

HydroGeo

Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio

Studio Tecnico Associato Ingg. G. Gazzini, T. Staiano, A. Benvenuti



Via Cardinal Latino, 20

50126 Firenze

Tel 055 6587050 - Fax 055 0676043

e-mail info@studiohydrogeo.it

COMUNE DI PONTASSIEVE
STUDIO IDROLOGICO - IDRAULICO
DI SUPPORTO ALLA VARIANTE DEL REGOLMANETO
URBANISTICO DENOMINATA 3° RUC

RELAZIONE IDROLOGICA IDRAULICA

COMMITTENTE:



Comune di Pontassieve
Via Tanzini, 30 50065
Pontassieve (FI)

PROGETTISTI:

ING. TIZIANO STAIANO

PROGETTO

L 5 4 2

LOTTO

0 1

FASE

S 0 6

DOC

T

ELABORATO

R I I

REV

A

REV.

DATA EMISSIONE

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

A

Novembre 2016

T.Staiano

T.Staiano

T.Staiano

Indice generale

1. PREMESSA	2
2. AREA D'INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO	3
2.1 <i>CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO E RILIEVI TOPOGRAFICI</i>	3
2.2 <i>DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO</i>	3
3. APPROCCIO METODOLOGICO	4
4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO	5
4.1 <i>PARAMETRI IDROLOGICI</i>	6
4.2 <i>REGIME PLUVIOMETRICO</i>	7
4.3 <i>RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDROLOGICA</i>	9
5. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO	9
5.1 <i>CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEI CORSI D'ACQUA E DELL'AREA DI STUDIO</i>	10
5.2 <i>CONDIZIONI AL CONTORNO E PARAMETRI DEL MODELLO IDRAULICO</i>	11
5.3 <i>ANALISI DEI RISULTATI</i>	13
6. PERICOLOSITÀ IDRAULICA	15
7. FATTIBILITÀ	16
APPENDICE A: MODELLISTICA IDROLOGICO-IDRAULICA	17
A.1 <i>MODELLISTICA IDROLOGICA</i>	17
A.1.1 <i>Regime pluviometrico – Studio Regionale LSPP</i>	17
A.1.2 <i>Calcolo della pioggia di progetto su un bacino idrografico</i>	17
A.1.3 <i>Calcolo degli idrogrammi di progetto</i>	17
A.2 <i>MODELLISTICA IDRAULICA</i>	21
A.2.1 <i>Modellistica Idraulica Monodimensionale</i>	21
A.2.2 <i>Modellistica Bidimensionale</i>	21
APPENDICE B: RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDRAULICA	24

Indice delle figure

Figura 4-1: <i>Idrogrammi di piena al variare del tempo di ritorno e della durata dell'evento meteorico (m³/s)</i>	9
Figura 5-1: <i>Inviluppo dei battenti idraulici TR 30 anni</i>	13
Figura 5-2: <i>Inviluppo dei battenti idraulici TR 200 anni</i>	14
Figura 5-3: <i>Inviluppo dei battenti idraulici TR 500 anni</i>	14
Figura 1: <i>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.</i>	23

Indice delle tabelle

Tabella 4-1: <i>Tabella di associazione tra formazione geologica e Ks</i>	6
Tabella 4-2: <i>Tabella di riepilogo dei parametri idrologici</i>	6
Tabella 4-3: <i>Altezze di pioggia lorda (mm)</i>	7
Tabella 4-4: <i>Volumi di pioggia lorda (mc) sul bacino idrografico</i>	7
Tabella 4-5: <i>Volumi di pioggia lorda (mc) su areale non scolante nel Fosso dello Stracchino</i>	7
Tabella 4-6: <i>Differenze percentuali tra volumi di pioggia</i>	8
Tabella 4-7: <i>Portate al colmo (m³/s)</i>	9
Tabella 5-1: <i>Sezioni implementate nel modello idraulico</i>	10
Tabella 5-2: <i>Coefficienti di scabrezza secondo Manning</i>	11
Tabella 5-3: <i>Differenze sulle principali variabili idrauliche tra configurazione con interazione Arno e senza interazione</i>	12
Tabella 1: <i>Valori Ks utilizzati nel presente studio</i>	19
Tabella 2: <i>Valori suggeriti da assegnare alla costante D</i>	22
Tabella 3: <i>Risultati della modellistica idraulica monodimensionale in alveo per ogni evento simulato</i>	29

1. PREMESSA

Lo Studio Hydrogeo Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio è stato incaricato dal Comune di Pontassieve di redigere lo "Studio Idrologico-Idraulico ai sensi del DPGR 53/R, di supporto alla Variante del Regolamento Urbanistico denominata 3° RUC", in merito all'ambito a progettazione unitaria S3 – Parco dello Sport – via dei Mandorli, in località Sieci.

In particolare ai sensi del suddetto Decreto vanno considerati gli elementi idrologico-idraulici necessari per caratterizzare la probabilità di esondazione dei corsi d'acqua in riferimento al reticolo d'interesse, definendo le pericolosità idrauliche come segue:

- 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;
- Aree a pericolosità media (I2), caratterizzate da eventi alluvionali con tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni;
- Aree a pericolosità bassa (I1), aree collinari o montane.

Le condizioni di attuazione delle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali possono essere differenziate secondo le seguenti categorie di fattibilità:

- **Fattibilità senza particolari limitazioni (F1):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali non sono necessarie prescrizioni specifiche ai fini della valida formazione del titolo abilitativo all'attività edilizia.
- **Fattibilità con normali vincoli (F2):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali è necessario indicare la tipologia di indagini e/o specifiche prescrizioni ai fini della valida formazione del titolo abilitativo all'attività edilizia.
- **Fattibilità condizionata (F3):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali, ai fini della individuazione delle condizioni di compatibilità degli interventi con le situazioni di pericolosità riscontrate, è necessario definire la tipologia degli approfondimenti di indagine da svolgersi in sede di predisposizione dei piani complessi di intervento o dei piani attuativi o, in loro assenza, in sede di predisposizione dei progetti edilizi.
- **Fattibilità limitata (F4):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali la cui attuazione è subordinata alla realizzazione di interventi di messa in sicurezza che vanno individuati e definiti in sede di redazione del medesimo regolamento urbanistico, sulla base di studi, dati da attività di monitoraggio e verifiche atte a determinare gli elementi di base utili per la predisposizione della relativa progettazione.

Il presente studio si propone di definire la pericolosità e la fattibilità idraulica all'interno del succitato ambito, composto dai comparti S3a-Polisportiva e S3b-Fosso dello Stracchino, valutando gli input idrologici e modellando il corso d'acqua costituente la rete idraulica superficiale. All'interno dei suddetti comparti è prevista una trasformazione finalizzata alla realizzazione di un nuovo parco attrezzato con strutture sportive e ricreative all'aperto e attrezzature per il tempo libero.

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 dei criteri di fattibilità idraulica.

2. AREA D'INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO

2.1 CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO E RILIEVI TOPOGRAFICI

L'ambito d'indagine comprende il corso d'acqua del Borro dello Stracchino, per una lunghezza di circa 950 metri a monte della confluenza con il Fiume Arno e l'area a campagna adiacente il corso d'acqua.

Per la caratterizzazione dell'area di studio è stato effettuato un rilievo topografico del corso d'acqua e delle principali opere antropiche presenti: viabilità, ponti, tombamenti, opere e manufatti di contenimento, ovvero tutte quelle opere che possono interferire con il deflusso delle acque.

Il rilievo topografico è stato poi integrato con il rilievo Lidar della regione Toscana, funzionale alla caratterizzazione delle aree contermini il corso d'acqua. Dall'analisi dei dati topografici, è emersa una buona conformità tra i rilievi eseguiti in campo dagli scriventi, e il rilievo Lidar della Regione Toscana.

In *Tavola 2 – Planimetria di Rilievo* è riportato il rilievo topografico effettuato, comprensivo di sei sezioni del tombamento posto a valle del rilevato ferroviario e che percorre tutto l'abitato di Sieci, fino al recapito in Arno, il quale è caratterizzato, lungo il suo corso da sezioni a geometria variabile.

2.2 DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO

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

- LIDAR (1x1 m) del Ministero dell'Ambiente, Fonte dei dati: Regione Toscana – “Rilievi LIDAR”;
- Shape file 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).
- Shape file 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);
- Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:10000 e 1:2000 ove presente. Fonte: Regione Toscana - Carta Tecnica Regionale;
- Shape file del Reticolo Idrografico, approvato da Regione Toscana con Legge regionale 27 dicembre 2012, n. 79; Fonte dei dati: Regione Toscana <http://www.regione.toscana.it/-/consorzi-di-bonifica-reticolo-idrografico-e-di-gestione>;
- Griglie dei parametri caratteristici delle LSPP, a ed n, pubblicate dalla Regione Toscana nell'ambito dello Studio di Regionalizzazione delle Precipitazioni. Fonte: Regione Toscana <http://www.regione.toscana.it/-/nuovi-dati-sulla-regionalizzazione-delle-precipitazioni>

3. APPROCCIO METODOLOGICO

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

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

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

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

La propagazione dei deflussi di piena così generati e la valutazione dei fenomeni esondativi lungo l'asta fluviale considerata avviene tramite modelli idraulici, in grado di fornire in ogni sezione dell'asta fluviale l'idrogramma di piena in transito ed il massimo battente idraulico atteso, in modo tale da poter verificare l'efficienza delle strutture di contenimento o, in caso contrario, la sussistenza di fenomeni esondativi.

In questo studio è stato implementato un modello idraulico integrato che permette di combinare l'approccio monodimensionale, per la modellazione idraulica in alveo, a quello bidimensionale per la modellazione idraulica delle aree inondabili. L'integrazione tra i modelli avviene in modo dinamico, garantendo quindi la conservazione di massa e quantità di moto tra i vari sistemi. Gli alvei dei corsi d'acqua vengono modellati attraverso l'inserimento di sezioni trasversali, ricostruite a partire dai rilievi topografici e comprensive di tutte quelle strutture che interferiscono con il deflusso di piena, mentre le aree inondabili sono caratterizzate da un modello digitale del terreno che deriva dal rilievo lidar e da rilievo topografico. 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.

4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO

Per l'implementazione del modello idrologico si è in prima fase definito l'estensione del bacino idrografico analizzando la morfologia dell'area in esame che ha portato a definire la sezione di chiusura del bacino in corrispondenza del ponte in località Mandorli, in prossimità dell'incrocio stradale tra via dello Stracchino e la viabilità secondaria di servizio all'attività agricola. L'areale presente a valle di tale sezione, a causa della conformazione del territorio, si può considerare non scolante nel corso d'acqua; in particolare l'area posta in destra idraulica tende a recapitare le acque verso il sottopasso della linea ferroviaria posto in prossimità della stazione ferroviaria, mentre l'area in sinistra idraulica viene convogliata verso il sottopasso di via dello Stracchino. Nei successivi paragrafi verranno approfondite le conseguenze di tale scelta e le assunzioni effettuate per tenere comunque conto di tale contributo idrologico, dato che va ad interessare i comparti urbanistici oggetto del presente studio.

Il modello numerico utilizzato consente la determinazione dei contributi idrologici al reticolo idraulico oggetto di studio ed è composto da un modello per il calcolo delle perdite del bacino idrografico (modello di infiltrazione) e da un modello afflussi-deflussi per la trasformazione degli input pluviometrici, depurati dalle perdite succitate, in idrogrammi sollecitanti il reticolo idraulico.

Il modello di infiltrazione utilizzato è il modello di infiltrazione asintotico a soglia, il quale richiede la stima 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.

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi utilizzato è il modello di Nash, che 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.

A valle della parametrizzazione idrologica sono state determinate le piogge insistenti sul bacino considerato (piogge lorde, non depurate dalle perdite), come riportato al Paragrafo 4.2.

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 α , β , γ sono parametri dipendenti dal bacino considerato.

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

4.1 PARAMETRI IDROLOGICI

Sul bacino idrografico oggetto di studio è stata effettuata una classificazione geomorfologica del reticolo fluviale secondo il criterio di Horton-Strahler (si veda l'Appendice A: Modellistica idrologico-idraulica per maggiori dettagli).

Per la stima delle perdite è stato adottato il metodo di infiltrazione asintotico a soglia. Il parametro la (mm) è stato determinato in funzione della percentuale di area boscata presente nel bacino considerato (derivata dall'Uso e Copertura del Suolo).

