

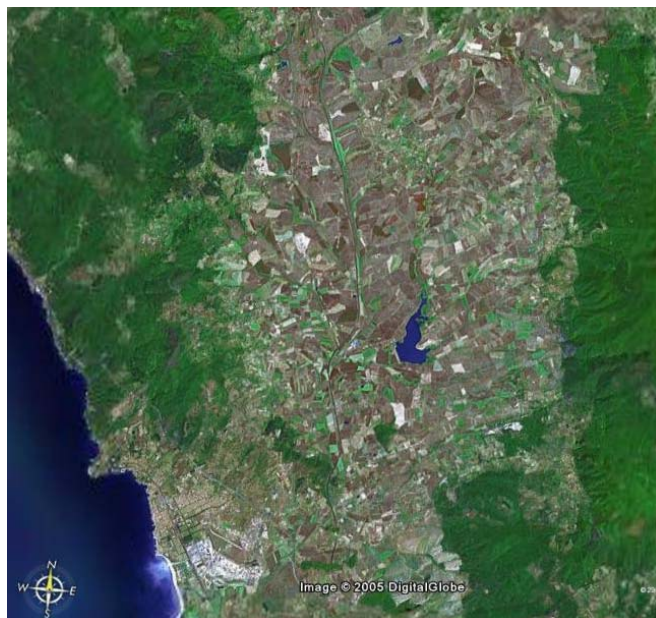
**COMUNE DI ROSIGNANO MARITTIMO**

**Provincia di Livorno**

**COMUNE DI SANTA LUCE**

**Provincia di Pisa**

## **REGIMAZIONE IDRAULICA DEL FIUME FINE**



## **PROGETTO PRELIMINARE**

Committente:



**SOLVAY CHIMICA ITALIA S.p.A.**  
*Via Piave, 6 - 57013 Rosignano Solvay (LI)*

Progettazione:



***H.S. Ingegneria S.r.l.***

Via Don Aldo Mei 64k, 55012 Capannori (LU)

e.mail: [hsingegneria@tin.it](mailto:hsingegneria@tin.it)

Tel. Fax: 0583-429514

***Ing. Simone Pozzolini***

*Ordine degli ingegneri della  
Provincia di Firenze n.4325*

ELABORATO

**B**

Relazione idrologica

1. INQUADRAMENTO GENERALE DEL BACINO DEL FIUME FINE.....	2
1.1 Caratteristiche geomorfologiche.....	2
1.2 Caratteristiche geologiche .....	5
1.3 Dati cartografici.....	5
2. STUDIO IDROLOGICO DEL BACINO DEL FIUME FINE.....	6
2.1 Modello delle piogge intense: definizione degli afflussi al bacino.....	8
2.1.1 Il modello TCEV .....	8
2.2.2 Area di indagine per la regionalizzazione delle piogge intense.....	9
2.2.3 Applicazione al bacino del Fine: curva di possibilità pluviometrica .....	11
2.2.4 Curve di possibilità pluviometrica puntuali e ragguaglio delle piogge all'area.....	17
2.2.5 Ietogramma di progetto .....	18
3. MODELLI DI TRASFORMAZIONE AFFLUSSI-DEFLUSSI .....	21
3.1 Le perdite di bacino.....	21
3.2 La trasformazione afflussi deflussi.....	25
3.2.1 Il modello di Nash e l'idrogramma unitario istantaneo geomorfologico (GIUH) .....	25
3.2.2 L'idrogramma unitario del Soil Conservation Service (SCS) .....	28
3.2.3 Note sulla scelta del tempo di corrivazione.....	29
3.2.4 Il Metodo dell'Onda Cinematica (Kinematic Wave).....	30
4. MODELLI DI PROPAGAZIONE A MOTO VARIO DEI DEFLUSSI .....	33
5. RISULTATI: GLI IDROGRAMMI DI PIENA E LE PORTATE MASSIME CON TEMPO DI RITORNO DUECENTENNALE .....	35
6. GLI IDROGRAMMI DI PIENA E LE PORTATE MASSIME CON TEMPO DI RITORNO CINQUECENTENNALE.....	35

## **RELAZIONE IDROLOGICA**

### **1. INQUADRAMENTO GENERALE DEL BACINO DEL FIUME FINE**

Il bacino del fiume Fine è delimitato dal bacino del Cecina a sud e ad est, e dal bacino dell'Era a nord. Sul lato ovest è delimitato dallo spartiacque dei monti livornesi.

Si tratta di un bacino prevalentemente collinare. I rilievi maggiori sono costituiti dalle cime dei monti livornesi, di poco superiori a 400 metri e dalle alture di Castellina Marittima, che raggiungono i 674 m.s.l.m. con il monte Vitalba.

