

Il Direttore dei Lavori

**OGGETTO:** Studio idrologico-idraulico a supporto della redazione del Piano Operativo di Volterra  
**UBICAZIONE:** VOLTERRA PI  
**COMMITTENTE:** Comune di VOLTERRA  
**ELABORATO:** RELAZIONE IDROLOGICO - IDRAULICA

**DATA:** Marzo 2021

**Pr. n°:** 19-007

Il Progettista

**ALLEGATO:**

**RI**

**STUDIO IDRAULICO**

## RELAZIONE TECNICA

### Sommario

Premessa .....	2
I bacini idraulici di interesse .....	3
Grandezze geomorfologiche .....	4
Definizione del regime pluviometrico .....	6
Ietogramma di progetto .....	9
Quantificazione della pioggia netta .....	10
Trasformazione afflussi-deflussi .....	13
Stima del tempo di corrvazione .....	14
Idrogramma Unitario SCS .....	15
Idrogramma Unitario di Clark .....	15
Kinematic Wave .....	16
Modellazione delle briglie esistenti .....	18
Idrogrammi di piena indagati .....	21
Descrizione del modello matematico di analisi idraulica .....	26
Morfologia dell'alveo .....	30
Coefficiente di scabrezza .....	32
Modellazione delle opere d'arte .....	34
Condizioni al contorno .....	35
Condizione al contorno di monte .....	35
Condizione al contorno di valle .....	35
Risultati delle modellazioni e analisi critica .....	36

## **PREMESSA**

La presente relazione idrologico - idraulica ha come scopo la determinazione degli idrogrammi di piena e le relative portate massime attese alle sezioni di chiusura dei vari bacini, nonché la determinazione dei battenti idraulici conseguenti ad eventi di piena attesi per alcuni corsi d'acqua del reticolo secondario che interessano il territorio del Comune di Volterra. Lo studio è quindi redatto a supporto del costituendo Piano Operativo Comunale di Volterra e vede indagati i corsi d'acqua Botro dei Canonici, Botro Sant'Antonio e Botro Santa Marta.

L'obiettivo primario del presente studio è infatti quello di determinare le condizioni di rischio idraulico nell'abitato di Saline di Volterra, derivanti dai tre corsi d'acqua che lo attraversano. La pericolosità idraulica dei tre corsi d'acqua è infatti nota anche storicamente per eventi alluvionali più o meno recenti che hanno interessato l'abitato di Saline di Volterra, particolarmente per quanto riguarda il Botro dei Canonici che presenta un tratto tombato di lunghezza non trascurabile e sezione decisamente insufficiente.

I suddetti idrogrammi sono determinati mediante l'implementazione di appositi modelli idrologici redatti con il software HEC-HMS sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers. Analogamente i battenti sono determinati mediante l'implementazione di apposito modello idraulico redatto con il software HEC-RAS sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers. Nelle analisi sono stati considerati i tempi di ritorno trentennale TR30 e duecentennale TR200, valutati per diverse durate di pioggia comprese nelle 8h, risultati critici per il sistema idraulico indagato.

Si descrivono allora gli approcci di analisi adottati per i diversi modelli implementati, e i principali parametri adottati.

Di seguito e negli elaborati grafici allegati sono riportati quindi i risultati delle elaborazioni, così come restituiti dal modello. Alcuni di tali dati, quali la perimetrazione delle aree a diversa pericolosità idraulica e la cartografia della magnitudo, sono stati rielaborati in stretto accordo col il geol. Emilio Pistilli, restituendo nuove cartografie a cui si rimanda, frutto di più ampie considerazioni urbanistiche, ed estese a tutto il territorio Comunale.

## ***I BACINI IDRAULICI DI INTERESSE***

I bacini idrografici oggetto di studio si collocano a Sud dell'abitato di Volterra, in provincia di Pisa. I corsi d'acqua studiati sono il Botro dei Canonici e il Botro di Santa Marta, assieme al suo affluente Botro di Sant'Antonio. I suddetti corsi d'acqua drenano i rilievi a Sud di Volterra per poi andare a confluire nel fiume Cecina.

La sezione di chiusura del bacino idrografico complessivo è stata posta in corrispondenza della confluenza tra il Botro Santa Marta ed il Rio Ergagno, a valle dell'abitato di Saline di Volterra.

Il bacino così individuato, afferente al Botro Santa Marta presenta una superficie complessiva di circa 17,61 Km<sup>2</sup>, di cui 2,16 Km<sup>2</sup> afferenti al Botro di Sant'Antonio e 5,18 Km<sup>2</sup> afferenti al Botro dei Canonici.

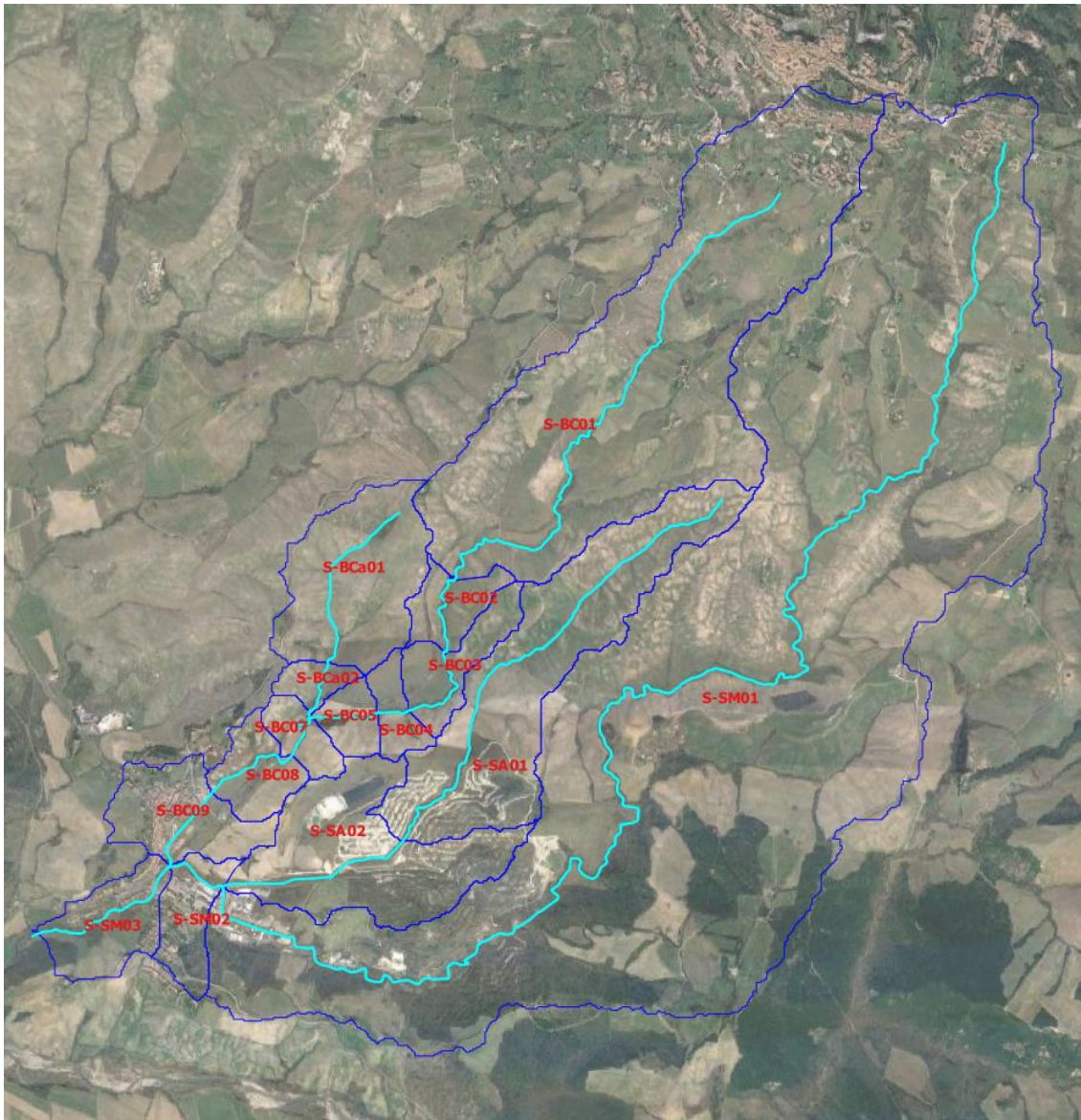
I bacini idrografici dei corsi d'acqua sopra individuati sono stati ulteriormente suddivisi in sottobacini idrografici chiusi in corrispondenza delle briglie esistenti e delle varie confluenze, in modo tale da determinare gli idrogrammi di piena in corrispondenza delle sezioni di interesse. Per motivi di opportunità, di confronto e di congruenza con gli studi idraulici presenti sul territorio, si è scelto di mantenere la nomenclatura dei sottobacini assegnata nello studio "Sistemazione idraulica dei sottobacini del Botro dei Canonici e del Botro Santa Marta ai fini della messa in sicurezza a fronte di eventi con tempo di ritorno 200 anni" redatto per conto della COMUNITA' MONTANA ALTA VAL DI CECINA da parte di H.S. Ingegneria s.r.l.

Tale progetto ha peraltro ottenuto il parere favorevole del Comitato Tecnico dell'Autorità di Bacino Toscana Costa nell'ambito della seduta del 23/10/2008 rispetto alla programmazione approvata ed alla coerenza con gli obiettivi del PAI.

Rispetto a tale studio sono stati integrati alcuni bacini vallivi per tenere conto dei contributi offerti al Santa Marta a valle della confluenza con il Botro dei Canonici. Tutti i parametri idrologici sono stati poi rideterminati e confrontati, ivi compreso l'aggiornamento delle curve di possibilità pluviometrica LSPP.

Si riporta di seguito l'individuazione dei bacini e dei sottobacini idrografici. Si riporta anche lo schema del modello idrologico, di cui sarà dettagliata ogni componente ai successivi paragrafi.

I bacini sono stati perimetrati con metodologia GIS a partire dalla base cartografica di tipo lidar DTMI 10x10 m messa a disposizione dalla Regione Toscana sulla propria pagina web Geoscopio WGS, verificandone di volta in volta l'attendibilità sulla base della cartografia CTR 1:10.000 o 1:2000 dove disponibile. Inoltre i bacini così individuati sono stati riscontrati con quelli perimetrati nello studio della Comunità Montana, verificandone trascurabili e localizzate differenze, imputabili al maggior grado di accuratezza offerto dalla cartografia lidar DTMI 10x10 m.



### Grandezze geomorfologiche

Si riportano ora alcune grandezze geomorfologiche dei bacini analizzati.

- Area è espressa in km<sup>2</sup>
- H<sub>max</sub> è l'altitudine massima del bacino in m.s.l.m.
- H<sub>min</sub> è l'altitudine minima del bacino in m.s.l.m. in corrispondenza della sezione di chiusura
- H<sub>media</sub> è l'altitudine media pesata areale del bacino rispetto alla sezione di chiusura espressa in m
- i<sub>v</sub> è la pendenza media pesata areale del bacino espressa in %
- i è la pendenza media dell'alveo espressa in %
- L è la lunghezza del corso d'acqua in km
- L<sub>max</sub> è la lunghezza del percorso idraulico più lungo in km

Nome del bacino	Area	Hmax	Hmin	Hmedia	$i_v$	$i$	L	Lmax
S-BC01	3.02	555.87	110.54	150.47	19.8	7.7	3.54	4.19
S-BC02	0.17	160.00	99.97	24.72	14.68	2.17	0.55	0.75
S-BC03	0.24	160.00	91.32	26.43	16.52	1.56	0.57	1.10
S-BC04	0.12	145.20	90.28	26.15	16.54	1.01	0.18	0.45
S-BC05	0.12	140.00	85.15	21.37	19.30	1.35	0.43	0.56
S-BC07	0.13	140.33	80.00	26.83	19.71	1.12	0.45	0.45
S-BC08	0.21	138.56	77.36	18.63	19.03	1.25	0.48	0.64
S-BC09	0.37	130.00	61.33	28.05	11.23	1.70	0.52	0.72
S-BCa01	0.70	170.00	89.61	35.80	18.62	4.51	1.09	1.30
S-BCa02	0.09	138.37	85.09	22.75	19.94	1.20	0.39	0.54
S-SA01	1.29	250.67	84.49	55.83	20.27	4.07	2.95	3.71
S-SA02	0.87	181.98	76.30	31.41	16.40	0.77	1.12	1.93
S-SM01	9.75	541.07	74.38	131.94	19.82	3.94	9.86	10.22
S-SM02	0.22	150.00	68.70	25.17	12.92	1.99	0.38	1.02
S-SM03	0.32	130.51	61.39	26.25	18.03	0.69	0.97	1.07

## **DEFINIZIONE DEL REGIME PLUVIOMETRICO**

Il regime pluviometrico della zona in esame è stato determinato con riferimento allo studio a carattere regionale "ANALISI DI FREQUENZA REGIONALE DELLE PRECIPITAZIONI ESTREME – LSPP – Aggiornamento al 2012" redatto grazie alla collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012, e disponibile sul sito del Settore Idrologico Regionale.