Il parametro Ks (mm/h) è stato determinato a partire dalla Carta Geologica Regionale assegnando ad ogni formazione geologica un coefficiente di infiltrazione, secondo quanto riportato in Tabella 4-1 e calcolando un coefficiente medio per il bacino.

CODICE	DESCRIZIONE	KS [mm/h]
aC	("arenarie di Monte Cervarola"); arenarie turbiditiche quarzoso-feldspatiche a grana fine, in strati sottili; talora lenti di selci (sel) Aquitaniano-Langhiano superiore	1.55
alb	("alberese" e "formazione di Lanciata") calcari a grana fine grigio chiari, calcari marnosi scuri e arenarie calcaree gradate Paleocene-Eocene medio	4.65
all	alluvioni recenti e attuali Olocene	0
aS	("arenaria di Monte Senario") arenarie quarzoso-feldspatiche tipo "macigno", ma in generale più grossolane e contenenti ciottoli di quarzo, micascisti, filladi, calcari Paleogene	1.55
at	alluvioni terrazzate; ove distinte at1, at2, at3 Pleist. sup.	0
bn	(breccie nummulitiche) breccie poligeniche e calcareniti da torbide Paleogene	4.65
bw	conglomerati e arenarie di materiale ofiolitico alla base di cb. Paleocene-Eocene medio	0.775
cb	argille e marne con calcari, calcari marnosi, arenarie e calcareniti intercalate talora brecce sedimentarie costituite da rocce verdi, diaspri e calcari litografici	1.55
dt	detriti	2.325
fh	("formazione marno-siltose = flysch ad Elmintoidi"): calcari marnosi scuri, marne e arenarie calcaree Cretaceo superiore	4.65
fP1	("argilliti di Fiumalbo -marne di Le Piastre") argilliti varicolori, siltiti e marne grigie Oligocene superiore	0
fPaC	intervalli frequenti o potenti di marne siltose e siltiti in aC Aquitaniano-Langhiano superiore	0
fVc	(formazione di Vallina formazione di Sillano) argilloscisti variegati, calcari marnosi verdastri o grigi, calcareniti minute e arenarie calcarifere Cret. sup.-Eocene inf.	4.65
fVR	(formazione di Villa a Radda) argilloscisti talora siltosi, prevalentemente rossi, con pochi strati calcari marnosi verdastri o arenarie calcarifere, intercalati nella parte alta di pf o al tetto di questa Cretaceo sup.-Eocene inf.	0
mg	argille con lenti di gesso e di salgemma Messiniano sup.	0
Nu	calcareniti e calciruditi grigie, gradate Eocene	4.65
ol	a luoghi intercalazioni di materiale ligure in aC (olistostromi) Aquitaniano-Langhiano superiore	1.55
Pag	argille azzurre e cinerine Plioc. inf.-medio	0
pb	("argille a palombini") argilliti e marne fogliettate con intercalazioni di calcari a palombini Cretaceo inf.	0
Pcg	conglomerati e ghiaie prevalentemente argillose, con sabbie e sabbie argillose (al tetto e laterale di Ps) Plioc. inf.-medio	0.775
pf	("pietraforte") arenarie calcaree alternate ad argilliti subordinatamente livelli di marne varietà ofiolitifera Cretaceo superiore-Eocene inf.	1.55
Ps	sabbie gialle, arenarie Pliocene inf.-medio	1.55
sc	("scaglia toscana") argilliti rosse e varicolori con intercalazioni di calcari silicei grigi, marne rosse e calcareniti; al tetto marne siltose grigie, subordinatamente varicolori; Cretaceo inf. p.p.-Oligocene	0
Vs	("sabbie del Tasso") sabbie con lenti di ciottoli e sabbie argillose Pleist. inf.	2.325
VVB	("formazione di Villa Babbiani") sabbie con tasche e lenti di ciottoli di "macigno" Pleist. inf.	2.325

Tabella 4-1: Tabella di associazione tra formazione geologica e Ks

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi adottato è quello di Nash, i cui parametri n e k sono ricavati in funzione della classificazione geomorfologica di Horton-Strahler.

In Tavola 1 - Planimetria del Modello Idrologico sono riportate le seguenti mappe: gerarchizzazione, la e Ks , nelle quali è inoltre riportato il bacino idrografico.

I risultati delle parametrizzazioni appena descritte sono riportati di seguito:

Nome	k (h)	n (-)	la (mm)	Ks (mm/h)	Area (kmq)
Borro dello Stracchino	0.135	2.945	20.430	4.547	0.948

Tabella 4-2: Tabella di riepilogo dei parametri idrologici

4.2 REGIME PLUVIOMETRICO

Gli eventi meteorici studiati fanno riferimento a tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni con un set di durate dell'evento meteorico sintetico a cavallo della "durata critica" (durata che massimizza la portata al colmo). 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.

Nello specifico gli eventi meteorici studiati, sono i seguenti: Tr30, 200 e 500 anni con durate pari a 0.75 h, 1.00 h, 1.25 h e 1.50 h;

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

I risultati di tale studio hanno portato alla determinazione delle curve segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP), cioè della relazione che lega l'altezza di precipitazione alla durata dell'evento meteorico che l'ha generata, per un assegnato tempo di ritorno.

La LSPP è comunemente descritta da una legge di potenza del tipo:

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

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

La nuova pubblicazione dei dati ha imposto un sostanziale superamento di AlTo, modello idrologico comunemente utilizzato e riferimento per il territorio Toscano negli ultimi dieci anni. Rimane invece valido il metodo di calcolo, trattandosi di un modello cosiddetto "lamped" di trasformazione afflussi deflussi, solido e collaudato.

In Tabella 4-3, sono riportate le altezze di pioggia (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.

Tr (anni)	Durata evento meteorico (h)			
	0.75	1	1.25	1.5
30	46.5	50.3	53.5	56.2
200	64.2	70.0	74.9	79.1
500	73.1	79.9	85.5	90.4

Tabella 4-3: Altezze di pioggia lorda (mm)

In linea con la trattazione riportata nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana, la pioggia lorda, calcolata rispetto alla sezione di calcolo, viene ragguagliata tramite il coefficiente Kr, dipendente dall'area del bacino e dalla durata dell'evento. Per il caso in esame, data la ridotta estensione del bacino, il coefficiente è risultato essere prossimo all'unità.

Si rimanda all'Appendice A: Modellistica idrologico-idraulica per maggiori dettagli sulla procedura di regionalizzazione.

La scelta della sezione di chiusura in corrispondenza della sezione 00077PB16 ha portato a definire le piogge contribuenti ai deflussi del Fosso dello Stracchino (vedi Tabella 4-3) su un bacino idrografico che non comprende gli areali associati ai comparti urbanistici oggetto dello studio, in quanto chiuso più a monte, vedi *Tavola 1 - Planimetria del Modello Idrologico*.

In termini di volumi di pioggia (pioggia lorda) si ottiene quanto riportato nelle seguenti tabella:

Borro dello Stracchino (Area = 0.95 kmq)				
TR	Durata evento meteorico (h)			
	0.75	1	1.25	1.5
30	44186	47806	50818	53418
200	61036	66526	71123	75114
500	69484	75880	81243	85906

Tabella 4-4: Volumi di pioggia lorda (mc) sul bacino idrografico.

Area non scolante nel corso d'acqua (Area = 0.2 kmq)				
TR	Durata evento meteorico (h)			
	0.75	1	1.25	1.5
30	9288	10066	10715	11276
200	12830	14008	14997	15856
500	14605	15977	17130	18134

Tabella 4-5: Volumi di pioggia lorda (mc) su areale non scolante nel Fosso dello Stracchino.

Differenze percentuali				
TR	Durata evento meteorico (h)			
	0.75	1	1.25	1.5
30	21%	21%	21%	21%
200	21%	21%	21%	21%
500	21%	21%	21%	21%

Tabella 4-6: Differenze percentuali tra volumi di pioggia

In termini percentuali i volumi di pioggia che non confluiscono nel corso d'acqua ma che comunque vanno ad interessare i comparti oggetto dello studio rappresentano circa il 21% dei volumi totali, ovvero un volume che non può essere considerato trascurabile. In ragione di questa considerazione si è quindi scelto, in fase di restituzione dei risultati, di incrementare i battenti idraulici nell'area esclusa dal bacino idrografico, di un contributo paragonabile all'altezza di pioggia incrementata del 10% (a favore di sicurezza) insistente sul bacino non scolante nel corso d'acqua.

Nello specifico i battenti sono stati incrementati come indicato di seguito:

- Battenti idraulici massimi – Inviluppo TR30 + 8 cm;
- Battenti idraulici massimi – Inviluppo TR200 + 10 cm;
- Battenti idraulici massimi – Inviluppo TR500 + 12 cm.

4.3 RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDROLOGICA

Per ognuno degli eventi meteorici, dall'applicazione del modello idrologico descritto nei paragrafi precedenti, si sono determinati i rispettivi idrogrammi di piena, alla sezione di chiusura del bacino:

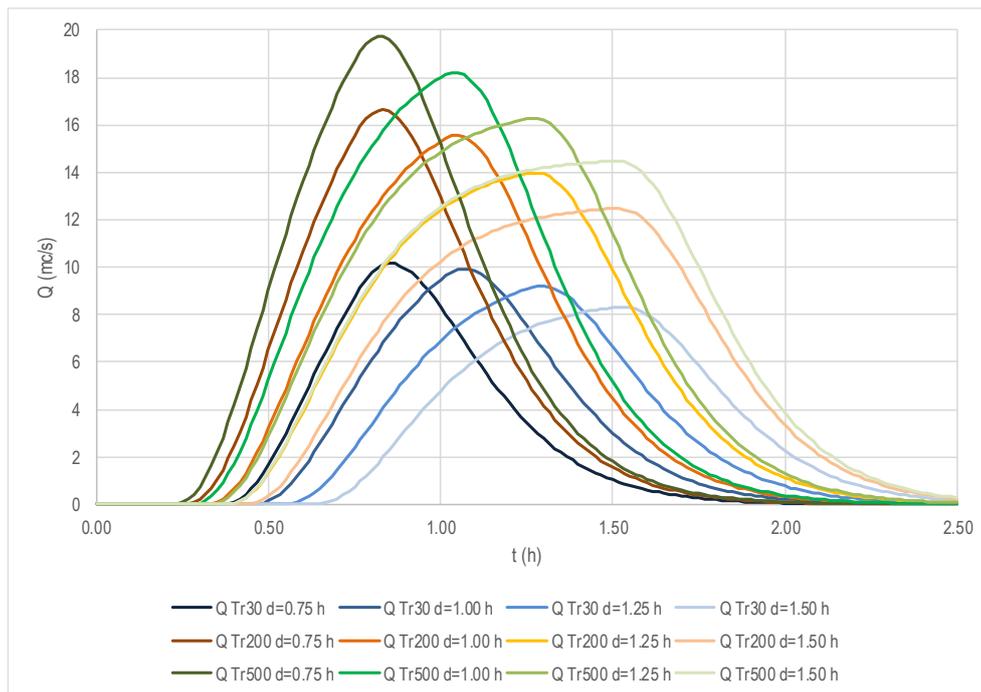


Figura 4-1: Idrogrammi di piena al variare del tempo di ritorno e della durata dell'evento meteorico (m^3/s)

Tr	d=0.75 h	d=1.00 h	d=1.25 h	d=1.50 h
30	10.15	9.92	9.19	8.32
200	16.64	15.55	13.98	12.47
500	19.73	18.21	16.28	14.48

Tabella 4-7: Portate al colmo (m^3/s)

5. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO

L'implementazione della modellistica idraulica è stata effettuata con il software *HEC-RAS 5.0.2 (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System)*, prodotto e reso disponibile gratuitamente dall'*USACE (United States Army Corps of Engineering)*. Il codice di calcolo permette la simulazione accoppiata mono-bidimensionale. La risoluzione dello schema di moto viene ottenuta per via numerica, discretizzando le equazioni nel dominio spazio-temporale mediante opportuni schemi numerici. La soluzione viene pertanto ottenuta solo nei punti di discretizzazione (e non con continuità su tutto il dominio). Tali punti sono rappresentati dalle sezioni trasversali (discretizzazione spaziale) e dalla scansione temporale utilizzata nella rappresentazione dei fenomeni (discretizzazione temporale).

