delle varie facce e curva di invaso dei volumi. Tali grandezze possono essere pre-calcolate prima della simulazione per ridurre il tempo di calcolo. In questo modo si perdono i dettagli ad alta risoluzione, ma l’informazione derivante da essi rimane disponibile (Figura A-2 1b, c).

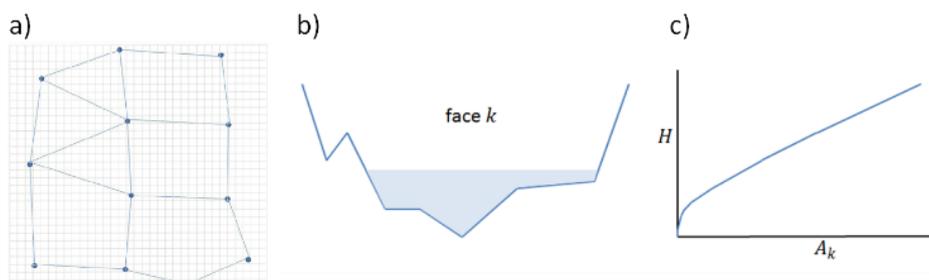


Figura A-2.1: a) Esempio di “sotto-griglia”. b) Area bagnata associata ad una faccia della cella di calcolo k. c) Curva di invaso associata ad una cella di calcolo k.

Dal punto di vista della risoluzione numerica, viene impiegata una discretizzazione ibrida che combina differenze finite e volumi finiti. Nello specifico le differenze finite sono utilizzate per le derivate temporali mentre un’ approssimazione ibrida viene impiegata per le derivate spaziali.

Per accoppiare la modellazione monodimensionale a quella bidimensionale vengono utilizzate le cosiddette “Lateral Structure” che simulano il comportamento di uno stramazzo a cui possono essere associate diverse caratteristiche di funzionamento.

Quando una simulazione prevede inoltre la compresenza di aree 2D e celle di accumulo, queste vengono messe in comunicazione da “2D/SA connection”, anch’esse oggetti che simulano il funzionamento idraulico di uno stramazzo.

### A.3 MODELLISTICA IDRAULICA MIKE

#### A.3.1. 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).

#### 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.

#### 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.

#### 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>).

#### 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.

#### *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:

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

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).

#### *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 soglia larga

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 $Q = A(Z_1) \cdot Z_2$

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).

### 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:

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

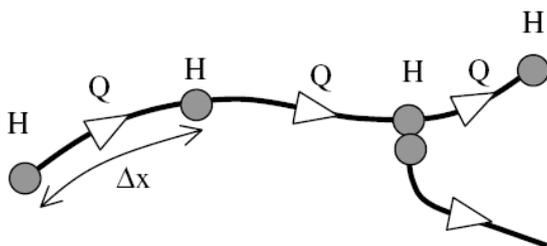
dove M è il coefficiente di Strickler, pari a  $1/n$ , essendo n il coefficiente di Manning.

### 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.

### 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.

### 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.3.2. 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.

#### 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:

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

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 planometriche 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.3.3. MODELLISTICA MIKE FLOOD**

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 in maniera distribuita.

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

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