Il sistema ha provveduto alla definizione dei parametri  $a$ ,  $n$  ed  $m$  descrittivi delle LSPP secondo una maglia regolare di lato 1km, e permette così di individuare i valori più appropriati dei tre parametri, semplicemente introducendone latitudine e longitudine.

Attraverso l'utilizzo del metodo statistico TCEV (Two Component Extreme Value) il citato studio definisce per il campo delle durate di pioggia minori e maggiori ad un'ora le curve di possibilità pluviometrica nella forma trinomia convenzionale

$$h = a \cdot t^n \cdot T_R^m$$

In questo caso sono presi in considerazione solo i parametri della curva di possibilità pluviometrica definiti per il campo delle durate di pioggia superiori ad un'ora. Il parametro  $m$  non è disponibile ma sono diversificati i valori  $a$  ed  $n$  per i diversi tempi di ritorno.

Per la presente analisi, in accordo con quanto riportato nel documento "Guida all'uso" allegato allo stesso studio "ANALISI DI FREQUENZA REGIONALE DELLE PRECIPITAZIONI ESTREME" già citato, si è provveduto mediante tecnologia GIS a caricare i files forniti dallo studio riportanti i parametri georeferenziati  $a$  ed  $n$ , ed a ritagliare tale dato secondo il perimetro del macro-bacino del Botro Santa Marta, con sezione di chiusura in corrispondenza della confluenza con il Rio Ergagno. Così facendo si sono determinati i valori medi delle 17 celle della maglia ricadenti all'interno del perimetro. In tal modo sono stati individuati i parametri medi ritenuti validi su tutti i sottobacini di interesse per ciascun tempo di ritorno.

Per il campo di durate di pioggia inferiori a mezzora, la curva di possibilità pluviometrica assume parametri "a" ed "n" differenti.

Il succitato studio "ANALISI DI FREQUENZA REGIONALE DELLE PRECIPITAZIONI ESTREME" e la relativa "Guida all'uso", però, non definiscono le curve nel campo di durate inferiori all'ora, né indicano una metodologia da seguire.

Tuttavia l'adozione del parametro  $n$  per il campo di durate inferiori ad un'ora pari a quello indicato dallo studio condurrebbe a consistenti sovrastime delle altezze di pioggia, come comunemente dimostrato in letteratura.

Lo stesso studio indica però la possibilità di estendere la curva sino alle durate di pioggia di 30 minuti senza incorrere in eccessivi errori, lasciando al professionista la scelta della curva per durate inferiori.

Nel presente studio si è scelto allora di adottare, per piogge di durata inferiore a 30 minuti, per il parametro "n" il valore di 0,48 in accordo con vari studi sperimentali (CSDU 1997<sup>1</sup>). Il parametro "a" valido al di sotto dei 30 minuti è invece determinato per ciascun tempo di ritorno come:

$$a_{<30min} = a_{>30min} * 0.5^{n_{>30min}} / 0.5^{0.48}$$

Il parametro "a" così determinato per la curva in corrispondenza di durate inferiori a 30 minuti è tale da far corrispondere l'altezza di pioggia di durata 30 minuti, sia essa determinata da destra (mediante cioè la curva valida per d>0.5h) o da sinistra (mediante cioè la curva valida per d<0.5h), assicurando la congruenza del dato e la continuità della curva, che diversamente fornirebbe paradossalmente altezze di pioggia per d<0.5h superiori a quelle determinate per alcune durate >0.5h.

In definitiva le curve di possibilità pluviometriche adottate sono le seguenti.

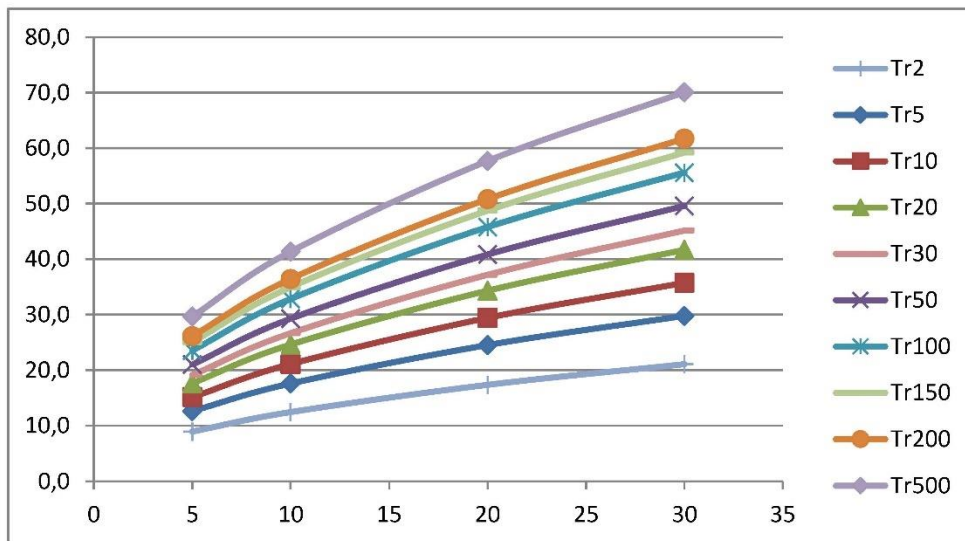
TR	a > 30 min		a < 30 min	
	a	n	a	n
2	24.714	0.231	29.377	0.48
5	34.864	0.227	41.542	0.48
10	42.112	0.237	49.838	0.48
20	49.598	0.251	58.142	0.48
30	54.020	0.258	62.992	0.48
50	59.679	0.267	69.188	0.48
100	67.365	0.276	77.575	0.48
150	71.978	0.281	82.607	0.48
200	75.174	0.284	86.114	0.48
500	85.741	0.291	97.767	0.48

<sup>1</sup> Centro Studi Deflussi Urbani, Milano.



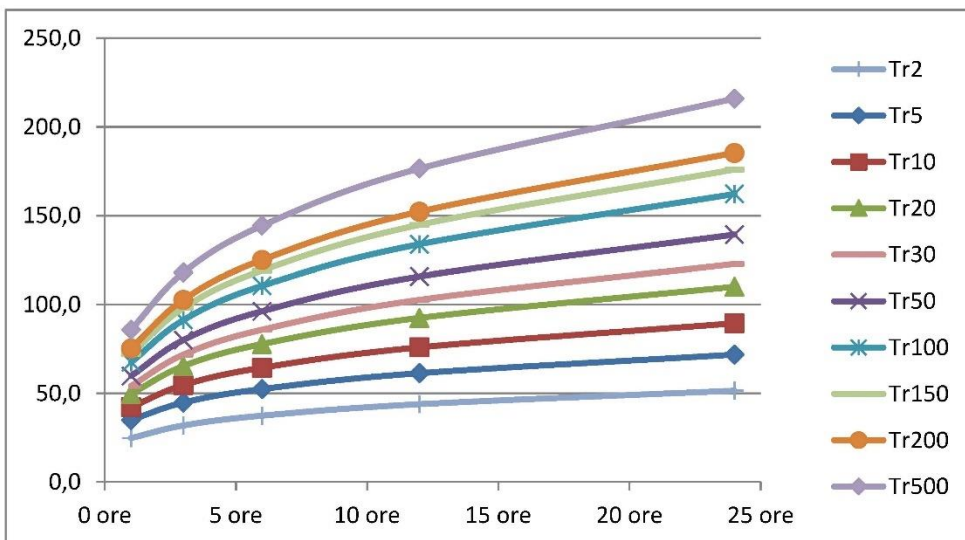
**Durata inferiore a 1 ora: altezza di precipitazione in funzione di durata e tempo di ritorno**


	5 minuti	10 minuti	20 minuti	30 minuti
2 anni	8,9	12,4	17,3	21,1 mm
5 anni	12,6	17,6	24,5	29,8 mm
10 anni	15,1	21,1	29,4	35,7 mm
20 anni	17,6	24,6	34,3	41,7 mm
30 anni	19,1	26,7	37,2	45,2 mm
50 anni	21,0	29,3	40,8	49,6 mm
100 anni	23,5	32,8	45,8	55,6 mm
150 anni	25,1	35,0	48,8	59,2 mm
200 anni	26,1	36,4	50,8	61,7 mm
500 anni	29,7	41,4	57,7	70,1 mm



**Durata superiore a 1 ora: altezza di precipitazione in funzione di durata e tempo di ritorno**

	1 ore	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore
2 anni	24,7	31,8	37,4	43,8	51,4 mm
5 anni	34,9	44,7	52,4	61,3	71,8 mm
10 anni	42,1	54,6	64,4	75,9	89,4 mm
20 anni	49,6	65,3	77,7	92,5	110,0 mm
30 anni	54,0	71,7	85,8	102,6	122,8 mm
50 anni	59,7	80,0	96,2	115,8	139,3 mm
100 anni	67,4	91,3	110,5	133,9	162,2 mm
150 anni	72,0	98,0	119,2	144,8	176,0 mm
200 anni	75,2	102,7	125,0	152,2	185,4 mm
500 anni	85,7	118,0	144,3	176,5	215,9 mm



 <b>STA</b> engineering s.r.l. www.sta-eng.it via del Rio, 2 - 56025 PONTEDERA PI tel. +39.0587.608233	21.03.08 Relazione idrologico idraulica - nuovo modello.docx
	Data: Marzo 2021

## ***IETOGRAMMA DI PROGETTO***

Le curve di possibilità pluviometrica forniscono i volumi integrali di pioggia attesi in funzione della durata e per un prefissato periodo di ritorno, mentre non forniscono alcuna indicazione sulla distribuzione temporale della pioggia, che rappresenta un elemento fondamentale nel processo di trasformazione afflussi-deflussi.

D'altronde la modalità con cui l'intensità di pioggia varia durante un dato evento pluviometrico è da ritenersi del tutto casuale e quindi il suo studio dovrebbe essere caratterizzato da opportune indagini statistiche atte ad individuare la forma dello ietogramma.

Nella pratica progettuale si ovvia alla mancanza di dati statistici che permettano la ricostruzione dello ietogramma, mediante l'adozione di ietogrammi detti sintetici, tali cioè da non rappresentare il reale andamento dell'evento pluviometrico, ma in grado di introdurre nelle procedure di trasformazione afflussi-deflussi una variabilità temporale della pioggia che dia luogo a risultati che si possano ritenere cautelativi. La legge di distribuzione che si introduce rappresenta, in tal modo, quello che viene definito lo ietogramma di progetto.

Tra le varie procedure note in letteratura, si è scelto di impiegare lo ietogramma di tipo triangolare con picco in posizione centrale, ritenuto idoneo per i bacini analizzati. Per le finalità dello studio in esame, infatti, avendo determinato gli idrogrammi di piena per molte durate di pioggia e visti i modelli di trasformazione afflussi-deflussi adottati, non risulta opportuno impiegare ietogrammi sintetici che rappresentino in modo spinto la variabilità temporale dell'evento pluviometrico. Diversamente l'effetto di picco introdotto contemporaneamente dallo ietogramma e dal modello di trasformazione A-D, condurrebbe a risultati eccessivamente cautelativi nei confronti dei valori di picco delle portate, e inciderebbe negativamente sulla determinazione delle esondazioni concentrandone la durata temporale.

## QUANTIFICAZIONE DELLA PIOGGIA NETTA

Per quantificare la pioggia netta, ovvero la quota parte del volume di pioggia che va a produrre deflusso superficiale, si stimano le perdite idrologiche che avvengono per intercettazione della vegetazione, detenzione superficiale, immagazzinamento nelle depressioni superficiali, evapotraspirazione e infiltrazione.