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

Il modello idraulico implementato si estende dalla località i Mandorli fino alla confluenza con il Fiume Arno, nell'abitato di Sieci, per un totale di circa 950 m di corso d'acqua studiato, il quale è stato schematizzato da 46 sezioni fluviali, costruite a partire dal rilievo topografico. In *Tavola 3 – Planimetria del Modello Idraulico* sono riportate le tracce delle sezioni fluviali ed il modello digitale del terreno.

5.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEI CORSI D'ACQUA E DELL'AREA DI STUDIO

La caratterizzazione geometrica del corso d'acqua studiato è stata ricavata a partire dal rilievo topografico eseguito dagli scriventi. Le sezioni fluviali sono individuate attraverso un codice alfanumerico che contiene al proprio interno le seguenti informazioni:

(Esempio: sezione 01542PB03)

- 5 caratteri (Esempio: 01542) identificativo del codice della sezione, in questo caso è la 1542
- 2 caratteri (Esempio: PB) identificativo delle opere idrauliche; se non presenti si utilizzano i caratteri: __
- 2 caratteri (Esempio: 03) identificativo dell'anno del rilievo topografico

Di seguito si riportano le codifiche delle sezioni fluviali utilizzate nel modello numerico, comprensive di, distanza dalla foce e coordinate dei pilastri delle stesse.

Legenda:

- SEZIONE: lista delle sezioni codificate
- RIVER: nome del corso d'acqua
- COORD: sistema di coordinate
- DP_FOCE: distanze progressive delle sezioni dalla foce
- SX_E: coordinata Est del pilastro sinistro
- SX_N: coordinata Nord del pilastro sinistro
- DX_E: coordinata Est del pilastro destro
- DX_N: coordinata Nord del pilastro destro

SEZIONE	RIVER	COORD	DP_FOCE	SX_E	SX_N	DX_E	DX_N
00098__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	949.48	1693409.0	4851421.3	1693381.2	4851429.0
00097__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	941.45	1693400.3	4851415.4	1693380.9	4851420.8
00096PB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	935.31	1693397.7	4851416.1	1693383.3	4851407.7
00096PC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	926.74	1693394.5	4851407.9	1693386.0	4851402.9
00095BB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	923.29	1693391.8	4851397.6	1693377.6	4851404.9
00095BC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	920.01	1693392.4	4851393.6	1693374.0	4851403.1
00095BD16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	919.60	1693390.2	4851394.3	1693373.8	4851402.7
00093__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	915.83	1693385.9	4851389.4	1693374.3	4851403.4
00092__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	912.18	1693380.3	4851388.6	1693373.5	4851402.8
00091__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	907.10	1693376.9	4851385.9	1693368.6	4851398.2
00090__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	899.08	1693371.4	4851381.5	1693361.8	4851392.1
00088BB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	877.36	1693356.6	4851365.4	1693345.7	4851377.5
00088BC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	876.86	1693356.2	4851365.1	1693345.3	4851377.2
00086BB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	859.45	1693343.5	4851353.0	1693332.3	4851365.8
00086BC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	858.95	1693343.1	4851352.7	1693331.9	4851365.5
00083BB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	825.33	1693318.5	4851330.3	1693306.4	4851343.1
00083BC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	824.83	1693318.2	4851330.0	1693306.0	4851342.8
00077PB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	778.43	1693281.1	4851304.2	1693265.9	4851313.4
00077PC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	773.40	1693278.6	4851300.1	1693263.4	4851309.3
00076BB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	769.16	1693271.0	4851298.7	1693262.6	4851308.5
00076BC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	766.70	1693269.1	4851297.3	1693260.8	4851306.9
00075__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	751.23	1693257.1	4851287.5	1693250.1	4851295.6
00074__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	737.27	1693246.3	4851278.4	1693238.5	4851288.3
00066PB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	724.88	1693236.4	4851270.2	1693226.8	4851287.3
00066PC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	660.33	1693178.3	4851241.3	1693172.8	4851255.7
00065MM16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	654.01	1693173.3	4851237.5	1693169.1	4851246.2
00065MV16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	653.51	1693172.9	4851237.2	1693168.7	4851246.0
00064__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	637.26	1693164.9	4851216.9	1693153.9	4851239.2
00059PB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	592.70	1693140.4	4851195.2	1693112.5	4851217.5
00059PC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	588.36	1693116.1	4851209.5	1693108.6	4851215.5
00058__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	577.85	1693103.5	4851206.9	1693099.5	4851217.2
00056BB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	562.90	1693089.7	4851201.1	1693085.5	4851211.8
00056BC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	562.40	1693089.3	4851201.0	1693085.1	4851211.6
00056BD16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	561.87	1693088.9	4851200.5	1693084.6	4851211.4
00055__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	551.02	1693078.3	4851197.8	1693076.3	4851204.2
00054BB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	536.34	1693064.0	4851194.3	1693062.1	4851200.5
00054BC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	535.84	1693063.5	4851194.2	1693061.6	4851200.4
00053MM16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	530.42	1693058.3	4851192.9	1693056.4	4851198.9
00053MV16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	530.04	1693057.8	4851193.1	1693056.0	4851198.8
00052__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	517.92	1693046.2	4851189.7	1693043.8	4851197.1
00050__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	501.56	1693030.6	4851184.7	1693028.3	4851192.0
00048PB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	489.81	1693021.6	4851179.1	1693016.4	4851183.7
00048PC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	478.52	1693009.6	4851177.0	1693007.9	4851178.5
00047PB16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	463.94	1692995.9	4851170.6	1692992.0	4851178.1
00001PC16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	5.89	1692561.7	4851156.6	1692558.5	4851169.7
00000__16	Borro dello Stracchino	Gauss-Boaga > Roma 40	0.72	1692555.9	4851158.9	1692554.3	4851165.3

Tabella 5-1: Sezioni implementate nel modello idraulico

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 per l'accoppiamento del modello monodimensionale a quello bidimensionale.

La caratterizzazione delle aree limitrofe al corso d'acqua, potenzialmente allagabili, è schematizzata attraverso un modello bidimensionale, per la cui caratterizzazione geometrica è stato utilizzato un modello digitale del terreno determinato a partire dai seguenti elementi:

- Rilievo Lidar della Regione Toscana;
- Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:2000;
- Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:10000;
- Rilievo topografico.

Il modello digitale del terreno è stato costruito con una risoluzione spaziale delle celle di 1x1 metri, successivamente ricampionato, nell'ambito della simulazione idraulica, con celle di dimensioni 2 x 2 metri.

La discretizzazione spaziale a 2 metri consente in ogni caso di mantenere inalterate le informazioni spaziali principali; sono infatti leggibili, cambi morfologici, rilevati stradali e ferroviari. I collegamenti idraulici che caratterizzano localmente il deflusso delle acque esondate sono rappresentati da due attraversamenti alla linea ferroviaria i quali sono stati implementati all'interno del modello bidimensionale con modifiche alle celle di riferimento del Modello digitale.

5.2 CONDIZIONI AL CONTORNO E PARAMETRI DEL MODELLO IDRAULICO

Le condizioni al contorno del modello idraulico sono rappresentate da:

- Sollecitazioni idrologiche in testa al tratto simulato idraulicamente (vedi Figura 4-1);
- Livello idraulico nella sezione di chiusura del modello (confluenza con il Fiume Arno);

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 il coefficiente di scabrezza, secondo Manning, più appropriato. In Tabella 5-2 si riporta un riepilogo dei coefficienti utilizzati:

Sezione	Manning (s/m ^{1/3})	Sezione	Manning (s/m ^{1/3})
00098__16	0.03	00066PB16	0.03
00097__16	0.03	00066PC16	0.025
00096PB16	0.04	00065MM16	0.025
00096PC16	0.04	00065MV16	0.025
00095BB16	0.04	00064__16	0.033
00095BC16	0.04	00059PB16	0.033
00095BD16	0.03	00059PC16	0.033
00093__16	0.03	00058__16	0.033
00092__16	0.03	00056BB16	0.033
00091__16	0.03	00056BC16	0.033
00090__16	0.03	00056BD16	0.033
00088BB16	0.035	00055__16	0.033
00088BC16	0.035	00054BB16	0.033
00086BB16	0.035	00054BC16	0.033
00086BC16	0.035	00053MM16	0.033
00083BB16	0.035	00053MV16	0.033
00083BC16	0.03	00052__16	0.033
00077PB16	0.03	00050__16	0.033
00077PC16	0.03	00048PB16	0.033
00076BB16	0.03	00048PC16	0.03
00076BC16	0.03	00047PB16	0.03
00075__16	0.03	00001PC16	0.03
00074__16	0.03	00000__16	0.03

Tabella 5-2: Coefficienti di scabrezza secondo Manning

Per quanto riguarda la scabrezza delle aree contermini il corso d'acqua, simulate dal modello bidimensionale, si è scelto di adottare una scabrezza di 0.050 s/m^{1/3}.

In merito alle perdite di carico nelle strutture, i coefficienti utilizzati sono stati ricavati dalla letteratura disponibile. Tali valori, influenzano il modello in corrispondenza degli attraversamenti fluviali, che generano una brusca variazione di sezione. In particolare si è utilizzato un coefficiente di contrazione di 0.1 e un coefficiente di espansione di 0.3.

Per quanto attiene la condizione di valle, trattandosi di un corso d'acqua affluente del Fiume Arno sono state effettuate delle valutazioni sull'interferenza dei livelli di piena del Fiume Arno con i deflussi generati dal Borro dello Stracchino. In questo senso si è quindi studiato una configurazione idraulica nella quale sia l'Arno che il Borro dello Stracchino presentano condizioni di deflusso critiche, che rappresenta una condizione fisicamente non realistica ma che, a vantaggio di sicurezza, permette di capire quanto il rigurgito dell'Arno influisce sul deflusso del corso d'acqua oggetto di studio.

I livelli del Fiume Arno sono stati estrapolati da una scala di deflusso calcolata mediante il software Hec-Ras 4.1.0. e fornita dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno, che in corrispondenza della confluenza del Borro dello Stracchino presenta un livello massimo pari a 76.1 mslm.

Si è verificato che questa configurazione non produce effetti nelle aree interessate dagli ambiti urbanistici oggetti di studio, in quanto il rigurgito del Fiume Arno rimane confinato a valle del rilevato ferroviario.

In Tabella 5-3 sono riportati i confronti sulle principali variabili idrauliche, tra la configurazione idraulica di cui sopra e la configurazione di deflusso critica per il Borro dello Stracchino. I risultati mostrati indicano che il rigurgito del Fiume Arno produce degli effetti che però non si ripercuotono a monte della sezione 00047PB16. L'effetto mostrato in tabella si riscontra anche per portate trentennali e per durate diverse.

Si deciso quindi di utilizzare una condizione di valle pari a 74,00 mslm, che rappresenta una condizione di piena del fiume Arno che comporta il pieno rigurgito della sezione di valle del Borro dello stracchino (sezione scatolare con intradosso a quota 73.3)

SEZIONE	ΔQ Total (m ³ /s)	$\Delta W.S.$ Elev (m)	$\Delta E.G.$ Elev (m)	$\Delta E.G.$ Slope (m/m)	ΔVel Chnl (m/s)	$\Delta Flow Area$ (m ²)	$\Delta Froude \# Chl$
00098__16	0	0	0	0	0	0	0
00097__16	0	0	0	0	0	0	0
00096PB16	0	0	0	0	0	0	0
00096PC16	0	0	0	0	0	0	0
00095BB16	0	0	0	0	0	0	0
00095BC16	0	0	0	0	0	0	0
00095BD16	0	0	0	0	0	0	0
00093__16	0	0	0	0	0	0	0
00092__16	0	0	0	0	0	0	0
00091__16	0	0	0	0	0	0	0
00090__16	0	0	0	0	0	0	0
00088BB16	0	0	0	0	0	0	0
00088BC16	0	0	0	0	0	0	0
00086BB16	0	0	0	0	0	0	0
00086BC16	0	0	0	0	0	0	0
00083BB16	0	0	0	0	0	0	0
00083BC16	0	0	0	0	0	0	0
00077PB16	0	0	0	0	0	0	0
00077PC16	0	0	0	0	0	0	0
00076BB16	0	0	0	0	0	0	0
00076BC16	0	0	0	0	0	0	0
00075__16	0	0	0	0	0	0	0
00074__16	0	0	0	0	0	0	0
00066PB16	0	0	0	0	0	0	0
00066PC16	0	0	0	0	0	0	0
00065MM16	0	0	0	0	0	0	0
00065MV16	0	0	0	0	0	0	0
00064__16	0	0	0	0	0	0	0
00059PB16	0	0	0	0	0	0	0
00059PC16	0	0	0	0	0	0	0
00058__16	0	0	0	0	0	0	0
00056BB16	0	0	0	0	0	0	0
00056BC16	0	0	0	0	0	0	0
00056BD16	0	0	0	0	0	0	0
00055__16	0	0	0	0	0	0	0
00054BB16	0	0	0	0	0	0	0
00054BC16	0	0	0	0	0	0	0
00053MM16	0	0	0	0	0	0	0
00053MV16	0	0	0	0	0	0	0
00052__16	0	0	0	0	0	0	0
00050__16	0	0	0	0	0	0	0
00048PB16	0	0	0	0	0	0	0
00048PC16	0	0	0	0	0	0	0
00047PB16	0	0	0	0	0	0	0
00001PC16	0	2.1	2.09	-0.000057	-0.13	6.24	-0.04
00000__16	0	2.1	2.1	-0.000002	-0.03	7.54	-0.01

Tabella 5-3: Differenze sulle principali variabili idrauliche tra configurazione con interazione Arno e senza interazione.