Il Fine nasce a nord di Santa Luce. Nel primo tratto del suo corso scorre con direzione est-ovest, dopodiché nei pressi di località Molinaccio cambia direzione seguendo un orientamento nord-sud ed immettendosi poi nell'invaso artificiale Solvay, posto in località Casacce nel comune di Santa Luce. Il bacino sotteso a monte dell'invaso è di 40.4 kmq.

A valle dell'invaso Solvay il Fine riceve il suo maggior affluente, il torrente Savolano, dopodiché scorre con alveo molto incassato tra la statale 206 e la ferrovia Collesalveti-Vada fino ad aggirare la collina di Rosignano Marittimo, sottopassando la Statale 206.

A valle del ponte sulla 206 il Fine riceve il torrente Marmolaio, suo secondo maggior affluente, ed inizia il suo corso nella pianura costiera, caratterizzato da pendenze ridotte e presenza di numerosi meandri.

Nel tratto finale del corso d'acqua (a meno di un chilometro dallo sbocco in mare) la presenza di tre attraversamenti sul corso d'acqua a breve distanza tra di loro (ferrovia Livorno-Roma, vecchia Aurelia e condotte Solvay) ha in passato creato più volte situazioni di rischio. In particolare si ricordano gli eventi dell'Ottobre 1993 e dell'Ottobre 1949.

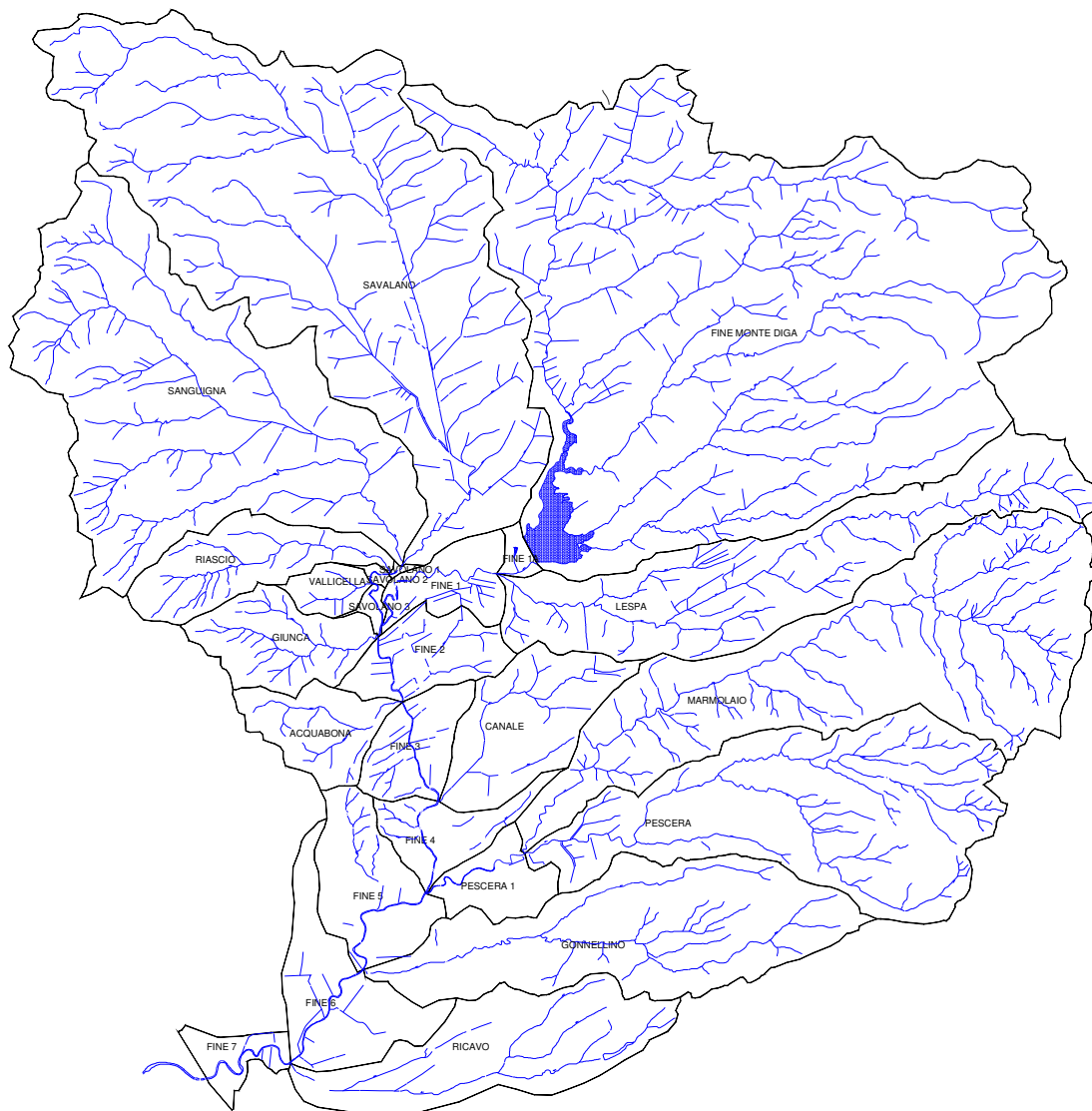
#### **1.1 Caratteristiche geomorfologiche**