Il metodo applicato è quello Curve Number (CN), che valuta istante per istante il quantitativo di pioggia che va a produrre deflusso superficiale in funzione della litologia del suolo, del suo uso e del grado di imbibizione iniziale (AMC). Sotto l'aspetto litologico i suoli sono distinti in 4 gruppi, indicati in Tabella 1, a cui sono legati, in funzione dell'utilizzazione, i parametri CN riportati in Tabella 2. La Tabella 2 riporta i valori di CN per la classe di imbibizione iniziale II, per passare alle altre classi si utilizzano i valori riportati nella Tabella 3.

Tabella 1 - Classificazione litologica dei suoli secondo il Soil Conservation Service (SCS)

GRUPPO	DESCRIZIONE
A	Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla, ghiaie profonde molto permeabili.
B	Potenzialità di deflusso moderatamente bassa. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi, meno profondi rispetto al gruppo A, ma il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione
C	Potenzialità di deflusso moderatamente alte. Comprende suoli sottili e suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali, anche se in quantità minore del gruppo D. Il gruppo ha scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.
D	Potenzialità di deflusso molto alta. Comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie.

Tabella 2 - Parametri CN relativi alla classe AMC II di umidità iniziale, per le quattro classi litologiche e per i vari tipi di uso del suolo

Tipo di copertura (uso del suolo)	A	B	C	D
TERRENO COLTIVATO				
Senza trattamenti di conservazione	72	81	88	91
Con interventi di conservazione	62	71	78	81
TERRENO DA PASCOLO				
Cattive condizioni	68	79	86	89
Buone condizioni	39	61	74	80
PRATERIE				
Buone condizioni	30	58	71	78
TERRENI BOSCOSSI o FORESTATI				
Terrano sottile sottobosco povero di foglie	45	66	77	83
Sottobosco e copertura buoni	25	55	70	77
SPAZI APERTI, PRATI RASATI, PARCHI				
Buone condizioni con almeno il 75% dell'area con copertura erbosa	39	61	74	80
Condizioni normali con copertura erbosa intorno al 50%	49	69	79	84
AREE COMMERCIALI				
(impermeabilità 85%)	89	92	94	95
DISTRETTI INDUSTRIALI				

(impermeabilità 72%)	81	88	91	93
AREE RESIDENZIALI				
Impermeabilità media (%)				
65%	77	85	90	92
38%	61	75	83	87
30%	57	72	81	86
25%	54	70	80	85
20%	51	68	79	84
PARCHEGGI IMPERMEABILIZZATI, TETTI	98	98	98	98
STRADE				
Pavimentate, con cordoli e fognature	98	98	98	98
Inghiaiate o selciate con buche	76	85	89	91
In terra battuta (non asfaltate)	72	82	87	89

Tabella 3 - Conversione dei valori del CN a seconda delle condizioni AMC di umidità iniziali.

CLASSE AMC			CLASSE AMC		
I	II	III	I	II	III
100	100	100	40	60	78
87	95	98	35	55	74
78	90	96	31	50	70
70	85	94	22	40	60
63	80	91	15	30	50
57	75	88	9	20	37
51	70	85	4	10	22
45	65	82	0	0	0

Per la stima del parametro CN il calcolo è stato effettuato a partire dall'ultima versione del Database Pedologico della Regione Toscana e dall'Uso del Suolo Corine (2016), i cui strati informativi sono pubblicati sul sito della Regione Toscana.

Abbiamo tuttavia preferito correggere i valori di CN II ottenuti per le aree boscate relative ai codici Corine Land Cover 311, 312 e 313 assegnando i seguenti valori proposti dall'USDA:

- Per Tipo di Suolo "A" si assume CN II pari a 36
- Per Tipo di Suolo "B" si assume CN II pari a 48
- Per Tipo di Suolo "C" si assume CN II pari a 57
- Per Tipo di Suolo "D" si assume CN II pari a 63

Ritagliando allora gli shapefiles secondo il contorno del bacino, e determinando i valori di CN III per ciascun poiligono secondo la combinazione definita all'interno dello studio *Macroattività B - Modellazione idrologica Attività B2: Modellazione idrologica caso pilota. Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC. Addendum: parametrizzazione HMS* (Università di Firenze, Regione Toscana, 2014), i valori caratteristici di CN III dell'intero bacino sono ottenuti come media pesata sull'area dei vari CN III di ciascuna area omogenea.

$$\text{Media Ponderata} = \frac{\sum_{i=1}^n [x_i \cdot P_i]}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

Si riportano allora i valori di CN III ottenuti per ciascun bacino, e gli altri due parametri del metodo: S è la capacità di ritenzione superficiale e  $Ia^2$  il valore limite di pioggia che il terreno può trattenere nella fase iniziale.

Bacino	CN III	S	ia
S-BC01	92.82	19.64	3.93
S-BC02	92.08	21.84	4.37
S-BC03	92.17	21.59	4.32
S-BC04	92.65	20.15	4.03
S-BC05	91.18	24.58	4.92
S-BC07	92.10	21.78	4.36
S-BC08	91.96	22.20	4.44
S-BC09	94.41	15.03	3.01
S-BCa01	93.30	18.24	3.65
S-BCa02	92.21	21.46	4.29
S-SA01	93.68	17.14	3.43
S-SA02	92.97	19.21	3.84
S-SM01	89.76	28.98	5.80
S-SM02	91.64	23.16	4.63
S-SM03	91.05	24.97	4.99

Infine si è valutata la pioggia netta mediante la seguente espressione:

$$h_n = \frac{(h - Ia)^2}{h - Ia + S}$$

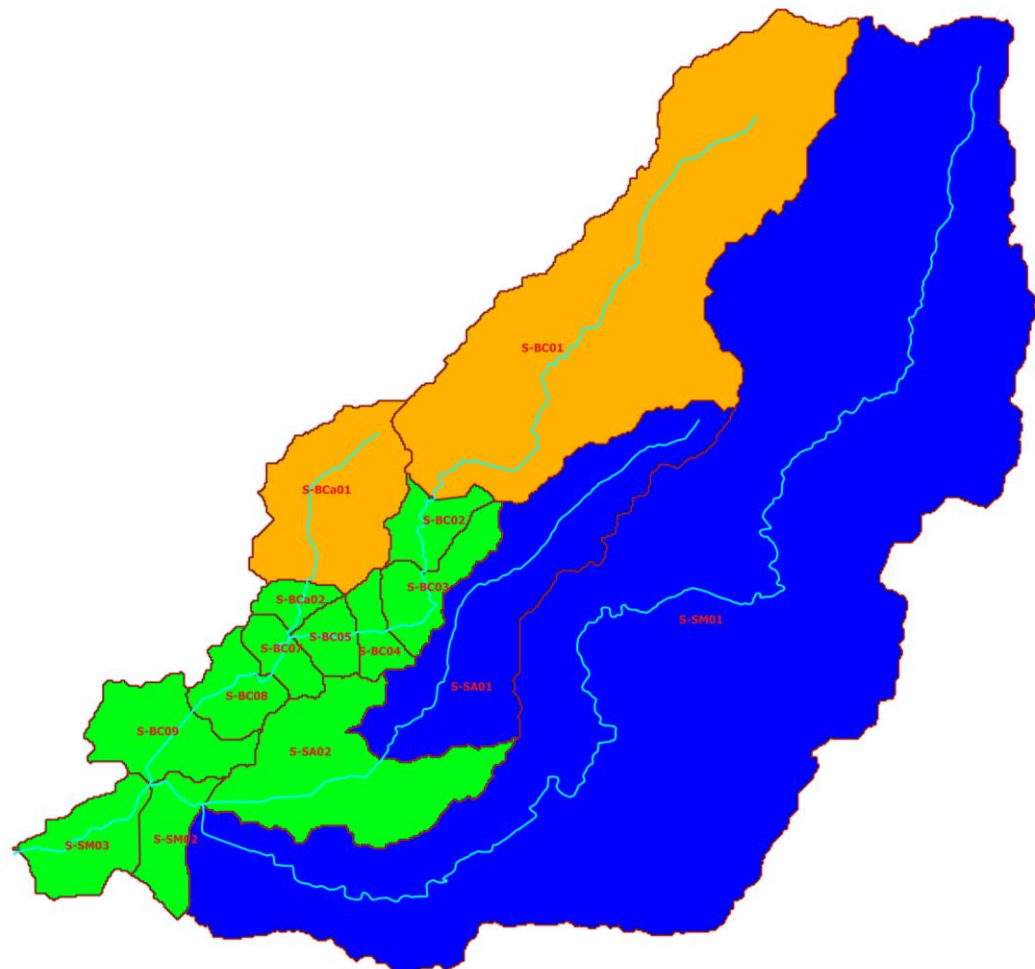
Si sono così ottenuti gli ietogrammi di pioggia netta per ciascun bacino analizzato, ciascun tempo di ritorno considerato e ciascuna durata di pioggia indagata.

$$S = 25.4 \left[ \left( \frac{100}{CN} \right) - 10 \right] \quad Ia = 0.2 \cdot S$$

## **TRASFORMAZIONE AFFLUSSI-DEFLUSSI**

Al fine di stimare le portate che defluiscono all'interno del nuovo corso d'acqua, la trasformazione afflussi-deflussi è stata svolta, per ciascun tempo di ritorno, adottando il modello *dell'Idrogramma Unitario SCS (Soil Conservation Service)*, *l'Idrogramma Unitario di Clark* o *il metodo cinematico (Kinematic Wave)* scegliendo di volta in volta per ogni bacino tra l'uno o l'altro metodo, in funzione delle diverse caratteristiche, particolarmente nei riguardi della pendenza media del versante.

Per motivi di congruenza si è scelto di mantenere le stesse modalità di trasformazione afflussi-deflussi impiegate nel già citato studio della *COMUNITA' MONTANA ALTA VAL DI CECINA*. In particolare in blu i bacini analizzati secondo l'Idrogramma Unitario SCS, in arancio quelli secondo l'Idrogramma Initario di Clark, in verde quelli per cui è stata adottata la modellistica cinematica.



### Stima del tempo di corrivazione

Una delle grandezze più importanti da individuare in idrologia per determinare l'idrogramma relativo alla sezione di chiusura di un bacino è rappresentata dal relativo Tempo di Corrivazione. Convenzionalmente il tempo di corrivazione valutato in un determinato punto di una rete di drenaggio è definito come il tempo che occorre alla generica goccia di pioggia caduta nel punto idraulicamente più lontano a raggiungere la sezione di chiusura del bacino in esame.

La stima di tale grandezza spesso può risultare poco agevole e l'impiego delle relative formule di calcolo può dare perciò luogo a valori non univoci che devono essere validati da dati sperimentali, là dove disponibili, o dalla sensibilità del progettista.

Data la difficoltà di tale valutazione, la soluzione più frequentemente adottata attribuisce al tempo di corrivazione la media dei valori calcolati mediante le formule note in letteratura di volta in volta ritenute valide per il bacino in esame, escludendo i valori singolari. Pertanto i tempi di corrivazione sono ottenuti come valore medio delle seguenti formule.

Le formule impiegate nel presente studio sono:

1. La formula di Giandotti Aronica Paltrnieri valida per bacini di dimensioni minori a 10 kmq

$$T_c = \frac{1}{0.8 \cdot \sqrt{H_m}} \cdot \sqrt{A_b + 1.5 \cdot L_b} \cdot M \cdot d$$

2. La formula di Puglisi

$$T_c = 6 \cdot L^{(2/3)} \cdot (H_{max} - H_0)^{-(1/3)}$$

3. La formula SCS Chow, Maidment, Mays (dipendente dal valore del parametron CN, nel caso in analisi posto pari al CNIII determinate come illustrato più Avanti)

$$T_c = \frac{0.095 \cdot L_{max}^{0.8} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{\sqrt{i_v}}$$

4. La formula di Rosso, Bocchiola, De Michele e Pecora

$$T_1 = 0.26L^{0.82} i_v^{-0.2} (1+S)^{0.13}$$

5. La formula di Ferro (a partire dai dati di Kirpich-Chow-Watt-Pezzoli)

$$T_c = \frac{0.02221}{60} \left( \frac{L}{\sqrt{i}} \right)^{0.8}$$

6. La formula di Ferro

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

Nome bacino	Giandotti Aronica Paltrinieri per bacini di dimensioni minori a 10km <sup>^2</sup>	Puglisi	SCS Chow, Maidment, Mays	Ferro (da dati di Kirpich Chow Watt Pezzoli)	Ferro per bonifiche	Rosso, Bocchiola, De Michele e Pecora		TC medio
	minuti	minuti	minuti	minuti	minuti		minuti	
S-BC01	82,7	109,5	60,2	48,9	70,4	121,4		82,2
S-BCa01	68,1	88,2	23,7	23,7	33,9	41,8		46,6
S-SA01	103,4	134,7	51,4	57,3	46,0	96,4		81,5
S-SM01	185,1	213,4	140,1	130,6	126,5	319,6		185,9

### Idrogramma Unitario SCS

L'idrogramma SCS è un idrogramma adimensionale definito dal Soil Conservation Service in base all'analisi di idrogrammi di piena in uscita dalla sezione di chiusura di numerosi bacini idrografici strumentati, di varia misura. Vista la sua semplicità e la sua generalità, rappresenta il metodo maggiormente impiegato nelle analisi di trasformazione afflussi-deflussi.