5.3 ANALISI DEI RISULTATI

Le analisi idrauliche hanno evidenziato le seguenti criticità:

- Rigurgito generato dal ponte tra le sezioni 00096PB16 e 00096PC16: le esondazioni in destra idraulica vanno ad interessare la sede stradale (via dello Stracchino) e il deflusso seppur con portate non troppo elevate va ad interessare anche l'area più a valle, a monte della vasca di sedimentazione;
- Rigurgito generato dal ponte tra le sezioni 00077PB16 e 00077PC16 che crea a monte dello stesso un innalzamento dei livelli, provocando esondazioni sia in destra che in sinistra idraulica;
- Esondazioni diffuse comprese nel tratto fluviale tra la sezione 00059PB16 e la sezione 00054BC16, tratto caratterizzato da un ponte insufficiente, dall'interruzione del muro di contenimento della vasca di sedimentazione e da una serie di briglie che producono un innalzamento del livello idraulico tale da generare esondazioni sia in sinistra che in destra idraulica.

In linea generale le esondazioni sono più contenute in destra idraulica in quanto le opere di contenimento, sono generalmente poste a quote superiori rispetto alla sinistra idraulica. Considerando che i volumi esondati sono comunque moderati, e considerando la morfologia del territorio adiacente al corso d'acqua, i battenti che si generano, nelle aree di interesse, risultano essere per la maggior parte inferiori a 50 cm, trattandosi per lo più di volumi di transito e non di ristagno.

Le acque esondate vanno poi ad interessare l'abitato di Sieci collegato idraulicamente dai due sottopassi del rilevato ferroviario.

In Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3 sono mostrate le carta dei battenti per TR30, 200 e 500 anni.

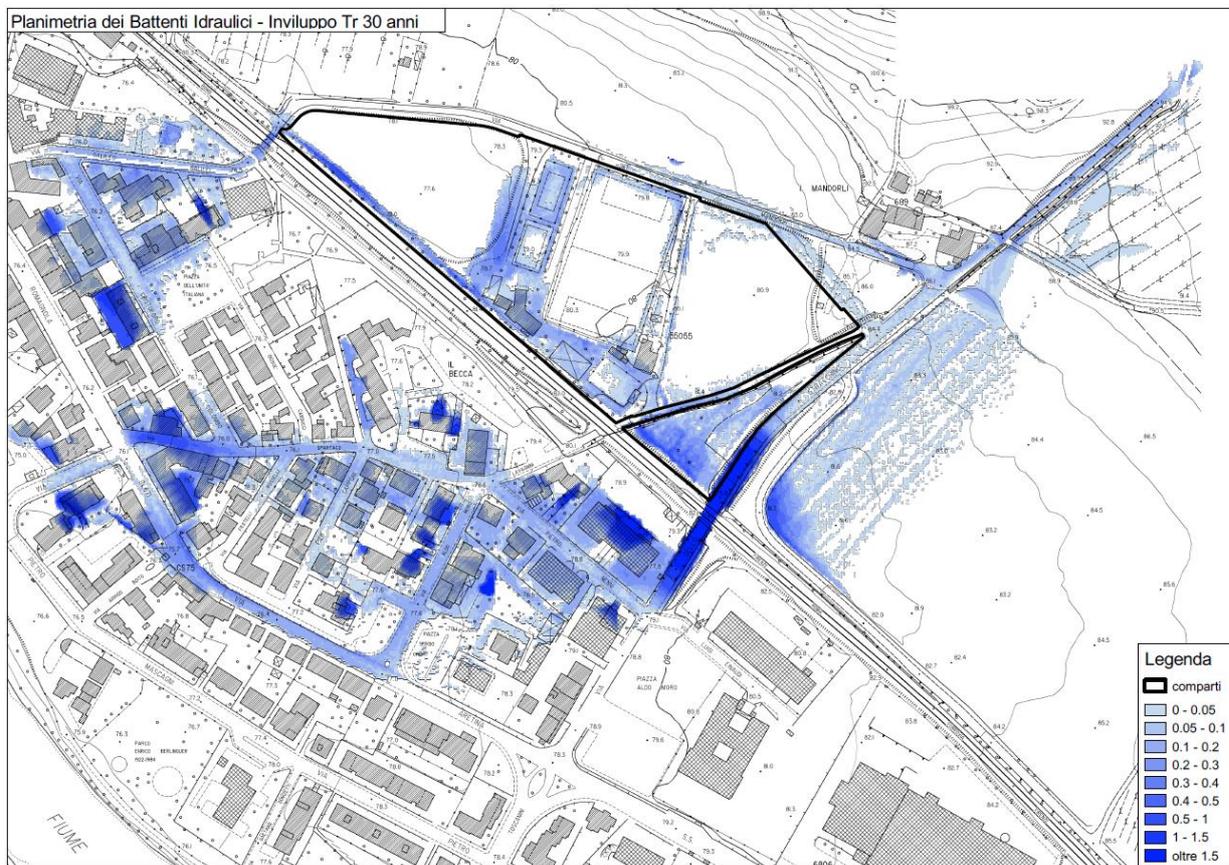


Figura 5-1: Inviluppo dei battenti idraulici TR 30 anni

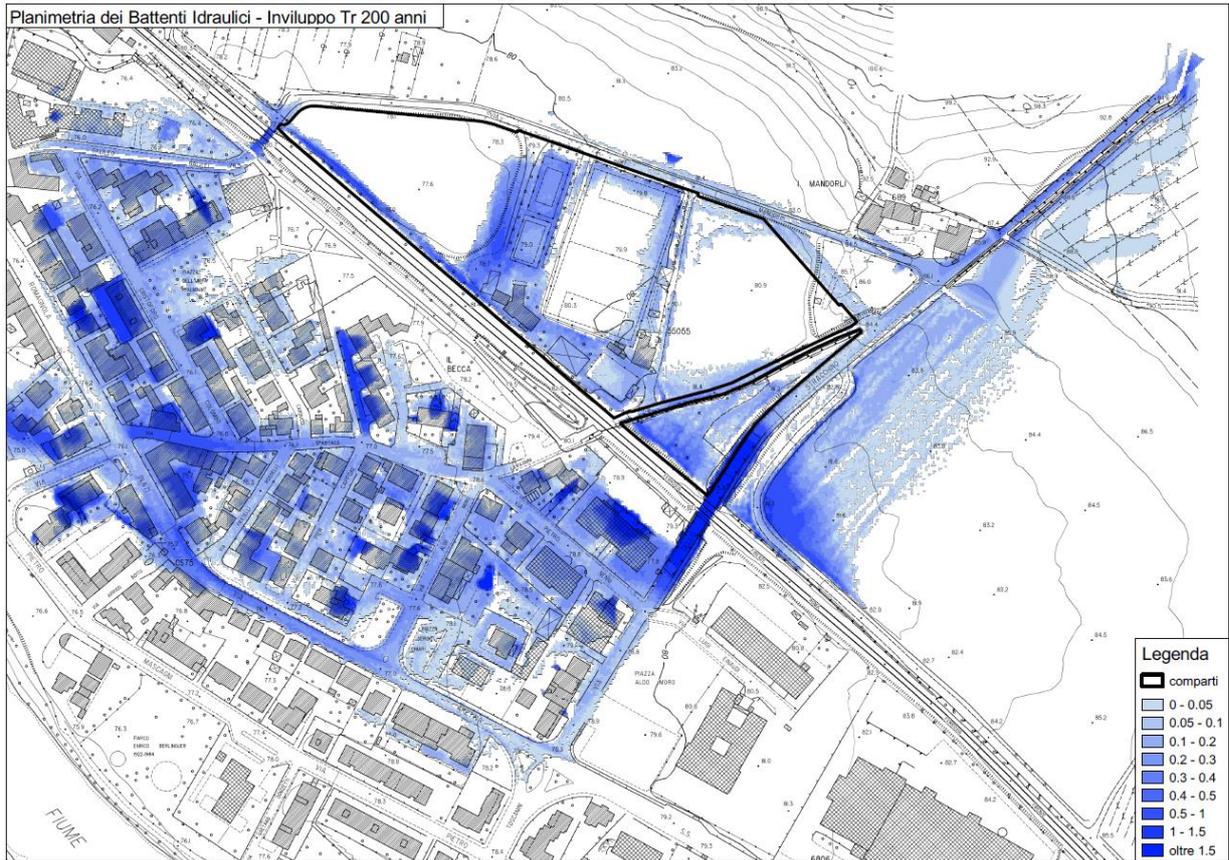


Figura 5-2: Inviluppo dei battenti idraulici TR 200 anni

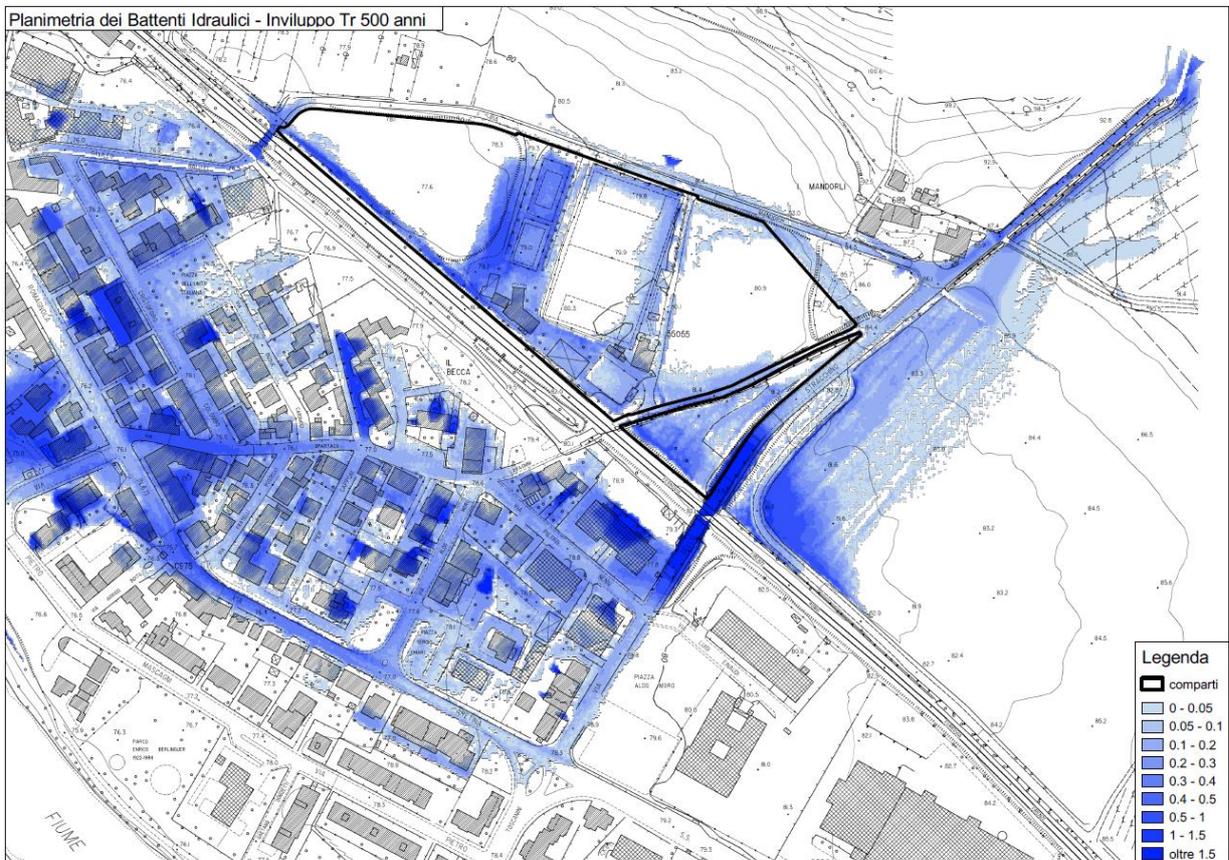


Figura 5-3: Inviluppo dei battenti idraulici TR 500 anni

Per ogni tempo di ritorno sono stati inviluppati i massimi livelli in alveo e i battenti nelle aree allagate. Con questa impostazione si restituiscono:

- Sezioni fluviali con livelli idrometrici;
- Profilo longitudinali con livelli idrometrici;
- Tavole dei battenti idraulici;

I risultati della modellistica monodimensionale in alveo sono riportati in Appendice B – Risultati della modellistica idraulica.