Questo metodo si basa sulla stima del "lag time" che rappresenta lo sfasamento temporale tra il picco dell'idrogramma ed il baricentro dello idrogramma che lo ha prodotto. Il valore del "lag time" è definito dalla seguente espressione empirica:

$$T_L = \frac{3}{5} \cdot T_c$$

dove:

$T_c$  è il tempo di corrivazione precedentemente determinato

Il metodo dell'Idrogramma Unitario SCS è stato applicato per i bacini S-SM01 e S-SA01

Sottobacino	$T_c$ [min]	$T_L$ [min]
S-SM01	185.9	111.5
S-SA01	81.5	48.9

### Idrogramma Unitario di Clark

L'idrogramma unitario di Clark simula il comportamento del bacino attraverso i due seguenti fenomeni fisici:

- il trasferimento della pioggia netta dal punto generico del bacino idrografico sino alla sezione di chiusura;
- la laminazione della massa liquida dovuta al temporaneo invaso delle precipitazioni sulla superficie del bacino idrografico.

Per la sua definizione si richiede la stima del tempo di corrivazione e della costante di invaso.



La costante di invaso R può essere determinata assumendo per il rapporto

$$\frac{R}{T_c + R}$$

un valore costante all'interno di regioni idrologiche omogenee variando generalmente da valori prossimi a 0.1, tipici solitamente di idrogrammi caratterizzati da un ramo ascendente ripido, (ad esempio idrogrammi generati da bacini urbani o da bacini ad elevata pendenza media) fino a valori prossimi a 0.7, per idrogrammi relativi a bacini agricoli pianeggianti o coperti da boschi con bassa pendenza media.

Per motivi di opportunità, di confronto e di congruenza con gli studi idraulici presenti sul territorio, si è scelto di mantenere per tale parametro i valori assunti nello studio "Sistemazione idraulica dei sottobacini del Botro dei Canonici e del Botro Santa Marta ai fini della messa in sicurezza a fronte di eventi con tempo di ritorno 200 anni" redatto per conto della COMUNITA' MONTANA ALTA VAL DI CECINA da parte di H.S. Ingegneria s.r.l. in quanto approvato dal Comitato Tecnico dell'Autorità di Bacino Toscana Costa.

Il metodo dell'Idrogramma Unitario di Clark è stato applicato per i bacini S-BC01 e S-BCa01.

Sottobacino	Tc [min]	R [h]
S-BC01	82.2	0.391
S-BCa01	46.6	0.518

### Kinematic Wave

Per quanto riguarda tutti gli altri bacini, non di testa del reticolo idraulico, si è scelto di adottare il metodo cinematico, che prescinde dalla determinazione del tempo di corrivazione.

Il metodo cinematico utilizza l'equazione di continuità e l'approssimazione cinematica delle equazioni complete di De Saint Venant per trasformare la precipitazione efficace in deflusso superficiale.

Il bacino viene rappresentato tramite un modello concettuale in cui possono essere definiti due piani rettangolari, percorsi dal deflusso superficiale (overland flow planes) e tre canali che raccolgono il deflusso proveniente dai piani rettangolari.

Il calcolo inizia con l'analisi del deflusso sui piani rettangolari (overland flow planes). HEC-HMS calcola l'idrogramma dei deflussi relativo al primo piano ed al secondo piano. Il deflusso proveniente dai due piani rettangolari viene sommato e poi immesso nel canale principale (main channel) come portata laterale uniformemente distribuita lungo tutto il corso del canale.

L'equazione che modella il fenomeno di trasferimento della massa liquida sia sui versanti (overland flow planes) che nell'alveo del corso d'acqua e l'equazione dell'onda cinematica:

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

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

$$Q = aA^m$$

Il coefficiente di scabrezza relativo al moto sui versanti (che è diverso dal coefficiente di Manning) può essere ricavato dalla seguente tabella:

n	Surface Description
0.011	Smooth asphalt
0.012	Smooth concrete
0.013	Concrete lining
0.014	Good wood
0.014	Brick with cement mortar
0.015	Vitrified clay
0.015	Cast iron
0.024	Corrugated metal pipe
0.024	Cement rubble surface
0.050	Fallow (no residue)
	<b>Cultivated soils</b>
0.060	Residue cover ≤ 20%
0.170	Residue cover > 20%
0.130	Range (natural)
	<b>Grass</b>
0.150	Short grass prairie
0.240	Dense grasses
0.410	Bermuda grass
	<b>Woods</b>
0.400	Light underbrush
0.800	Dense underbrush

\*When selecting n for woody underbrush, consider cover to a height of about 30 mm (0.1 ft). This is the only part of the plant cover that will obstruct sheet flow.

Per ciascun bacino si è allora assegnata l'area, il parametro CN e la pendenza media precedentemente determinati, mentre si sono determinate la lunghezza, la scabrezza e la rugosità dei plane, la lunghezza, la pendenza ed il Manning dei channel. I channel sono stati impostati con sezione trapezia, larghezza al fondo pari a 6 m e sponde in ogni caso con pendenza pari a 1H:1V. Si riportano i parametri impiegati.

Bacino	Plane Length	Slope	Roughness	Channel length	Channel slope	Manning's
S-BC02	157	0.15	0.21	554	0.022	0.05
S-BC03	210	0.17	0.21	571	0.156	0.05
S-BC04	346	0.17	0.21	175	0.010	0.05
S-BC05	141	0.19	0.21	426	0.013	0.05

S-BC07	140	0.2	0.21	450	0.011	0.05
S-BC08	220	0.19	0.21	475	0.013	0.05
S-BC09	359	0.11	0.21	517	0.017	0.05
S-BCa02	115	0.2	0.21	389	0.012	0.05
S-SA02	388	0.16	0.25	1116	0.008	0.06
S-SM02	289	0.13	0.24	376	0.020	0.045
S-SM03	162	0.18	0.24	969	0.007	0.05

Mentre per le grandezze geometriche si è provveduto alla loro rideterminazione sulla base del DTMI10x10, per quanto riguarda i valori di scabrezza si è ritenuto di mantenere quanto indicato nel già citato studio "Sistemazione idraulica dei sottobacini del Botro dei Canonici e del Botro Santa Marta ai fini della messa in sicurezza a fronte di eventi con tempo di ritorno 200 anni".

Inoltre sono stati modellati gli elementi reach e la successiva junction posti a valle dei sottobacini per i quali non è stato possibile applicare (solo per motivi di restituzione dei risultati) l'opzione di route upstream per simulare il trasferimento dell'onda proveniente da monte. L'elemento reach in tal caso è stato modellato secondo il trasferimento dell'onda cinematica, adottando di volta in volta i corrispondenti parametri indicati nella precedente tabella.

#### Modellazione delle briglie esistenti

Sul Botro dei Canonici sono presenti tre briglie a fessura realizzate negli anni 90. Le tre briglie, con i conseguenti invasi a monte, sono state inserite nel modello idrologico dello stato attuale come elementi reservoir (serbatoio).

Ad ogni elemento reservoir sono state associate le curve elevation-storage-discharge, che legano la quota del pelo libero a monte della struttura al volume invasato ed alle portate defluenti a valle dell'opera. Tali curve sono state assunte valide come riportate nello studio "Sistemazione idraulica dei sottobacini del Botro dei Canonici e del Botro Santa Marta ai fini della messa in sicurezza a fronte di eventi con tempo di ritorno 200 anni" redatto dalla COMUNITA' MONTANA ALTA VAL DI CECINA. Le curve impiegate sono riportate nelle seguenti tabelle, anche in questo caso è stata mantenuta la nomenclatura:

	<b>Elevation [mslm]</b>	<b>Storage [1000 mc]</b>	<b>Discharge [mc/s]</b>
	<b>Briglia R-BC03</b>	92,32	0,000
92,40		0,004	0,00
92,50		0,019	0,01
92,60		0,038	0,02
92,80		0,107	0,06
93,00		0,216	0,13
93,30		0,571	0,32
93,55		0,927	0,55
93,80		1,340	0,87
94,05		1,835	1,28
94,30		2,482	1,79
94,55		3,289	2,40
94,80		4,300	3,12
95,05		5,457	3,96
95,10		5,708	4,14
95,30		6,791	4,92
96,00		11,388	8,31
96,10	12,156	9,54	
96,30	13,790	11,63	

	96,50	15,595	14,29
	96,70	17,720	24,26
	96,90	20,146	51,49

<b>Briglia R-BC04</b>	<b>Elevation [mslm]</b>	<b>Storage [1000 mc]</b>	<b>Discharge [mc/s]</b>
	90,04	0,000	0,00
	90,15	0,001	0,01
	90,75	0,036	0,19
	91,30	0,186	0,80
	91,80	0,506	1,85
	92,30	1,053	3,47
	92,80	1,831	5,72
	93,05	2,289	7,11
94,05	6,678	58,27	

<b>Briglia R-BC05</b>	<b>Elevation [mslm]</b>	<b>Storage [1000 mc]</b>	<b>Discharge [mc/s]</b>
	83,82	0,0000	0,00
	84,00	0,0001	0,01
	84,50	0,0002	0,10
	84,85	0,0210	0,29
	85,10	0,0640	0,49
	85,80	0,4580	1,43
	86,80	2,2570	3,93
	87,30	3,9420	5,78
	87,80	6,2970	8,08
	88,07	8,1210	8,63
	88,26	9,6800	10,08
	88,46	11,5630	12,24
	88,56	12,6010	13,49
	88,59	12,9270	15,19
	88,76	14,9280	24,92
	88,86	16,2370	32,86
	88,96	17,6500	42,02
89,06	19,1710	52,25	
89,26	22,2550	75,48	

Recentemente è stata realizzata una nuova briglia sul corso del Botro dei Canonici, denominata R-BC07, pertanto è stata modellata anch'essa come elemento reservoir cui è associata le curva elevation-storage, che lega la quota del pelo libero a monte della struttura al volume invasato. Tale curva è stata ottenuta a partire dal rilievo drone appositamente realizzato.

<b>Briglia R-BC07</b>	<b>Elevation [mslm]</b>	<b>Storage [1000 mc]</b>
	76,695	0,000
	77,262	0,004
	77,701	0,032
	78,013	0,081
	78,355	0,175
	78,674	0,301
	78,975	0,468
	79,235	0,670
	79,477	0,914
	79,694	1,195
	79,913	1,555
	80,134	1,994
	80,326	2,456
	80,498	2,955
	80,654	3,498
80,807	4,130	
80,952	4,828	

	81,119	5,757
	81,282	6,784
	81,587	9,110
	81,886	11,977
	82,195	15,487
	82,498	19,476
	82,820	24,312
	83,110	29,247
	83,394	34,678

Per la modellazione dell'efflusso, tuttavia, si è preferito in questo caso introdurre le dimensioni dell'organo di scarico costituito da una luce ricavata sul paramento della traversa, oltre allo sfioratore di sicurezza superficiale. La modellazione della cassa R-BC07 è stata quindi riprodotta nel modello idrologico, in modo da ottenere l'idrogramma di efflusso.

Le dimensioni degli organi di scarico sono ricavate dal rilievo e sono pari a 1.8 x 1 m per quanto riguarda la luce di fondo impostata a quota 77 msm, mentre lo sfioratore di superficie ha lunghezza di 92,8995 m ed è impostato a quota 82.598 msm.

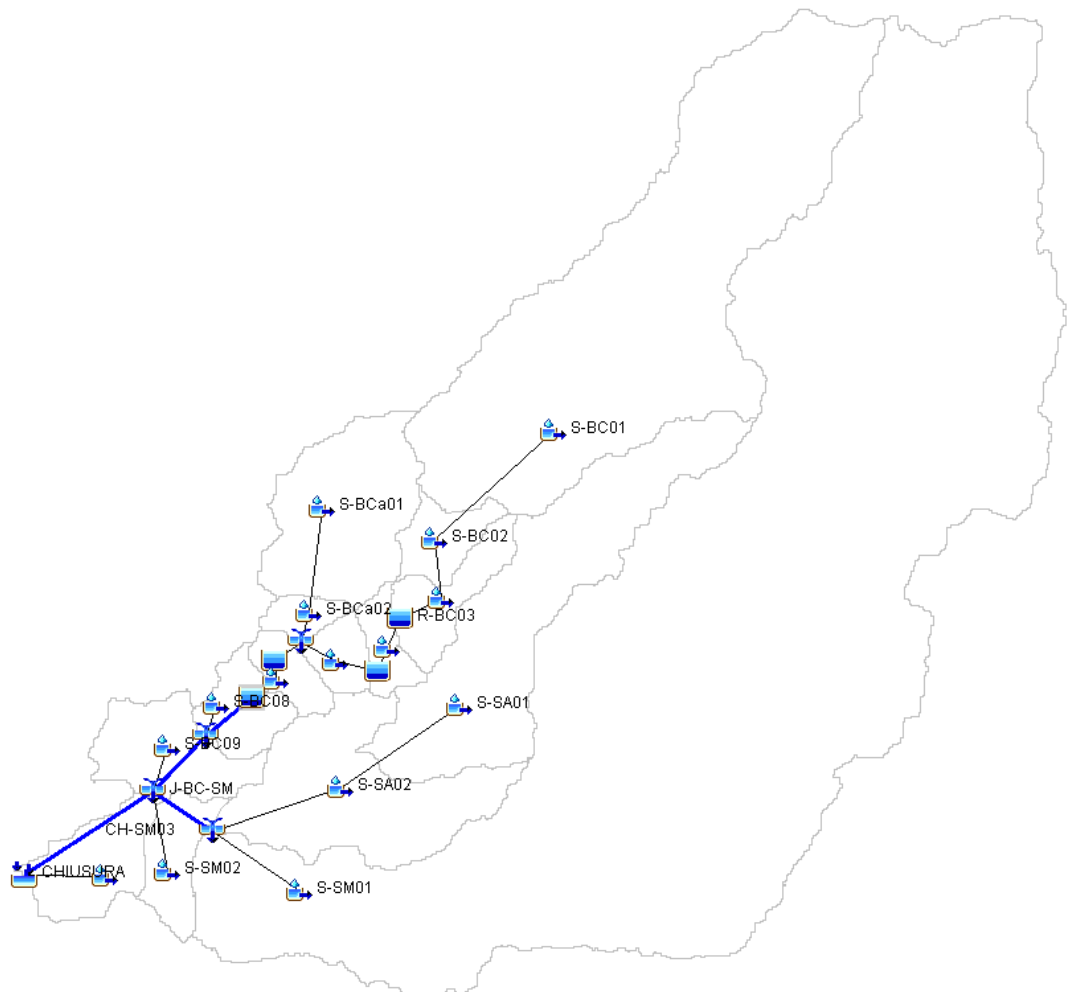
## ***IDROGRAMMI DI PIENA INDAGATI***

Si riportano di seguito lo schema del modello idrologico realizzato con il software HEC-HMS 4.2.1 e gli idrogrammi di piena calcolati per gli elementi di interesse, che costituiranno dato di input per l'analisi idraulica. Come precedentemente esposto, per motivi di continuità negli studi sviluppati e di confrontabilità, si è scelto di impiegare nomenclatura analoga a quella adottata nello studio della Comunità Montana.

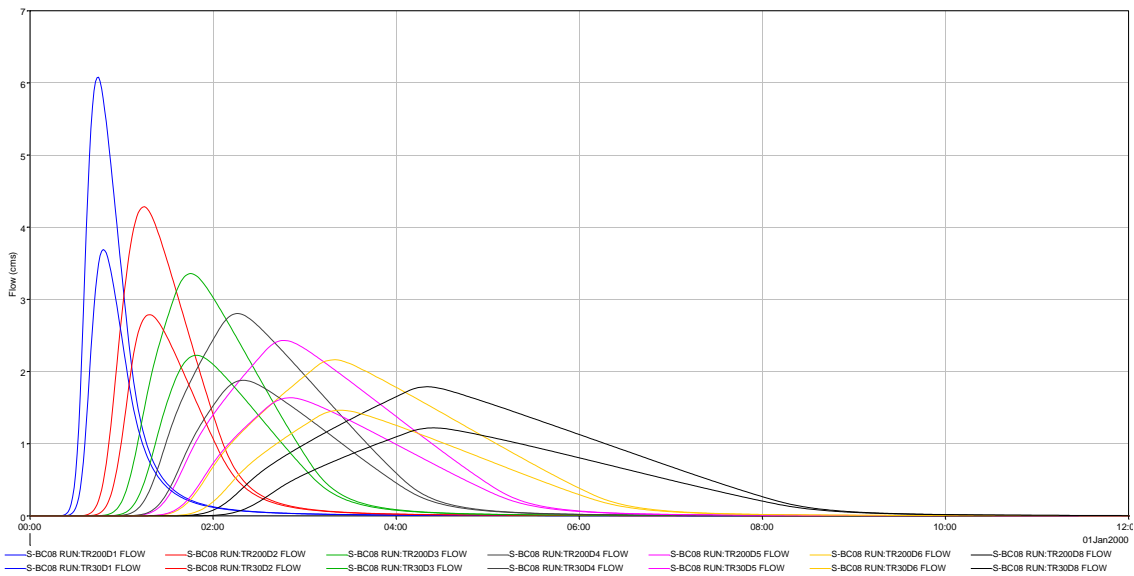
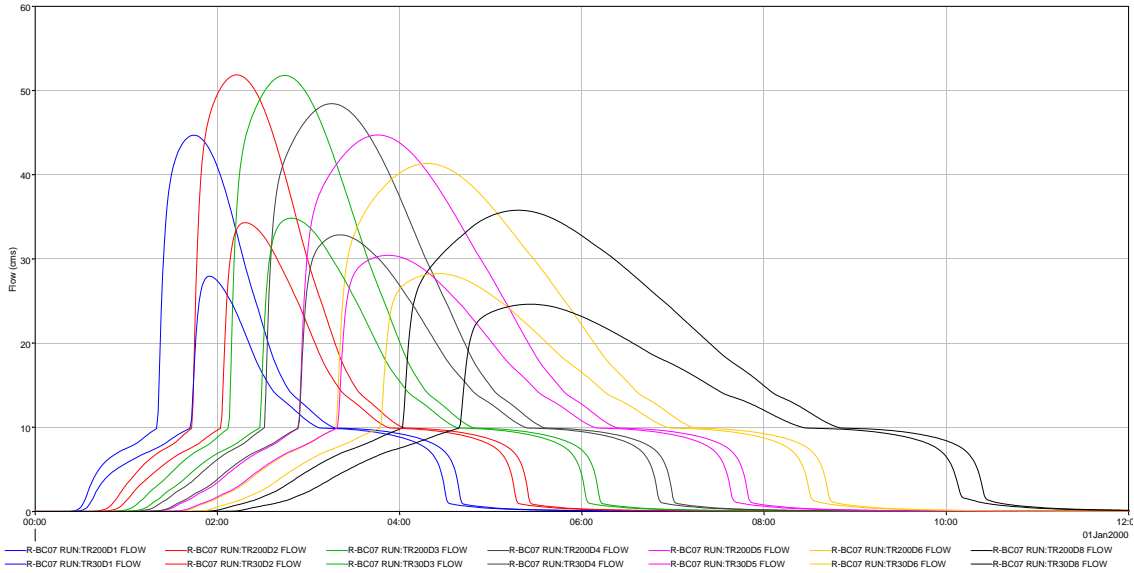
Pertanto gli elementi idrologici preceduti dalla lettera S rappresentano i sottobacini idrografici (elementi subbasin), quelli preceduti dalla lettera R le casse d'espansione in linea (elementi reservoir) e quelli preceduti dalla lettera J le confluenze (elementi junction). La chiusura del modello localizzata in corrispondenza della confluenza tra il Botro Santa Marta e il Rio Ergagno è rappresentata dall'elemento CHIUSURA (posta più a valle della sezione di chiusura del precedente studio).

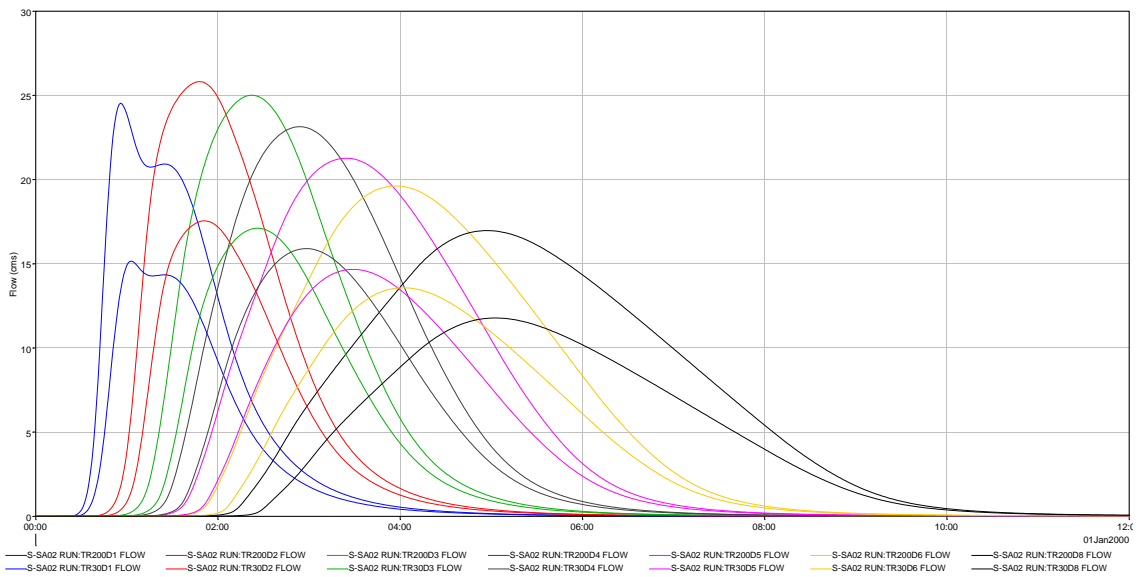
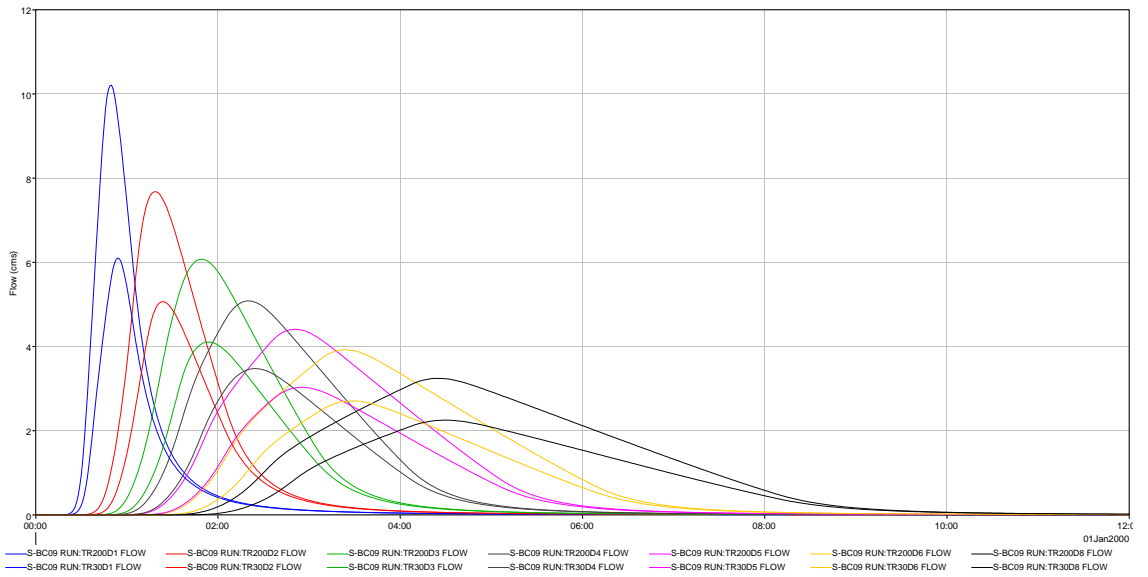
Le lettere BC indicano elementi appartenenti all'asta principale del Botro del Canonici, BCa al suo affluente di destra, SM al Santa Marta e SA al Sant'Antonio.