Sono quindi restituite le seguenti tavole:

Tavola 4 - Libretto Sezioni con Livelli Idrometrici Tr 30 - 200 - 500 anni

Tavola 5 - Profilo Longitudinale con Livelli Idrometrici Tr 30 - 200 - 500 anni

Tavola 6 - Planimetria dei Battenti idraulici - Inviluppo Tr 30 anni

Tavola 7 - Planimetria dei Battenti idraulici - Inviluppo Tr 200 anni

Tavola 8 - Planimetria dei Battenti idraulici - Inviluppo Tr 500 anni

6. PERICOLOSITÀ IDRAULICA

A valle dell'implementazione del modello integrato idrologico-idraulico si è arrivati alla definizione delle aree a pericolosità idraulica, su tutta l'area studiata e in particolare nei comparti urbanistici d'interesse, ai sensi del DPGR 53R/2011, che definisce le probabilità di esondazione come segue:

- **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;
- **Aree a pericolosità media (I2)**, caratterizzate da eventi alluvionali con tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni;
- **Aree a pericolosità bassa (I1)**, aree collinari o montane.

L'implementazione della modellistica idraulica fornisce, per gli eventi considerati, i valori di massimo livello e portata in alveo per ciascuna sezione del corso d'acqua analizzato, e di battenti idraulici nelle aree soggette ad allagamenti.

L'inviluppo dei battenti su ciascun tempo di ritorno ha quindi permesso la definizione della pericolosità idraulica ai sensi del D.P.G.R. 53R/2011, riportate alle seguenti tavole:

Tavola 9 - Planimetria della Pericolosità idraulica ai sensi del 53/R – Comparti Urbanistici

Tavola 10 - Planimetria della Pericolosità idraulica ai sensi del 53/R

7. FATTIBILITÀ

Le condizioni di attuazione delle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali possono essere differenziate secondo le seguenti categorie di fattibilità:

- **Fattibilità senza particolari limitazioni (F1):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali non sono necessarie prescrizioni specifiche ai fini della valida formazione del titolo abilitativo all'attività edilizia;
- **Fattibilità con normali vincoli (F2):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali è necessario indicare la tipologia di indagini e/o specifiche prescrizioni ai fini della valida formazione del titolo abilitativo all'attività edilizia;
- **Fattibilità condizionata (F3):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali, ai fini della individuazione delle condizioni di compatibilità degli interventi con le situazioni di pericolosità riscontrate, è necessario definire la tipologia degli approfondimenti di indagine da svolgersi in sede di predisposizione dei piani complessivi di intervento o dei piani attuativi o, in loro assenza, in sede di predisposizione dei progetti edilizi;
- **Fattibilità limitata (F4):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali la cui attuazione è subordinata alla realizzazione di interventi di messa in sicurezza che vanno individuati e definiti in sede di redazione del medesimo regolamento urbanistico, sulla base di studi, dati da attività di monitoraggio e verifiche atte a determinare gli elementi di base utili per la predisposizione della relativa progettazione.

Dall'analisi dei risultati, allo stato attuale, i comparti S3a – Polisportiva e S3b – Fosso dello Stracchino risultano caratterizzati da aree a pericolosità idraulica molto elevata, elevata, media ed aree che non risultano essere perimetrate.

Si attribuisce comunque un'unica classe di fattibilità: **Fattibilità condizionata (F3)**.

Le previsioni urbanistiche individuano quali trasformazioni ammissibili le trasformazioni finalizzate alla realizzazione di un nuovo parco attrezzato con strutture sportive, ricreative e culturali. L'intervento dovrà farsi carico della riqualificazione dell'area anche attraverso la creazione di un sistema del verde e dei percorsi pedonali e ciclabili che metta in relazione detta area con il resto del sistema insediativo.

La progettazione degli interventi dovrà essere supportata da una relazione di fattibilità idraulica che, partendo dai livelli di pericolosità accertati nel presente studio, individui i condizionamenti per l'attuazione degli interventi di trasformazione del territorio, secondo i criteri riportati nelle seguenti normative o, se diverse, nelle normative che regoleranno la fattibilità delle previsioni urbanistiche vigenti al momento della presentazione del progetto stesso:

- LR 21 maggio 2012, n. 21 e successive modifiche ed integrazioni;
- DPGR 25 ottobre 2011, n. 53/R e successive modifiche ed integrazioni, come specificato nell'Allegato A, ai capitoli "3.2.2.1 - Situazioni caratterizzate da pericolosità idraulica molto elevata", "3.2.2.2 - Situazioni caratterizzate da pericolosità idraulica elevata" e "3.2.2.3 - Situazioni caratterizzate da pericolosità idraulica media e bassa".

In merito alle aree a pericolosità idraulica molto elevata, la normativa vigente stabilisce che sono realizzabili interventi di ampliamento e adeguamento di opere pubbliche, previa messa in sicurezza idraulica su tempi di ritorno duecentennali e non aggravio del rischio nelle aree limitrofe.

Nel caso in cui si debba procedere alla contestuale o preventiva realizzazione di interventi atti a garantire il non aggravio del rischio idraulico in aree limitrofe, dovuti alla sottrazione di volumetrie alla libera espansione delle acque di esondazione, o alla modifica della dinamica di allagamento delle aree di interesse e limitrofe, si dovranno prevedere in via prioritaria opere di stoccaggio temporaneo dei volumi sottratti alla libera espansione delle acque, nell'area afferente al comparto S3b; le suddette opere dovranno garantire quantomeno l'invarianza idraulica nel contesto circostante sia in termini di volumi esondati che di battenti idrometrici attesi.

Nel caso in cui si debba procedere ad un mero recupero dei volumi sottratti all'esondazione, si dovrà procedere in primo luogo ad una corretta stima degli stessi attraverso i seguenti passaggi:

- Individuare nelle carte dei battenti idraulici attesi per eventi con tempo di ritorno pari a 200 anni, gli areali oggetto di trasformazione;
- Calcolare i volumi sottratti alla libera esondazione delle acque come moltiplicazione del battente medio atteso per la superficie delle trasformazioni che occupano aree a pericolosità idraulica.

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 valutare le altezze di pioggia.

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 $t = T_r$ (durata dell'evento meteorico). È possibile quindi trovare l'altezza di pioggia in ogni cella tramite la relazione:

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

con: h = altezza di pioggia [mm]; t = durata dell'evento meteorico [ore], a e n parametri caratteristici.

La stima dell'altezza di pioggia con l'equazione 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

La determinazione degli idrogrammi di piena è stata effettuata secondo lo schema e la procedura che comunemente veniva utilizzata dalla *Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana*. **Nel caso specifico del presente studio, tutti i parametri necessari alla determinazione e formazione dell'onda di piena sono stati ricalcolati.**

Tale procedura parte dalla teoria dell'*Idrogramma Istantaneo Unitario* (*Instantaneous Unit Hydrograph, IUH*) dove i parametri in gioco sono 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. Tale ietogramma consente la determinazione della portata al colmo di assegnato tempo di ritorno e durata dell'evento.

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).

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

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

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].

In particolare per la stima del coefficiente I_a si è utilizzata la formula $I_a = 3.3 + 22S_b$

In cui S_b rappresenta la percentuale di superficie boscata presente sul bacino considerato.

Per quanto riguarda invece il valore del coefficiente K_s adottato, nella tabella seguente si riportano i valori dello stesso in funzione della classe geolitologica.

CODICE	DESCRIZIONE	KS [mm/h]
aC	("arenarie di Monte Cervarola"); arenarie turbiditiche quarzoso-feldspatiche a grana fine, in strati sottili; talora lenti di selci (sel) Aquitaniano-Langhiano superiore	1.55
alb	("alberese" e "formazione di Lanciata") calcari a grana fine grigio chiari, calcari marnosi scuri e arenarie calcaree gradate Paleocene-Eocene medio	4.65
all	alluvioni recenti e attuali Olocene	0
aS	("arenaria di Monte Senario") arenarie quarzoso-feldspatiche tipo "macigno", ma in generale più grossolane e contenenti ciottoli di quarzo, micascisti, filladi, calcari Paleogene	1.55
at	alluvioni terrazzate; ove distinte at1, at2, at3 Pleist. sup.	0
bn	(breccie nummulitiche) breccie poligeniche e calcareniti da torbide Paleogene	4.65
bw	conglomerati e arenarie di materiale ofiolitico alla base di cb.Paleocene-Eocene medio	0.775
cb	argille e marne con calcari, calcari marnosi, arenarie e calcareniti intercalate talora brecce sedimentarie costituite da rocce verdi, diaspri e calcari litografici	1.55
dt	detriti	2.325
fh	("formazione marno-siltose = flysch ad Elmintoidi"): calcari marnosi scuri, marne e arenarie calcaree Cretaceo superiore	4.65
fP1	("argilliti di Fiumalbo -marne di Le Piastre") argilliti varicolori, siltiti e marne grigie Oligocene superiore	0
fPaC	intervalli frequenti o potenti di marne siltose e siltiti in aC Aquitaniano-Langhiano superiore	0
fVc	(formazione di Vallina formazione di Sillano) argilloscisti variegati, calcari marnosi verdastri o grigi, calcareniti minute e arenarie calcarifere Cret. sup.-Eocene inf.	4.65
fVR	(formazione di Villa a Radda) argilloscisti talora siltosi, prevalentemente rossi, con pochi strati calcari marnosi verdastri o arenarie calcarifere, intercalati nella parte alta di pf o al tetto di questa Cretaceo sup.-Eocene inf.	0
mg	argille con lenti di gesso e di salgemma Messiniano sup.	0
Nu	calcareniti e calciruditi grigie, gradate Eocene	4.65
ol	a luoghi intercalazioni di materiale ligure in aC (olistostromi) Aquitaniano-Langhiano superiore	1.55
Pag	argille azzurre e cinerine Plioc. inf.-medio	0
pb	("argille a palombini") argilliti e marne fogliettate con intercalazioni di calcari a palombini Cretaceo inf.	0
Pcg	conglomerati e ghiaie prevalentemente argillose, con sabbie e sabbie argillose (al tetto e laterale di Ps) Plioc. inf.-medio	0.775
pf	("pietraforte") arenarie calcaree alternate ad argilliti subordinatamente livelli di marne varietà ofiolitifera Cretaceo superiore-Eocene inf.	1.55
Ps	sabbie gialle, arenarie Pliocene inf.-medio	1.55
sc	("scaglia toscana") argilliti rosse e varicolori con intercalazioni di calcari silicei grigi, marne rosse e calcareniti; al tetto marne siltose grigie, subordinatamente varicolori; Cretaceo inf. p.p.-Oligocene	0
Vs	("sabbie del Tasso") sabbie con lenti di ciottoli e sabbie argillose Pleist. inf.	2.325
VVB	("formazione di Villa Babbiani") sabbie con tasche e lenti di ciottoli di "macigno" Pleist. inf.	2.325

Tabella 1: Valori Ks utilizzati nel presente studio

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:

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

dove t è la durata dell'evento, A è l'area del bacino sotteso e α , β , γ sono parametri dipendenti dal bacino considerato.

Il parametro α della formula sopra riportata dipende dal coefficiente a' della curva di possibilità pluviometrica a tre parametri. Poiché le curve delle nuove LSPP sono rappresentate con la formula a due parametri nella formulazione $h(t) = a t^n$, al fine di determinare il corrispettivo valore di a' da utilizzare nella stima del coefficiente di ragguaglio, si è operato come segue:

- dalle nuove LSPP sono stati calcolati per ogni "Tr" e per ogni durata "D" l'altezza di pioggia "h";
- dalla formula a 3 parametri $h = a' \cdot t^{n'} \cdot Tr^{m'}$ in campo logaritmico si ottiene $\log(h) = \log(a') + n' \cdot \log(t) + m' \cdot \log(Tr)$;
- tramite regressione lineare, sulle altezze di pioggia h , funzione della durata e del tempo di ritorno, si ottengono i parametri a' , m' ed n' della formula a 3 parametri.

Il coefficiente a' così calcolato è stato utilizzato per la determinazione del coefficiente di ragguaglio "Kr".

L'Idrogramma Istantaneo Unitario 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

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

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 $n \cdot k$ (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

ω 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 $u=1, 2, 3, \dots$

A.2 MODELLISTICA IDRAULICA

Il modello idraulico è stato sviluppato attraverso il software HEC-RAS 5.0.2, brevemente descritto nei paragrafi seguenti.

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 [m²];
- Q = portata [m³/s];
- $q_L(x)$ = portata laterale (positiva se entrante) [m²/s];
- $H = z+h$ è la quota del pelo libero (z quota del fondo e h battente idraulico) [m];
- g = accelerazione di gravità [m/s²];
- 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 ed n rappresenta 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.

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

A.2.2 MODELLISTICA 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 e 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 << 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 le componenti 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 2.

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 ω la velocità angolare della terra e φ 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 2: 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 1a) 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 1b, c).

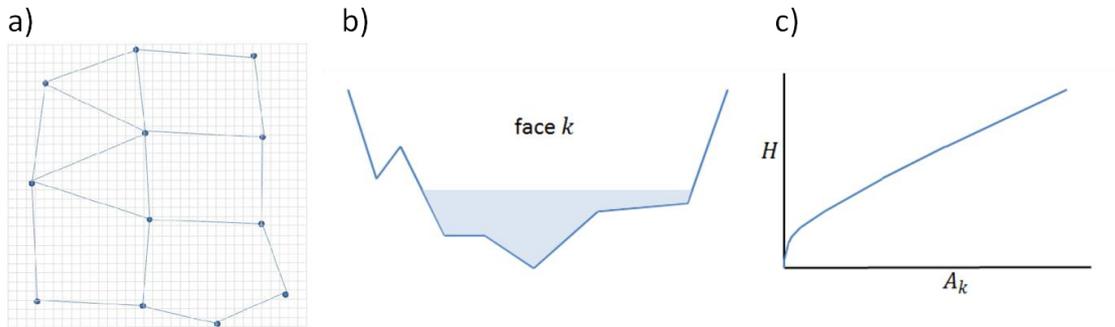


Figura 1: a) Esempio di "sotto-griglia". b) Area bagnata associata ad una faccia della cella di calcolo k. c) Curva di invaso associata ad una cella di calcolo k.

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 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 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 presenza di aree 2D e celle di accumulo, queste vengono messe in comunicazione da "2D/SA connection", anch'essi oggetti che simulano il funzionamento idraulico di uno stramazzo.

APPENDICE B: RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDRAULICA

Legenda:

- Sezione: codifica delle sezioni implementate nel modello idraulico;
- Q total: portata al colmo;
- W.S.Elev: livello idrometrico;
- E.G. Elev: livello della linea dell'energia;
- Vel Chnl: velocità media del flusso;
- Froude # Chl: numero di Froude.

TR30 d=0.75 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	10.15	96.55	97.32	3.9	1.17
00097__16	9.48	96.32	97.10	3.9	1.06
00096PB16	9.55	96.17	96.55	2.7	0.67
00096PC16	9.55	93.70	95.73	6.3	2.44
00095BB16	9.55	93.04	95.61	7.1	3.59
00095BC16	9.55	92.04	93.32	5.0	2.55
00095BD16	9.55	92.00	92.38	2.7	1.05
00093__16	9.55	91.97	92.14	1.8	0.64
00092__16	9.60	91.93	92.33	2.8	1.05
00091__16	9.61	91.83	92.45	3.5	1.38
00090__16	9.61	91.69	92.02	2.5	0.73
00088BB16	9.40	91.54	91.76	2.1	0.56
00088BC16	9.40	90.88	91.22	2.6	0.76
00086BB16	9.17	90.72	90.94	2.1	0.56
00086BC16	9.17	89.41	89.90	3.1	0.95
00083BB16	9.30	88.98	89.19	2.0	0.57
00083BC16	9.24	88.08	88.87	3.9	1.36
00077PB16	8.95	87.58	87.72	1.7	0.40
00077PC16	9.28	86.97	87.32	2.6	0.76
00076BB16	9.41	86.90	87.46	3.3	0.93
00076BC16	9.37	85.81	86.14	2.5	0.62
00075__16	9.37	85.63	86.00	2.7	0.71
00074__16	9.37	85.45	85.90	3.0	0.80
00066PB16	9.37	85.24	85.78	3.3	0.91
00066PC16	9.37	83.21	83.78	3.4	0.91
00065MM16	9.36	83.12	83.67	3.3	0.90
00065MV16	9.36	83.11	83.68	3.3	0.91
00064__16	9.36	83.16	83.20	1.0	0.24
00059PB16	7.01	83.13	83.21	1.3	0.27
00059PC16	7.01	82.21	82.57	2.7	0.74
00058__16	6.99	82.05	82.38	2.5	0.73
00056BB16	5.68	81.95	82.18	2.1	0.58
00056BC16	5.68	81.51	81.76	2.2	0.60
00056BD16	5.68	81.59	81.72	1.6	0.39
00055__16	5.65	81.46	81.66	2.0	0.59
00054BB16	4.66	81.38	81.56	1.9	0.57
00054BC16	4.66	80.62	80.77	1.7	0.48
00053MM16	4.66	80.58	80.74	1.8	0.51
00053MV16	4.66	80.46	80.70	2.2	0.63
00052__16	4.66	80.22	80.66	2.9	0.96
00050__16	4.66	79.83	80.18	2.7	0.85
00048PB16	4.66	79.67	79.82	1.7	0.49
00048PC16	4.66	79.40	79.64	2.2	0.70
00047PB16	4.66	79.14	79.62	3.1	0.98
00001PC16	1.51	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

TR30 d=1.00 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	9.92	96.54	97.29	3.8	1.17
00097__16	9.34	96.30	97.08	3.9	1.07
00096PB16	9.46	96.15	96.53	2.7	0.67
00096PC16	9.46	93.70	95.71	6.3	2.44
00095BB16	9.46	93.04	95.59	7.1	3.59
00095BC16	9.45	92.03	93.32	5.0	2.58
00095BD16	9.45	92.00	92.37	2.7	1.05
00093__16	9.46	91.96	92.13	1.8	0.64
00092__16	9.49	91.93	92.32	2.8	1.05
00091__16	9.50	91.82	92.44	3.5	1.39
00090__16	9.50	91.68	92.00	2.5	0.73
00088BB16	9.30	91.53	91.75	2.1	0.56
00088BC16	9.30	90.87	91.21	2.6	0.76
00086BB16	9.09	90.71	90.93	2.1	0.56
00086BC16	9.09	89.40	89.89	3.1	0.95
00083BB16	9.21	88.97	89.18	2.0	0.57
00083BC16	9.21	88.08	88.87	3.9	1.36
00077PB16	8.95	87.58	87.72	1.7	0.40
00077PC16	8.95	86.93	87.28	2.6	0.76
00076BB16	9.09	86.86	87.42	3.3	0.94
00076BC16	9.09	85.78	86.10	2.5	0.62
00075__16	9.09	85.60	85.97	2.7	0.71
00074__16	9.09	85.42	85.86	2.9	0.80
00066PB16	9.09	85.21	85.74	3.2	0.91
00066PC16	9.09	83.17	83.74	3.3	0.93
00065MM16	9.09	83.08	83.63	3.3	0.91
00065MV16	9.09	83.07	83.64	3.3	0.92
00064__16	9.09	83.11	83.16	1.0	0.24
00059PB16	6.87	83.08	83.16	1.3	0.27
00059PC16	6.87	82.19	82.55	2.7	0.74
00058__16	6.85	82.04	82.36	2.5	0.73
00056BB16	5.63	81.95	82.17	2.1	0.58
00056BC16	5.63	81.51	81.75	2.2	0.59
00056BD16	5.63	81.59	81.71	1.6	0.39
00055__16	5.59	81.46	81.66	2.0	0.59
00054BB16	4.63	81.38	81.56	1.9	0.57
00054BC16	4.63	80.62	80.77	1.7	0.48
00053MM16	4.63	80.57	80.73	1.8	0.51
00053MV16	4.63	80.46	80.69	2.2	0.63
00052__16	4.63	80.22	80.65	2.9	0.96
00050__16	4.63	79.82	80.18	2.7	0.85
00048PB16	4.63	79.66	79.81	1.7	0.49
00048PC16	4.63	79.40	79.64	2.2	0.70
00047PB16	4.63	79.14	79.62	3.1	0.98
00001PC16	1.52	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

TR30 d=1.25 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	9.19	96.47	97.20	3.8	1.16
00097__16	8.90	96.22	97.02	3.9	1.11
00096PB16	9.07	96.07	96.46	2.8	0.69
00096PC16	9.07	93.68	95.64	6.2	2.43
00095BB16	9.07	93.03	95.51	7.0	3.59
00095BC16	9.07	92.01	93.34	5.1	2.66
00095BD16	9.07	91.97	92.34	2.7	1.06
00093__16	9.07	91.94	92.10	1.8	0.64
00092__16	9.08	91.90	92.29	2.8	1.06
00091__16	9.08	91.79	92.42	3.5	1.43
00090__16	9.07	91.64	91.96	2.5	0.73
00088BB16	8.94	91.49	91.70	2.1	0.56
00088BC16	8.94	90.84	91.17	2.6	0.76
00086BB16	8.79	90.68	90.89	2.1	0.56
00086BC16	8.79	89.37	89.85	3.1	0.95
00083BB16	8.87	88.93	89.14	2.0	0.57
00083BC16	8.87	88.05	88.83	3.9	1.37
00077PB16	8.73	87.51	87.66	1.7	0.41
00077PC16	8.73	86.90	87.25	2.6	0.77
00076BB16	8.82	86.84	87.38	3.3	0.94
00076BC16	8.82	85.75	86.06	2.5	0.62
00075__16	8.82	85.57	85.93	2.7	0.71
00074__16	8.82	85.39	85.82	2.9	0.80
00066PB16	8.82	85.18	85.71	3.2	0.91
00066PC16	8.82	83.13	83.70	3.3	0.94
00065MM16	8.82	83.04	83.59	3.3	0.92
00065MV16	8.82	83.03	83.60	3.3	0.94
00064__16	8.81	83.07	83.12	1.0	0.25
00059PB16	6.73	83.04	83.12	1.3	0.28
00059PC16	6.73	82.18	82.53	2.6	0.73
00058__16	6.71	82.03	82.34	2.5	0.72
00056BB16	5.57	81.94	82.16	2.1	0.58
00056BC16	5.57	81.50	81.74	2.2	0.59
00056BD16	5.57	81.58	81.70	1.5	0.38
00055__16	5.54	81.45	81.65	2.0	0.59
00054BB16	4.60	81.37	81.55	1.9	0.57
00054BC16	4.60	80.61	80.76	1.7	0.48
00053MM16	4.60	80.57	80.73	1.8	0.51
00053MV16	4.60	80.45	80.69	2.2	0.63
00052__16	4.60	80.21	80.65	2.9	0.96
00050__16	4.60	79.82	80.17	2.6	0.85
00048PB16	4.60	79.66	79.81	1.7	0.49
00048PC16	4.60	79.40	79.63	2.2	0.70
00047PB16	4.60	79.13	79.61	3.1	0.98
00001PC16	1.52	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