Gli elementi idrologici R-BC03, R-BC04, R-BC05 e R-BC07 rappresentano le tre briglie esistenti lungo il corso del Botro dei Canonici.

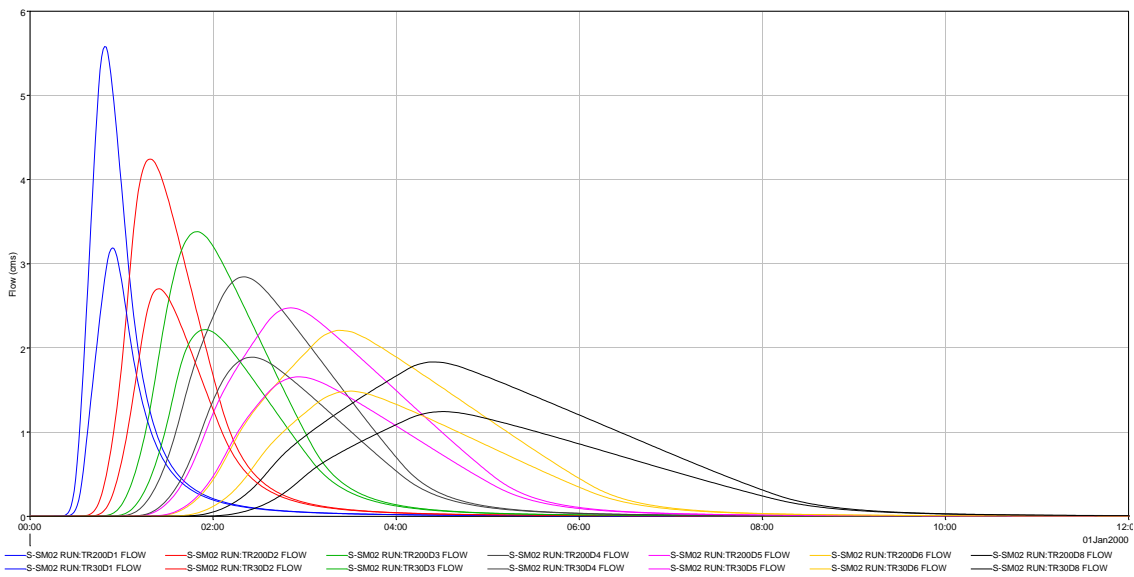
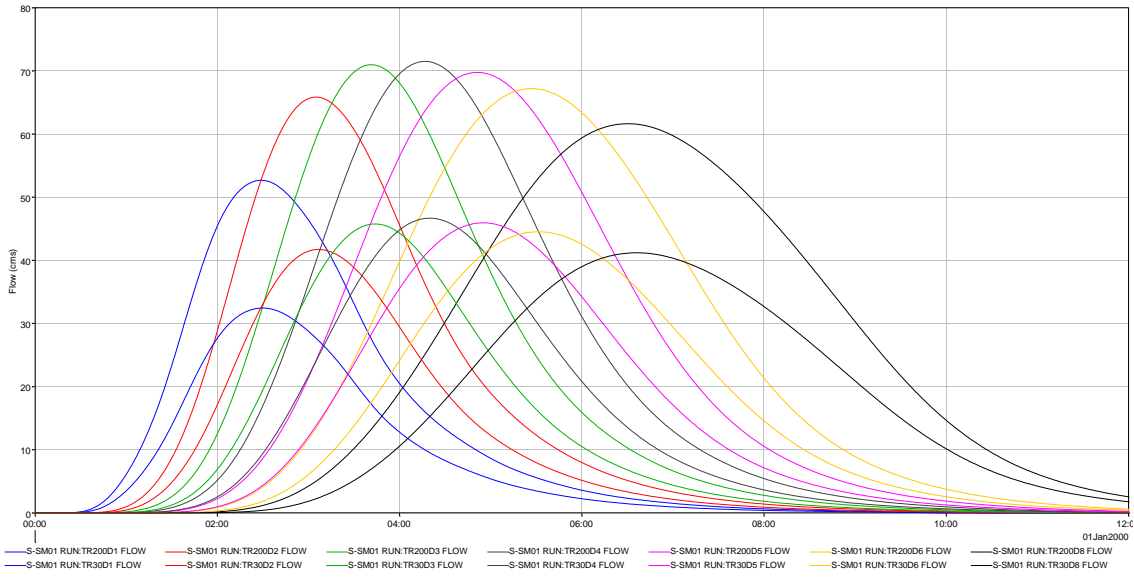


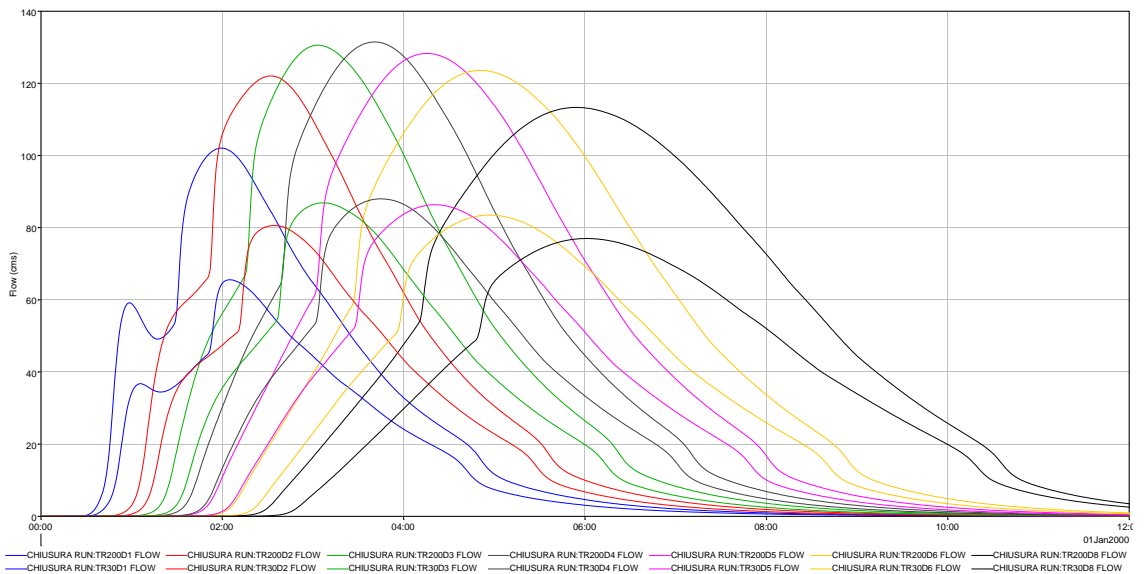
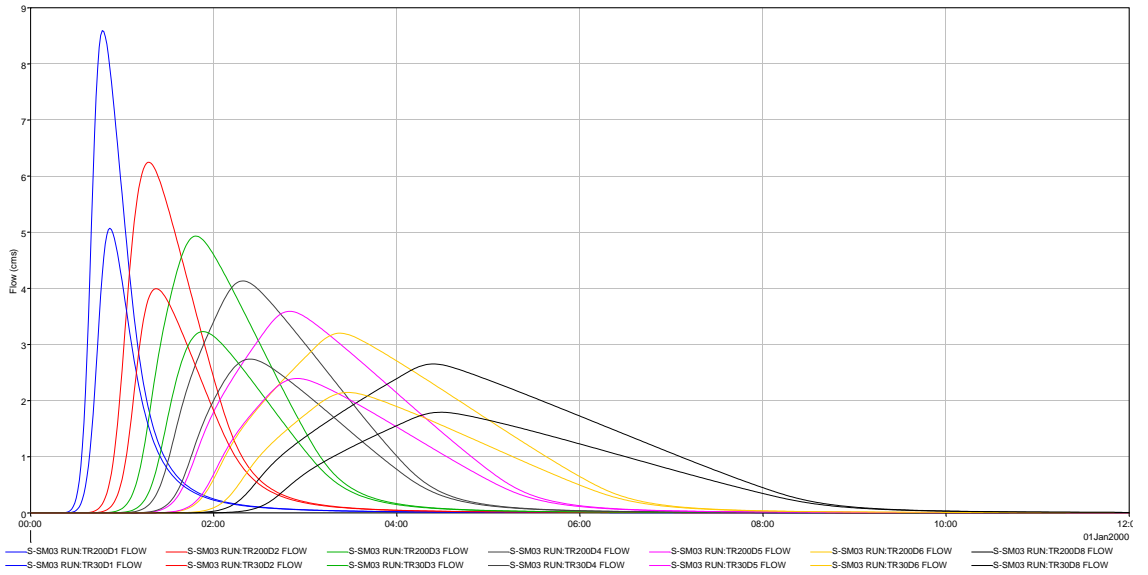
Sulla base del modello idrologico costruito sono state eseguite 14 simulazioni, con durate di precipitazione comprese tra 1 e 8 ore e tempi di ritorno 30 e 200 anni.











## **DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO DI ANALISI IDRAULICA**

Il software HEC-RAS è un sistema integrato predisposto per un uso interattivo tramite un'interfaccia grafica che permette di accedere alle altre componenti quali l'analisi idraulica, l'archiviazione e la gestione dei dati e la visualizzazione dei risultati.

Il sistema dispone di tre componenti principali per la modellazione idraulica secondo lo schema monodimensionale destinate rispettivamente al regime di moto permanente, vario e a quello con fondo mobile.

La componente del sistema di modellazione relativa al regime permanente serve per calcolare la variazione del pelo libero per tali condizioni di moto lungo il corso d'acqua.

Il sistema può considerare sia una rete completa di canali, sia un sistema endoreico e sia infine un singolo corso d'acqua.

La componente di moto permanente è in grado di modellare correnti lenti, veloci e miste.

La procedura di calcolo è basata sulla soluzione delle equazioni dell'energia secondo lo schema monodimensionale. Le perdite di energia considerate sono dovute alla scabrezza (eq. di Manning) ed alla contrazione e/o espansione della vena fluida, attraverso un coefficiente moltiplicatore della variazione dell'energia cinetica. L'equazione dei momenti è utilizzata nelle situazioni in cui il pelo libero dell'acqua subisce variazioni repentine.

Questa situazione comprende la valutazione in corrente mista (es: risalto idraulico), dell'idraulica dei ponti e dei profili in corrispondenza della confluenza tra diversi corsi d'acqua.

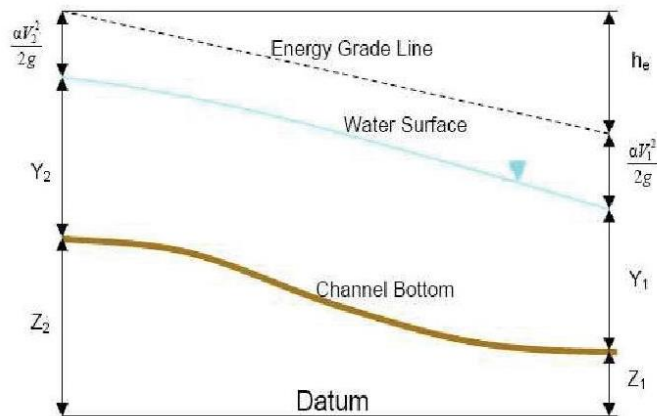
L'effetto di diverse ostruzioni quali ponti, tombini, briglie e strutture in genere lungo i corsi d'acqua può essere considerata nei calcoli idraulici.

Il sistema di calcolo in moto permanente è concepito per applicazioni nella sistemazione dei corsi d'acqua e delle pianure alluvionali e per gli studi finalizzati alla determinazione delle aree allagabili con diversi tempi di ritorno in caso di esondazioni dai corsi d'acqua. È inoltre possibile valutare il cambiamento nelle caratteristiche di moto dovuto alla rettifica della sezione e/o alla realizzazione di argini.

Il modello presuppone che siano fornite tutte le informazioni necessarie, ed in particolare la geometria di un numero sufficiente di sezioni trasversali, la scabrezza che metta in conto le resistenze idrauliche, le condizioni al contorno e le portate.

Il programma consente di inserire sezioni trasversali fittizie, interpolando quelle rilevate, in modo da assicurare che il passo di discretizzazione spaziale non ecceda un assegnato valore limite ed è in grado di modellare il comportamento di canali naturali e artificiali tenendo conto dell'influenza sul moto di manufatti di vario tipo quali ponti, briglie, paratoie che influenzano le caratteristiche della corrente.

Per l'analisi in moto permanente HEC-RAS determina il profilo del pelo libero tra una sezione e la successiva mediante la procedura iterativa denominata standard step, risolvendo l'equazione del bilancio energetico, andando ad analizzare solamente la componente della velocità diretta secondo la direzione prevalente del moto.



$$Y_2 + Z_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Dove:

- $Y_1, Y_2$  sono i tiranti idrici;
- $Z_1, Z_2$  sono le quote geodetiche;
- $V_1, V_2$  sono le velocità medie;
- $a_1, a_2$  sono i coefficienti di ragguglio delle altezze cinetiche;
- $g$  è l'accelerazione di gravità;
- $h_e$  è la perdita di carico totale nel tratto considerato;

Il termine  $h_e$  dipende sia dalle perdite per attrito che da quelle per contrazione ed espansione. Esso si può valutare mediante la seguente relazione:

$$h_e = L S_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$$

con:

- $L$  la lunghezza del tratto fluviale mediata sulle portate, calcolata come segue

$$L = \frac{L_{lob} Q_{lob} + L_{rob} Q_{rob} + L_{ch} Q_{ch}}{Q_{lob} + Q_{rob} + Q_{ch}}$$

Dove il pedice *lob*, *rob* e *ch* indica la golenia sinistra, destra e il canale centrale, relativamente alle lunghezze e alle portate;

- $S_f$  è la cadente della linea dei carichi totali;
- $C$  è il coefficiente di espansione/contrazione compreso tra 0 e 1, che tiene conto delle perdite di carico dovute all'espansione e alla contrazione della vena fluida.

Il primo termine rappresenta la perdita totale per attrito, prodotto tra la distanza tra le due sezioni e la cadente media. Il programma prevede diverse possibilità di calcolo della cadente, che viene determinata presupponendo una suddivisione della sezione d'alveo in sottosezioni all'interno delle quali la velocità possa ritenersi con buona approssimazione costante. Per ciascuna di queste sottosezioni (golena sinistra, alveo e golena destra) è possibile assegnare un diverso valore del coefficiente di Manning da adottare nel calcolo.

Il secondo termine della equazione per il calcolo delle perdite di carico rappresenta invece il contributo dovuto alla contrazione ed espansione dell'area bagnata; tali perdite sorgono nel momento in cui si abbia un allargamento o restringimento della sezione che determini una situazione di corrente non lineare. Il coefficiente C varia in un intervallo compreso tra 0.1 e 1 per correnti subcritiche, mentre in caso di correnti veloci generalmente si assumono valori inferiori.

L'altezza del pelo libero, in riferimento ad una assegnata sezione, viene determinata mediante una risoluzione iterativa delle equazioni (1) e (2). Il modello fornisce inoltre i valori dell'altezza critica nelle diverse sezioni fluviali. Qualora si verificano transizioni da corrente lenta a veloce o viceversa, in tali segmenti di asta fluviale l'equazione di bilancio energetico è sostituita dall'equazione globale di equilibrio dinamico o dei momenti.

Il modello HEC-RAS consente anche di modellare l'effetto indotto sulla corrente dalla presenza di attraversamenti fluviali, nel caso che il deflusso attraverso il ponte avvenga a pelo libero ma anche in pressione. La perdita di energia causata dal ponte è divisa in tre parti: in primo luogo le perdite che si hanno nella zona immediatamente a valle del ponte dove, generalmente, si ha un'espansione della corrente. Sono poi considerate le perdite di energia che si verificano durante l'attraversamento del ponte, nonché le perdite che si hanno immediatamente a monte, ove la corrente subisce una contrazione. Per i coefficienti di contrazione ed espansione si sono quindi adottati rispettivamente i valori di 0.3 e 0.5.

In caso di simulazione in moto vario il software HEC-RAS utilizza le equazioni di De Saint Venant secondo differenti metodi di risoluzione a seconda che l'analisi si svolga in condizioni di corrente lenta, veloce o mista.

Equazione di continuità:

$$\frac{(\partial A)}{(\partial t)} + \frac{(\partial(\Phi \cdot Q))}{(\partial x_c)} + \frac{(\partial[(1-\Phi) \cdot Q])}{(\partial x_f)} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto:

$$\frac{(\partial Q)}{(\partial t)} + \frac{(\partial(\Phi^2 Q^2 / A_c))}{(\partial x_c)} + \frac{(\partial((1-\Phi^2) Q^2 / A_f))}{(\partial x_f)} + g A_c \left[ \frac{(\partial Z)}{(\partial x_c)} + S_{f_c} \right] + g A_f \left[ \frac{(\partial Z)}{(\partial x_f)} + S_{f_f} \right] = 0$$

con:

$$Q_c = \Phi \cdot Q ; \quad \Phi = (K_c) / (K_c + K_f)$$

Per approfondimenti sulle equazioni ed algoritmi di calcolo si rimanda alla modilistica di HEC-RAS, ed in particolare all'Hydraulic Reference Manual.

## MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE

Il modello matematico bidimensionale utilizza le equazioni di continuità (o conservazione della massa) e della quantità di moto, risolte con uno schema ai volumi finiti.

Assumendo il fluido incomprimibile l'equazione differenziale di continuità in moto vario si riduce:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot v)}{\partial y} + q = 0$$

In cui u e v sono rispettivamente le componenti di velocità lungo le direzioni x ed y.

Quando la dimensione orizzontale caratteristica dell'area di deflusso è molto maggiore della verticale, gli effetti legati alla componente verticale della velocità possono essere trascurati, assumendo una distribuzione idrostatica delle pressioni. Assumendo quindi costante la densità del fluido l'equazione di conservazione della quantità di moto si riduce:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f \cdot u + f \cdot v$$

Dove  $V_t$  è il coefficiente di viscosità turbolenta,  $C_f$  il coefficiente di attrito al fondo ed  $f$  è il coefficiente di Coriolis.

Per la modellazione del campo di moto HEC-RAS impiega l'approccio batimetrico con il quale riesce a rappresentare informazioni topografiche dettagliate pur utilizzando celle di calcolo di dimensioni maggiori, ricavandone la legge di variazione delle grandezze idrauliche (curva di invaso della cella e sezione idraulica lungo il bordo) con la quota del pelo libero. Tale metodologia risolutiva consente di raggiungere un elevato dettaglio dei risultati, abbattendo drasticamente i tempi computazionali rispetto ad altri software.

Preme sottolineare che nel modello in analisi per tutte le aree 2D indagate è stato applicato il modulo computazionale **Full Momentum** che adotta per il calcolo le intere equazioni 2D di De Saint Venant, senza trascurarne alcun termine, assicurando la massima accuratezza del risultato a scapito di un maggior onere computazionale.

## **MORFOLOGIA DELL'ALVEO**

La modellazione morfologica del territorio, necessaria come dato di input per le sezioni geometriche da introdurre nel software HEC-RAS, è stata ottenuta a partire dai rilievi topografici forniti dal Comune di Volterra e dal Genio Civile sede di Pisa.

Per quanto riguarda la modellazione delle aree bidimensionali, infatti, il Comune ha provveduto all'implementazione di apposita campagna di rilievo a mezzo drone, sviluppata dall'Ing. Paolo Corradeghini, di cui si allega relazione metodologica che ne esplica le modalità esecutive. L'ingegnere, in conclusione del suo lavoro, ha restituito una morfologia DTM 0.5x0.5 m che è stata impiegata quale dato di input nella modellazione.

Per quanto riguarda invece la modellazione monodimensionale delle sezioni d'alveo, esse sono state introdotte come fornite direttamente dagli Uffici del Genio Civile, ottenute dalla campagna di rilievo mediante stazione totale e GPS condotta dal Geom. Silvio Oliviero con studio in San Giuliano Terme, nell'ambito del finanziamento di cui alla Delibera della Giunta Regionale n. 1194 del 23/12/2013 "L.R. 91/98 – Approvazione del Documento Annuale per la Difesa del Suolo per l'anno 2014".

Si è inoltre provveduto ad epurare la geometria delle sezioni fornite dai punti descrittivi delle aree allagabili descritte dal modello bidimensionale, e da quelle opere d'arte non rilevanti dal punto di vista idraulico. In particolare abbiamo ritenuto escludere il muro di sponda al Botro Santa Marta posto lungo l'area industriale. Esso infatti è realizzato mediante elementi prefabbricati in cemento armato, talvolta danneggiati o sconnessi, comunque non in grado di contenere la spinta idrostatica della corrente in alveo, e svolge pertanto una mera funzione di recinzione.

Viceversa dall'analisi planimetrica dei punti quotati sono state individuate particolarità ed opere d'arte non compiutamente descritte dalle sezioni fornite, ed abbiamo pertanto provveduto ad implementare apposite sezioni trasversali.

A margine si rappresenta la disponibilità di ulteriori rilievi GPS che non sono stati impiegati direttamente nelle modellazioni, ma sono stati riverificati ed implementati dall'Ing. Corradeghini, al fine di verificarne la coerenza (nel dettaglio si faccia riferimento alla relazione dell'Ingegnere):

- Rilievo strumentale eseguito dallo Studio Bani Franceschini Rossi;
- Rilievo strumentale eseguito da HydroGeo di Firenze in occasione del progetto "Interventi di riassetto idraulico sul Botro dei Canonici e sul Botro di S. Marta in località Saline di Volterra".

La schematizzazione adottata per il modello è quindi di tipo monodimensionale in alveo e bidimensionale extra alveo, interconnesse tra loro mediante apposite *lateral structures*.

Tutte le modellazioni bidimensionali sono state svolte adottando maglie di calcolo a celle quadrate di lato 5x5 m.

Si riporta la rappresentazione planimetrica del modello studiato.





## **COEFFICIENTE DI SCABREZZA**

Parametro fondamentale per la modellazione dell'alveo all'interno del solutore adottato, è costituito dal coefficiente di scabrezza di Manning. Tale parametro deve essere definito sia per quanto riguarda la modellistica idraulica in alveo, sia per quella bidimensionale.

Per quanto riguarda i valori di Manning adottati per la modellistica idraulica in alveo, si è fatto riferimento ai valori indicati nella relazione idrologico-idraulica allegata al progetto definitivo "Rilievi, studio idrologico-idraulico e progettazione degli interventi di messa in sicurezza dell'area artigianale in località Pozzo San Giusto nella frazione Saline di Volterra – Comune di Volterra", finanziato nell'ambito del documento annuale difesa del suolo 2014 e redatto dalla Regione Toscana.

In tale studio, infatti, l'analisi sviluppata ha analizzato gli eventi verificatisi nei giorni 21 e 24 ottobre 2013, per i quali sono note le caratteristiche dell'evento meteorico nonché l'entità dei battenti di allagamento determinati a seguito di apposite ricognizioni effettuate dai tecnici regionali della sede di Pisa. Le simulazioni hanno quindi consentito di tarare il modello in termini di coefficiente di Manning, riverificati poi sulla base delle effettive condizioni riscontrate in alveo. Poiché il modello implementato in tale studio comprendeva il solo Santa Marta sino alla confluenza con il Sant'Antonio, i valori del coefficiente di Manning per gli altri tratti di alveo sono stati assunti per analogia confrontando le caratteristiche dell'alveo.

<b>Tratto d'alveo</b>	<b>Area golenale sinistra</b>	<b>Alveo attivo</b>	<b>Area golenale destra</b>
Botro dei Canonici	0.08	0.05	0.10
Botro Sant'Antonio sez. 9-6	0.15	0.12	0.15
Botro Sant'Antonio sez. 5-1	0.12	0.10	0.12
Botro Santa Marta sez. 59-52	0.15	0.12	0.15
Botro Santa Marta sez. 51-47	0.15	0.10	0.08
Botro Santa Marta sez. 46-38	0.08	0.08	0.10
Botro Santa Marta sez. 37-26	0.08	0.08	0.08
Botro Santa Marta sez. 25-15	0.08	0.05	0.08
Botro Santa Marta sez. 14-13.9	0.08	0.033	0.08
Botro Santa Marta sez. 13.8-12	0.08	0.014	0.08
Botro Santa Marta sez. 11.5	0.08	0.018	0.08
Botro Santa Marta sez. 11-9.33	0.08	0.033	0.08
Botro Santa Marta sez. 9-1	0.08	0.05	0.08

Il coefficiente di scabrezza delle celle bidimensionali è stato assegnato a partire dall'uso del suolo derivato dal progetto Corine, secondo la seguente tabella di corrispondenza (R. Pestana et al. 2013, Calibration of 2d hydraulic inundation models in the floodplain region of the lower Tagus river, ESA Living Planet Symposium 2013).