TR30 d=1.50 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	8.32	96.36	97.09	3.8	1.15
00097__16	8.28	96.09	96.94	4.1	1.21
00096PB16	8.32	95.92	96.32	2.8	0.74
00096PC16	8.32	93.64	95.49	6.0	2.42
00095BB16	8.32	93.00	95.34	6.8	3.58
00095BC16	8.32	91.97	93.37	5.3	2.82
00095BD16	8.32	91.93	92.29	2.7	1.06
00093__16	8.32	91.89	92.05	1.8	0.63
00092__16	8.32	91.85	92.23	2.7	1.06
00091__16	8.32	91.74	92.37	3.5	1.51
00090__16	8.32	91.57	91.87	2.4	0.74
00088BB16	8.27	91.42	91.62	2.0	0.56
00088BC16	8.27	90.77	91.09	2.5	0.76
00086BB16	8.20	90.61	90.82	2.0	0.56
00086BC16	8.20	89.32	89.78	3.0	0.96
00083BB16	8.22	88.87	89.06	2.0	0.57
00083BC16	8.22	88.00	88.77	3.9	1.40
00077PB16	8.27	87.38	87.54	1.7	0.44
00077PC16	8.27	86.85	87.19	2.6	0.77
00076BB16	8.28	86.79	87.31	3.2	0.94
00076BC16	8.28	85.69	85.98	2.4	0.62
00075__16	8.28	85.51	85.85	2.6	0.70
00074__16	8.28	85.34	85.75	2.9	0.80
00066PB16	8.28	85.13	85.63	3.1	0.91
00066PC16	8.28	83.06	83.62	3.3	0.96
00065MM16	8.28	82.97	83.51	3.3	0.95
00065MV16	8.27	82.96	83.52	3.3	0.96
00064__16	8.27	82.98	83.03	1.0	0.25
00059PB16	6.44	82.95	83.03	1.3	0.28
00059PC16	6.44	82.15	82.49	2.6	0.73
00058__16	6.43	82.02	82.31	2.4	0.70
00056BB16	5.44	81.91	82.13	2.1	0.58
00056BC16	5.44	81.50	81.73	2.1	0.58
00056BD16	5.44	81.57	81.69	1.5	0.38
00055__16	5.42	81.45	81.64	1.9	0.58
00054BB16	4.55	81.36	81.54	1.9	0.57
00054BC16	4.55	80.60	80.75	1.7	0.48
00053MM16	4.55	80.56	80.71	1.8	0.51
00053MV16	4.55	80.44	80.68	2.1	0.63
00052__16	4.55	80.20	80.63	2.9	0.96
00050__16	4.55	79.81	80.16	2.6	0.85
00048PB16	4.55	79.65	79.80	1.7	0.49
00048PC16	4.55	79.39	79.62	2.2	0.70
00047PB16	4.55	79.13	79.60	3.0	0.97
00001PC16	1.52	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

TR200 d=0.75 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	16.64	96.94	98.05	4.7	1.24
00097__16	13.31	96.66	97.65	4.4	1.07
00096PB16	11.16	96.52	96.88	2.6	0.59
00096PC16	11.12	93.78	96.00	6.6	2.44
00095BB16	11.51	93.09	96.02	7.6	3.60
00095BC16	11.85	92.22	93.08	4.1	1.88
00095BD16	11.91	92.20	92.54	2.6	0.93
00093__16	12.25	92.17	92.35	1.9	0.61
00092__16	12.57	92.14	92.54	2.8	0.97
00091__16	12.94	92.06	92.67	3.5	1.17
00090__16	12.92	91.95	92.35	2.8	0.74
00088BB16	12.11	91.80	92.06	2.3	0.56
00088BC16	12.11	91.09	91.49	2.8	0.77
00086BB16	11.33	90.93	91.19	2.2	0.56
00086BC16	11.33	89.64	90.15	3.2	0.89
00083BB16	12.17	89.24	89.49	2.2	0.56
00083BC16	12.17	88.32	89.14	4.0	1.27
00077PB16	11.59	87.89	88.07	1.9	0.41
00077PC16	11.59	87.19	87.58	2.8	0.75
00076BB16	11.98	87.12	87.78	3.6	0.94
00076BC16	11.98	86.11	86.49	2.7	0.62
00075__16	12.12	85.91	86.35	2.9	0.71
00074__16	12.15	85.71	86.25	3.2	0.80
00066PB16	12.15	85.49	86.13	3.6	0.91
00066PC16	12.15	83.46	84.14	3.7	0.92
00065MM16	12.15	83.36	84.04	3.6	0.92
00065MV16	12.15	83.35	84.04	3.7	0.93
00064__16	12.15	83.41	83.47	1.1	0.25
00059PB16	7.86	83.41	83.49	1.3	0.25
00059PC16	7.86	82.28	82.69	2.8	0.77
00058__16	7.81	82.11	82.48	2.7	0.76
00056BB16	6.00	82.01	82.24	2.1	0.58
00056BC16	6.00	81.53	81.80	2.3	0.62
00056BD16	6.00	81.61	81.75	1.6	0.40
00055__16	5.94	81.48	81.69	2.1	0.61
00054BB16	4.80	81.41	81.59	1.9	0.57
00054BC16	4.80	80.65	80.80	1.7	0.48
00053MM16	4.80	80.60	80.77	1.8	0.51
00053MV16	4.80	80.48	80.73	2.2	0.64
00052__16	4.80	80.24	80.68	3.0	0.96
00050__16	4.80	79.85	80.21	2.7	0.85
00048PB16	4.80	79.69	79.84	1.7	0.49
00048PC16	4.80	79.42	79.67	2.2	0.70
00047PB16	4.80	79.16	79.65	3.1	0.98
00001PC16	1.50	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

TR200 d=1.00 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	15.55	96.88	97.93	4.5	1.22
00097__16	12.66	96.62	97.56	4.3	1.06
00096PB16	10.99	96.48	96.84	2.7	0.60
00096PC16	10.94	93.77	95.97	6.6	2.44
00095BB16	11.27	93.09	95.96	7.5	3.60
00095BC16	11.54	92.19	93.11	4.2	1.97
00095BD16	11.58	92.17	92.52	2.6	0.95
00093__16	11.84	92.14	92.32	1.9	0.61
00092__16	12.11	92.11	92.51	2.8	0.98
00091__16	12.43	92.03	92.64	3.5	1.20
00090__16	12.41	91.91	92.30	2.8	0.74
00088BB16	11.69	91.76	92.02	2.2	0.56
00088BC16	11.69	91.06	91.45	2.8	0.77
00086BB16	11.03	90.90	91.15	2.2	0.56
00086BC16	11.03	89.60	90.11	3.2	0.90
00083BB16	11.74	89.20	89.44	2.2	0.56
00083BC16	11.74	88.28	89.11	4.0	1.29
00077PB16	11.21	87.84	88.01	1.8	0.41
00077PC16	11.21	87.15	87.54	2.8	0.75
00076BB16	11.56	87.08	87.73	3.6	0.94
00076BC16	11.56	86.06	86.43	2.7	0.62
00075__16	11.66	85.86	86.29	2.9	0.71
00074__16	11.67	85.67	86.19	3.2	0.80
00066PB16	11.67	85.44	86.07	3.5	0.91
00066PC16	11.67	83.42	84.08	3.6	0.91
00065MM16	11.67	83.33	83.98	3.6	0.91
00065MV16	11.67	83.32	83.98	3.6	0.92
00064__16	11.67	83.38	83.44	1.1	0.25
00059PB16	7.76	83.37	83.45	1.3	0.26
00059PC16	7.76	82.27	82.68	2.8	0.76
00058__16	7.72	82.10	82.47	2.7	0.76
00056BB16	5.97	82.00	82.23	2.1	0.58
00056BC16	5.97	81.53	81.80	2.3	0.61
00056BD16	5.97	81.61	81.74	1.6	0.40
00055__16	5.91	81.47	81.69	2.1	0.61
00054BB16	4.78	81.40	81.59	1.9	0.57
00054BC16	4.78	80.65	80.80	1.7	0.48
00053MM16	4.78	80.60	80.76	1.8	0.51
00053MV16	4.78	80.48	80.72	2.2	0.64
00052__16	4.78	80.24	80.68	2.9	0.96
00050__16	4.78	79.85	80.21	2.7	0.85
00048PB16	4.78	79.69	79.84	1.7	0.49
00048PC16	4.78	79.42	79.66	2.2	0.70
00047PB16	4.78	79.15	79.65	3.1	0.98
00001PC16	1.51	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

TR200 d=1.25 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	13.98	96.80	97.76	4.3	1.20
00097__16	11.71	96.55	97.42	4.1	1.04
00096PB16	10.70	96.41	96.78	2.7	0.61
00096PC16	10.69	93.76	95.93	6.5	2.44
00095BB16	10.88	93.08	95.88	7.4	3.59
00095BC16	11.02	92.15	93.17	4.5	2.14
00095BD16	11.04	92.12	92.48	2.7	0.99
00093__16	11.15	92.09	92.26	1.9	0.62
00092__16	11.34	92.06	92.45	2.8	1.00
00091__16	11.58	91.97	92.58	3.5	1.24
00090__16	11.57	91.84	92.22	2.7	0.74
00088BB16	11.03	91.70	91.94	2.2	0.56
00088BC16	11.03	91.01	91.39	2.7	0.77
00086BB16	10.49	90.85	91.09	2.2	0.56
00086BC16	10.49	89.55	90.05	3.1	0.91
00083BB16	11.04	89.14	89.37	2.1	0.56
00083BC16	11.04	88.24	89.04	4.0	1.29
00077PB16	9.87	87.84	87.97	1.6	0.36
00077PC16	10.18	87.06	87.43	2.7	0.75
00076BB16	10.50	86.99	87.60	3.5	0.94
00076BC16	10.50	85.95	86.29	2.6	0.62
00075__16	10.57	85.75	86.16	2.8	0.71
00074__16	10.57	85.56	86.05	3.1	0.80
00066PB16	10.57	85.35	85.93	3.4	0.91
00066PC16	10.57	83.34	83.94	3.5	0.90
00065MM16	10.57	83.25	83.84	3.4	0.89
00065MV16	10.57	83.24	83.84	3.5	0.90
00064__16	10.57	83.30	83.35	1.0	0.24
00059PB16	7.49	83.28	83.36	1.3	0.26
00059PC16	7.49	82.25	82.64	2.8	0.76
00058__16	7.46	82.08	82.43	2.6	0.75
00056BB16	5.87	81.99	82.21	2.1	0.58
00056BC16	5.87	81.53	81.78	2.3	0.61
00056BD16	5.87	81.60	81.73	1.6	0.40
00055__16	5.82	81.47	81.68	2.0	0.60
00054BB16	4.74	81.40	81.58	1.9	0.57
00054BC16	4.74	80.64	80.79	1.7	0.48
00053MM16	4.74	80.59	80.75	1.8	0.51
00053MV16	4.74	80.47	80.71	2.2	0.63
00052__16	4.74	80.23	80.67	2.9	0.96
00050__16	4.74	79.84	80.20	2.7	0.85
00048PB16	4.74	79.68	79.83	1.7	0.49
00048PC16	4.74	79.42	79.66	2.2	0.70
00047PB16	4.74	79.15	79.64	3.1	0.98
00001PC16	1.51	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

TR200 d=1.50 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	12.47	96.72	97.59	4.1	1.19
00097__16	10.82	96.48	97.29	4.0	1.03
00096PB16	10.34	96.33	96.70	2.7	0.63
00096PC16	10.34	93.74	95.88	6.5	2.45
00095BB16	10.36	93.06	95.77	7.3	3.58
00095BC16	10.40	92.10	93.22	4.7	2.30
00095BD16	10.41	92.07	92.44	2.7	1.01
00093__16	10.47	92.04	92.21	1.8	0.63
00092__16	10.63	92.01	92.40	2.8	1.02
00091__16	10.79	91.91	92.53	3.5	1.29
00090__16	10.79	91.78	92.14	2.7	0.74
00088BB16	10.38	91.63	91.87	2.2	0.56
00088BC16	10.38	90.96	91.32	2.7	0.77
00086BB16	9.97	90.80	91.03	2.1	0.56
00086BC16	9.97	89.49	89.99	3.1	0.93
00083BB16	10.31	89.07	89.30	2.1	0.56
00083BC16	10.31	88.18	88.97	3.9	1.31
00077PB16	9.69	87.75	87.89	1.7	0.38
00077PC16	9.69	87.01	87.37	2.7	0.76
00076BB16	9.95	86.94	87.53	3.4	0.94
00076BC16	9.95	85.88	86.22	2.6	0.62
00075__16	9.98	85.69	86.08	2.8	0.71
00074__16	9.98	85.51	85.98	3.0	0.80
00066PB16	9.98	85.29	85.86	3.3	0.91
00066PC16	9.98	83.28	83.86	3.4	0.90
00065MM16	9.98	83.19	83.76	3.3	0.89
00065MV16	9.98	83.18	83.76	3.4	0.90
00064__16	9.98	83.24	83.29	1.0	0.24
00059PB16	7.29	83.21	83.29	1.3	0.27
00059PC16	7.29	82.23	82.61	2.7	0.75
00058__16	7.26	82.07	82.41	2.6	0.74
00056BB16	5.79	81.97	82.20	2.1	0.58
00056BC16	5.79	81.52	81.77	2.2	0.60
00056BD16	5.79	81.60	81.73	1.6	0.39
00055__16	5.75	81.46	81.67	2.0	0.60
00054BB16	4.70	81.39	81.57	1.9	0.57
00054BC16	4.70	80.63	80.78	1.7	0.48
00053MM16	4.70	80.59	80.75	1.8	0.51
00053MV16	4.70	80.47	80.71	2.2	0.63
00052__16	4.70	80.23	80.67	2.9	0.96
00050__16	4.70	79.83	80.19	2.7	0.85
00048PB16	4.70	79.67	79.82	1.7	0.49
00048PC16	4.70	79.41	79.65	2.2	0.70
00047PB16	4.70	79.14	79.63	3.1	0.98
00001PC16	1.51	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

TR500 d=0.75 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	19.73	97.09	98.37	5.0	1.27
00097__16	15.08	96.79	97.89	4.6	1.09
00096PB16	11.76	96.67	97.02	2.6	0.56
00096PC16	11.74	93.81	96.10	6.7	2.44
00095BB16	12.33	93.11	96.20	7.8	3.63
00095BC16	12.72	92.29	93.04	3.8	1.63
00095BD16	12.80	92.28	92.60	2.5	0.87
00093__16	13.30	92.25	92.43	1.9	0.58
00092__16	13.76	92.23	92.62	2.8	0.93
00091__16	14.31	92.15	92.76	3.5	1.12
00090__16	14.25	92.04	92.48	2.9	0.74
00088BB16	13.15	91.89	92.17	2.3	0.56
00088BC16	13.15	91.17	91.59	2.9	0.77
00086BB16	12.12	91.01	91.27	2.3	0.56
00086BC16	12.12	89.72	90.23	3.2	0.88
00083BB16	13.23	89.33	89.59	2.3	0.56
00083BC16	13.22	88.41	89.23	4.0	1.23
00077PB16	12.61	88.02	88.20	1.9	0.40
00077PC16	12.61	87.28	87.69	2.8	0.74
00076BB16	13.11	87.21	87.92	3.7	0.94
00076BC16	13.11	86.25	86.65	2.8	0.62
00075__16	13.41	86.03	86.50	3.0	0.71
00074__16	13.48	85.83	86.41	3.4	0.80
00066PB16	13.50	85.60	86.29	3.7	0.91
00066PC16	13.50	83.54	84.30	3.9	0.95
00065MM16	13.50	83.43	84.20	3.9	0.95
00065MV16	13.50	83.42	84.20	3.9	0.97
00064__16	13.50	83.48	83.55	1.2	0.26
00059PB16	8.12	83.49	83.57	1.3	0.25
00059PC16	8.12	82.31	82.73	2.9	0.77
00058__16	8.05	82.12	82.51	2.7	0.77
00056BB16	6.09	82.02	82.25	2.1	0.58
00056BC16	6.09	81.54	81.81	2.3	0.62
00056BD16	6.09	81.62	81.76	1.6	0.41
00055__16	6.02	81.48	81.70	2.1	0.62
00054BB16	4.83	81.41	81.60	1.9	0.57
00054BC16	4.83	80.66	80.81	1.7	0.48
00053MM16	4.84	80.61	80.78	1.8	0.51
00053MV16	4.84	80.49	80.73	2.2	0.64
00052__16	4.84	80.25	80.69	3.0	0.95
00050__16	4.84	79.86	80.22	2.7	0.85
00048PB16	4.84	79.70	79.85	1.7	0.49
00048PC16	4.84	79.43	79.68	2.2	0.69
00047PB16	4.84	79.17	79.66	3.1	0.98
00001PC16	1.55	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

TR500 d=1.00 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	18.21	97.01	98.22	4.9	1.26
00097__16	14.25	96.73	97.78	4.5	1.08
00096PB16	11.46	96.60	96.95	2.6	0.57
00096PC16	11.43	93.79	96.05	6.7	2.43
00095BB16	11.99	93.10	96.12	7.7	3.62
00095BC16	12.47	92.26	93.08	4.0	1.77
00095BD16	12.39	92.24	92.58	2.6	0.90
00093__16	12.83	92.22	92.39	1.9	0.60
00092__16	13.20	92.19	92.58	2.8	0.95
00091__16	13.61	92.11	92.72	3.4	1.14
00090__16	13.59	92.00	92.42	2.9	0.74
00088BB16	12.68	91.85	92.12	2.3	0.56
00088BC16	12.67	91.13	91.55	2.9	0.77
00086BB16	11.77	90.97	91.23	2.3	0.56
00086BC16	11.77	89.68	90.19	3.2	0.88
00083BB16	12.76	89.29	89.55	2.2	0.56
00083BC16	12.76	88.37	89.19	4.0	1.25
00077PB16	12.14	87.96	88.14	1.9	0.41
00077PC16	12.14	87.24	87.64	2.8	0.74
00076BB16	12.58	87.17	87.86	3.7	0.94
00076BC16	12.58	86.19	86.57	2.8	0.62
00075__16	12.80	85.98	86.43	3.0	0.71
00074__16	12.85	85.78	86.33	3.3	0.80
00066PB16	12.86	85.55	86.22	3.6	0.91
00066PC16	12.86	83.50	84.23	3.8	0.94
00065MM16	12.86	83.40	84.12	3.8	0.94
00065MV16	12.86	83.39	84.13	3.8	0.95
00064__16	12.86	83.45	83.52	1.1	0.26
00059PB16	8.00	83.45	83.53	1.3	0.25
00059PC16	8.00	82.30	82.71	2.9	0.77
00058__16	7.94	82.12	82.49	2.7	0.77
00056BB16	6.05	82.01	82.25	2.1	0.58
00056BC16	6.05	81.54	81.81	2.3	0.62
00056BD16	6.05	81.62	81.75	1.6	0.41
00055__16	5.99	81.48	81.70	2.1	0.61
00054BB16	4.82	81.41	81.59	1.9	0.57
00054BC16	4.82	80.66	80.80	1.7	0.48
00053MM16	4.82	80.61	80.77	1.8	0.51
00053MV16	4.82	80.49	80.73	2.2	0.64
00052__16	4.82	80.25	80.69	3.0	0.96
00050__16	4.82	79.85	80.22	2.7	0.85
00048PB16	4.82	79.69	79.84	1.7	0.49
00048PC16	4.82	79.43	79.67	2.2	0.70
00047PB16	4.82	79.16	79.66	3.1	0.98
00001PC16	1.51	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

TR500 d=1.25 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	16.28	96.92	98.01	4.6	1.23
00097__16	13.06	96.65	97.61	4.4	1.06
00096PB16	11.11	96.51	96.87	2.6	0.59
00096PC16	11.04	93.78	95.98	6.6	2.43
00095BB16	11.43	93.09	96.00	7.6	3.60
00095BC16	11.75	92.21	93.09	4.2	1.91
00095BD16	11.81	92.19	92.53	2.6	0.94
00093__16	12.12	92.16	92.34	1.9	0.61
00092__16	12.42	92.13	92.53	2.8	0.97
00091__16	12.77	92.05	92.66	3.5	1.18
00090__16	12.75	91.93	92.34	2.8	0.74
00088BB16	11.97	91.79	92.05	2.3	0.56
00088BC16	11.97	91.08	91.48	2.8	0.77
00086BB16	11.23	90.92	91.17	2.2	0.56
00086BC16	11.23	89.63	90.13	3.2	0.90
00083BB16	12.02	89.23	89.47	2.2	0.56
00083BC16	12.02	88.31	89.13	4.0	1.28
00077PB16	11.46	87.88	88.05	1.8	0.41
00077PC16	11.46	87.17	87.57	2.8	0.75
00076BB16	11.84	87.10	87.77	3.6	0.94
00076BC16	11.84	86.10	86.47	2.7	0.62
00075__16	11.97	85.89	86.33	2.9	0.71
00074__16	11.99	85.70	86.23	3.2	0.80
00066PB16	11.99	85.47	86.11	3.5	0.91
00066PC16	11.99	83.45	84.12	3.6	0.92
00065MM16	11.99	83.35	84.02	3.6	0.91
00065MV16	11.99	83.34	84.02	3.7	0.93
00064__16	11.99	83.40	83.46	1.1	0.25
00059PB16	7.83	83.39	83.48	1.3	0.25
00059PC16	7.83	82.28	82.69	2.8	0.77
00058__16	7.78	82.11	82.47	2.7	0.76
00056BB16	5.99	82.01	82.24	2.1	0.58
00056BC16	5.99	81.53	81.80	2.3	0.62
00056BD16	5.99	81.61	81.75	1.6	0.40
00055__16	5.93	81.47	81.69	2.1	0.61
00054BB16	4.79	81.41	81.59	1.9	0.57
00054BC16	4.79	80.65	80.80	1.7	0.48
00053MM16	4.79	80.60	80.77	1.8	0.51
00053MV16	4.79	80.48	80.73	2.2	0.64
00052__16	4.79	80.24	80.68	3.0	0.96
00050__16	4.79	79.85	80.21	2.7	0.85
00048PB16	4.79	79.69	79.84	1.7	0.49
00048PC16	4.79	79.42	79.67	2.2	0.70
00047PB16	4.79	79.16	79.65	3.1	0.98
00001PC16	1.51	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

TR500 d=1.50 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00098__16	14.48	96.83	97.81	4.4	1.21
00097__16	12.00	96.58	97.46	4.2	1.04
00096PB16	10.79	96.43	96.80	2.7	0.61
00096PC16	10.78	93.76	95.94	6.5	2.44
00095BB16	11.01	93.08	95.91	7.5	3.59
00095BC16	11.17	92.16	93.14	4.4	2.07
00095BD16	11.20	92.14	92.49	2.6	0.97
00093__16	11.38	92.11	92.28	1.9	0.62
00092__16	11.60	92.08	92.47	2.8	1.00
00091__16	11.86	91.99	92.60	3.5	1.23
00090__16	11.85	91.87	92.25	2.7	0.74
00088BB16	11.25	91.72	91.97	2.2	0.56
00088BC16	11.25	91.03	91.41	2.7	0.77
00086BB16	10.67	90.87	91.11	2.2	0.56
00086BC16	10.67	89.57	90.07	3.1	0.91
00083BB16	11.28	89.16	89.40	2.2	0.56
00083BC16	11.28	88.25	89.06	4.0	1.29
00077PB16	9.87	87.84	87.97	1.6	0.36
00077PC16	10.53	87.09	87.46	2.7	0.75
00076BB16	10.86	87.02	87.64	3.5	0.94
00076BC16	10.86	85.99	86.34	2.6	0.62
00075__16	10.93	85.79	86.20	2.8	0.71
00074__16	10.94	85.60	86.10	3.1	0.80
00066PB16	10.94	85.38	85.98	3.4	0.91
00066PC16	10.94	83.37	83.99	3.5	0.90
00065MM16	10.94	83.28	83.89	3.5	0.89
00065MV16	10.94	83.27	83.89	3.5	0.90
00064__16	10.94	83.33	83.38	1.0	0.24
00059PB16	7.60	83.31	83.39	1.3	0.26
00059PC16	7.60	82.26	82.66	2.8	0.76
00058__16	7.56	82.09	82.45	2.6	0.76
00056BB16	5.91	81.99	82.22	2.1	0.58
00056BC16	5.91	81.53	81.79	2.3	0.61
00056BD16	5.91	81.61	81.74	1.6	0.40
00055__16	5.86	81.47	81.69	2.1	0.61
00054BB16	4.76	81.40	81.58	1.9	0.57
00054BC16	4.76	80.64	80.79	1.7	0.48
00053MM16	4.76	80.60	80.76	1.8	0.51
00053MV16	4.76	80.48	80.72	2.2	0.64
00052__16	4.76	80.24	80.68	2.9	0.96
00050__16	4.76	79.84	80.20	2.7	0.85
00048PB16	4.76	79.68	79.83	1.7	0.49
00048PC16	4.76	79.42	79.66	2.2	0.70
00047PB16	4.76	79.15	79.64	3.1	0.98
00001PC16	1.51	74.00	74.01	0.3	0.06
00000__16	0.50	74.00	74.00	0.1	0.01

Tabella 3: Risultati della modellistica idraulica monodimensionale in alveo per ogni evento simulato