Code	Designation	n
111	Continuous urban fabric	0.230
112	Discontinuous urban fabric	0.115
121	Industrial or commercial units	0.230
122	Roads and rail networks and associated land	0.038
124	Airports	0.230
131	Mineral extraction sites	0.104
132	Dump sites	0.115
133	Construction sites	0.115
142	Sport and leisure facilities	0.023
211	Non-irrigated arable land	0.043
212	Permanently irrigated land	0.043
213	Rice fields	0.023
221	Vineyards	0.043
222	Fruit trees and berry plantations	0.043
223	Olive groves	0.043
231	Pastures	0.298
241	Annual crops associated w/permanent crops	0.043
242	Complex cultivation patterns	0.023
243	Agriculture, w/significant natural vegetation	0.058
244	Agro-forestry areas	0.058
311	Broad-leaved forest	0.230
312	Coniferous forest	0.127
313	Mixed forest	0.230
321	Natural grasslands	0.039
322	Moors and heathland	0.058
323	Sclerophyllous vegetation	0.058
324	Transitional woodland-shrub	0.058
331	Beaches, dunes, sands	0.138
332	Bare rocks	0.104
333	Sparsely vegetated areas	0.104
334	Burnt areas	0.104
411	Inland marshes	0.115
511	Water courses	0.035
512	Water bodies	0.035

## **MODELLAZIONE DELLE OPERE D'ARTE**

La modellazione degli attraversamenti e di altre opere geometricamente rilevanti è stata ricavata dal rilievo geometrico fornito direttamente dagli Uffici del Genio Civile, ottenute dalla campagna di rilievo mediante stazione totale e GPS condotta dal Geom. Silvio Oliviero con studio in San Giuliano Terme, nell'ambito del finanziamento di cui alla Delibera della Giunta Regionale n. 1194 del 23/12/2013 "L.R. 91/98 – Approvazione del Documento Annuale per la Difesa del Suolo per l'anno 2014". La geometria delle opere individuate è stata così ricollegata alla morfologia derivante dal rilievo drone e introdotta nel software di calcolo HEC-RAS.

Oltre all'introduzione geometrica dell'attraversamento, sono stati definiti i parametri di calcolo; Per quanto riguarda il "low flow method" è stato impiegato il metodo dell'energia a standard step. Per quanto riguarda invece il "high flow method" si è scelto il metodo noto come "pressure and/or weir" per il quale è stato assegnato un coefficiente per il flusso sommerso pari a 0.8, mentre è stato assegnato 1.44 per il coefficiente weir.

Per quanto riguarda i Contraction/Expansion Coefficients sono stati adottati rispettivamente i valori di 0.1 e 0.3 in tutte le sezioni modellate dell'alveo, localmente incrementati rispettivamente a 0.3 e 0.5 per le sezioni immediatamente a monte e a valle di tutti gli attraversamenti o altre singolarità che impongono sollecitazioni al normale deflusso.

Inoltre sono state definite le "ineffective flow areas" per le sezioni di monte e di valle, al fine di escludere le porzioni di sezione che non partecipano al deflusso.

Nel caso del tombamento al di sotto del parcheggio pubblico a valle della confluenza tra Santa Marta e Botro dei Canonici, al fine di tenere in conto della variabilità della sezione idraulica lungo il suo sviluppo, si è preferito procedere alla modellazione mediante l'implementazione di appositi "lid" nelle sezioni descrittive, attivando la funzione "Preissmann Slot".

Nel caso del lungo tombamento lungo il Botro dei Canonici, invece, è stata impiegata la modellazione mediante culvert cui è stato assegnato coefficiente di manning pari a 0.014.

Anche per quanto riguarda i salti di fondo si è scelto di impiegare la funzionalità "inline structures" assegnando un coefficiente weir pari a 1.44.

La connessione tra l'alveo monodimensionale e le aree bidimensionale è stata invece implementata impiegando le "lateral structures" la cui geometria è dettata dalle sezioni di rilievo GPS. Quale metodo di calcolo della connessione con le aree bidimensionali è stata impiegata la "normal 2D equation domain" attivando la funzione che prende in conto la velocità lungo il contorno dell'area 2D.

## **CONDIZIONI AL CONTORNO**

Per consentire l'avvio della simulazione di deflusso, è ancora necessario introdurre le condizioni al contorno.

Le condizioni al contorno devono essere obbligatoriamente definite nelle sezioni di monte e di valle del modello monodimensionale, pena il mancato avvio della simulazione; sono tuttavia introducibili numerose condizioni al contorno aggiuntive utili a migliorare l'aderenza del modello alla realtà, nonché per introdurre afflussi laterali.

Nella maggior parte dei modelli è conveniente introdurre come condizione al contorno in corrispondenza della sezione di monte l'idrogramma calcolato per il bacino chiuso a tale sezione; per la sezione di valle è solitamente definita la pendenza della linea dell'energia in condizioni di deflusso a moto uniforme, per la quale è possibile assumere generalmente il medesimo valore di pendenza al fondo desumibile dal profilo longitudinale del corso d'acqua nel tratto terminale. Talvolta, in presenza di rigurgiti o altre condizioni note, si sceglie di introdurre nella sezione di valle valori definiti per la quota liquida. Quando poi il corso d'acqua riceve contributi da bacini posti lungo il percorso o da affluenti, è possibile inserire, come ulteriori condizioni al contorno, idrogrammi distribuiti o concentrati. Molte altre sono infine le possibili condizioni al contorno impiegate però meno frequentemente.

### Condizione al contorno di monte

La condizione al contorno di monte è stata definita dagli idrogrammi calcolati nella modellazione idrologica, a cui si rimanda per approfondimenti.

In particolare alcuni degli idrogrammi calcolati sono stati introdotti nel modello come localizzati in specifiche sezioni, o distribuiti uniformemente lungo tratti del corso d'acqua, come descritto nella seguente tabella.

Idrogramma	Tipo introduzione idrogramma	Corso d'acqua di riferimento	Sezioni di introduzione
R-BC07	Localizzato	Botro dei Canonici	13
S-BC08	Distribuito	Botro dei Canonici	Da 11 a 8
S-BC09	Distribuito	Botro dei Canonici	Da 9 a 8
S-SA02	Localizzato	Botro Sant'Antonio	9
S-SM01	Localizzato	Botro Santa Marta	59
S-SM02	Distribuito	Botro Santa Marta	24.875*-19.5*
S-SM03	Distribuito	Botro Santa Marta	17-2

### Condizione al contorno di valle

Per quanto riguarda invece la condizione al contorno di valle è stata assegnata la pendenza Normal Depth pari a 0.007 m/m.

## ***RISULTATI DELLE MODELLAZIONI E ANALISI CRITICA***

Si riportano nell'apposito allegato i profili idraulici, i valori tabellari e le sezioni di calcolo.

Nelle allegate tavole grafiche si riportano invece i risultati sotto forma di battenti idraulici di esondazione determinati come inviluppo dei massimi ottenuti da ciascuna delle simulazioni, indipendentemente dalla durata dell'evento meteorico che li ha determinati. Si mantiene invece la distinzione tra gli eventi meteorici aventi TR30 e quelli aventi TR200.

Gli stessi elaborati grafici sono stati prodotti per rappresentare i valori di inviluppo delle velocità di deflusso derivanti dal modello, ed il livello di magnitudo calcolata secondo le indicazioni di cui alla L.R. 41/2018.


Negli elaborati grafici allegati sono riportati i risultati delle elaborazioni, così come restituiti dal modello. Alcuni di tali dati quali la perimetrazione delle aree a diversa pericolosità idraulica e la cartografia della magnitudo sono stati rielaborati in stretto accordo col il geol. Emilio Pistilli, restituendo nuove cartografie a cui si rimanda, frutto di più ampie considerazioni urbanistiche, ed estese a tutto il territorio Comunale.

Conseguentemente al presente studio sono state allegate le tavole da Tav.01 a Tav.03 che rappresentano i risultati grezzi derivanti dal modello idraulico ed ottenuti come inviluppo come sopra descritto. Ai fini urbanistici poi, tali elaborati sono stati opportunamente adeguati al fine di rimuovere quelle singolarità intrinseche nella definizione del modello idraulico, omogeneizzando il territorio. Gli elaborati restituiti alle tavole Tav.04 e Tav.05 sono stati pertanto resi conformi alla perimetrazione delle pericolosità così come definita in accordo con il Geol. Emilio Pistilli, e costituiscono il dato finale da considerare nelle pianificazioni urbanistiche. Parallelamente si consegnano comunque tutti gli elaborati in formato interrogabile all'interno di un progetto QGIS 3.14.

Nei giorni dal 21 al 24 ottobre 2013 il territorio circostante l'abitato di Volterra è stato colpito da un evento meteorico eccezionale. In particolare per l'evento del 23 ottobre si è registrata un'altezza di pioggia cumulata pari a 108 mm in circa 3,5 ore. Tale evento pluviometrico ha evidenziato palesi problematiche del reticolo idrografico che hanno comportato l'allagamento del centro abitato di Saline di Volterra, con particolare riferimento alla scuola media ed il limitrofo parcheggio pubblico, nonché degli impianti produttivi/artigianali esistenti lungo il Botro Santa Marta in località Pozzo San Giusto.

In conseguenza di ciò, nell'allegato A, parte II, del Documento Annuale per la Difesa del Suolo per l'anno 2014, approvato con Delibera della Giunta Regionale n. 1194 del 23/12/2013, la Regione Toscana è stata individuata quale Ente Attuatore dell'intervento "Rilievi, studi idrologico-idraulici e progettazione degli interventi di messa in sicurezza dell'area artigianale in località Pozzo San Giusto nella frazione di Saline di Volterra".

Nell'ambito di tale intervento i tecnici regionali della sede di Pisa hanno svolto apposite ricognizioni con le quali sono state riscontrate esondazioni del Botro Santa Marta a monte dell'abitato che hanno interessato l'area artigianale adiacente al corso d'acqua con battenti di oltre 1.5 m.

 www.sta-eng.it via del Rio, 2 - 56025 PONTERA PI tel. +39.0587.608233	21.03.08 Relazione idrologico idraulica - nuovo modello.docx
	Data: Marzo 2021

Dalla lettura del Report verifiche e sopralluoghi del 22/11/2013 redatto dall'Ufficio Tecnico del Genio Civile sede di Pisa, si evince che per l'evento meteorico del 23 ottobre 2013 è stato associato il tempo di ritorno duecentennale TR200, direttamente paragonabile quindi alle analisi svolte nel presente studio. In particolare il report attesta il raggiungimento di un battente massimo di circa 1.5-1.8 m in corrispondenza di alcune abitazioni e strutture pubbliche tra le quali la scuola media ed il prospiciente parcheggio, valori che lo stesso report riferisce essere molto probabilmente determinati anche dalla presenza del rilevato della ex linea ferroviaria Saline – Volterra che ha svolto una funzione di sbarramento al deflusso delle acque. Analizzando gli elaborati grafici allegati, rappresentativi degli output delle modellazioni da noi implementate, è possibile verificare battenti congruenti con i valori sopra indicati, raggiungendo il valore massimo di quasi 2 m in corrispondenza della porzione sud-est del parcheggio.

Allo stesso modo, dalla relazione e relativi allegati dello studio "Rilievi, studio idrologico-idraulico e progettazione degli interventi di messa in sicurezza dell'area artigianale in località Pozzo San Giusto e nella frazione di Saline di Volterra", si evince come in località Pozzo San Giusto si siano riscontrati battenti dell'ordine di 1.5 m corrispondenti alla quota massima di 82.21 mslm. Dall'analisi dei risultati della modellistica da noi implementata si determinano invece battenti massimi in tale area dell'ordine di 1.3 m cui corrisponde la quota di 81.8 mslm, comunque paragonabili a quanto verificatosi in occasione dell'evento del 23 ottobre.