Il bacino idrografico del Fine, di area pari a circa 167.97 Kmq ha forma compatta e densità di drenaggio piuttosto elevata. Il reticolo idrografico principale è riportato nella tavola 1, ed è stato ricavato dalla cartografia 1:10000 della Regione Toscana. Esso può essere considerato formato da tre sottobacini principali: quello del Fine stesso e quelli dei suoi due affluenti principali: il Savolano ed il Marmolaio.

Il principale affluente del Savolano, il cui bacino ricopre una superficie di 48.91 Kmq, è il Botro della Sanguigna, di area drenata pari a 18.04 Kmq. Il principale affluente del Marmolaio, il cui bacino ricopre una superficie complessiva di 29.33 Kmq è il torrente Pescera, di area drenata pari a 12.13 Kmq.

L'analisi geomorfologica del bacino effettuata seguendo l'approccio di Horton (Paris, Aminti, 1995) basandosi su cartografia 1:25000 fornisce un valore del rapporto di biforcazione pari a 2.99, del rapporto di lunghezza pari a 2.43 e del rapporto delle aree pari a 3.37.

Utili indicazioni per la caratterizzazione della risposta idrologica del bacino possono ricavarsi anche dall'analisi geomorfologica effettuata secondo l'approccio di Shreve, di cui si discuterà in seguito. La tabella 1 riporta i valori della magnitudine e del diametro della rete per i sottobacini principali, oltre alle loro caratteristiche fisiografiche fondamentali.



*Figura 1: bacino del fiume Fine con indicazione del reticolo idrografico e dei principali sottobacini ( si veda l'allegata tavola 1.*

Bacino	S (kmq)	Pendenza media di bacino	L asta principale (km)	Pendenza asta principale	Magnitudine rete	Diametro rete
Savolano	27.718	0.155526	12.73	0.010998	102	31
Vallicella	0.707	0.144600	1.04	0.001250		
Savolano 1	0.045	0.067500	0.24	0.001240		
Savolano 2	0.133	0.073500	0.44	0.001230		
Savolano 3	0.187	0.129600	0.92	0.001250		
Sanguigna	18.084	0.193918	8.23	0.016201	67	21
Riasco	3.080	0.204981	4.28	0.044860	16	14
Giunca	2.719	0.203384	3.07	0.052117		
Acquabona	2.136	0.232140	2.59	0.039640		
Ricavo	5.820	0.087727	6.04	0.015120	8	6
Gonnellino	9.192	0.204659	8.02	0.027764	19	12
Canale	3.783	0.142051	3.72	0.020430	12	8
Fine 1	1.583	0.070456	3.52	0.006390		
Fine 1A	0.283	0.097000	0.65	0.006350		
Fine 2	2.145	0.107259	1.19	0.001930		
Fine 3	1.831	0.166461	1.63	0.009020		
Fine 4	1.680	0.187500	1.57	0.000637		
Fine 5	2.984	0.146937	2.15	0.000465		
Fine 6	3.456	0.054815	1.92	0.002340		
Fine 7	0.916	0.015000	2.06	0.000728		
Pescera	12.125	0.260530	8.62	0.055684	57	24
Pescera 1	1.465	0.110792	2.00	0.008000		
Marmolaio	15.741	0.248266	11.13	0.035340	93	33
Lespa	10.130	0.222883	10.00	0.035200	63	31

Tabella 1: caratteristiche dei sottobacini e degli affluenti principali del fiume Fine

Il bacino ha morfologia prevalentemente collinare, con pendenze dei versanti piuttosto limitate. Dall'analisi delle isoipse (Paris, Aminti, 1995) si nota come più della metà dell'area del bacino si trovi a quota inferiore ai 200 m.s.l.m. (all'incirca il 52% dell'area totale del bacino). La fascia compresa tra le quote 200 e 300 m.s.l.m. occupa il 38% della rimanente area, mentre la fascia a quota superiore a 300 m.s.l.m. occupa la rimanente area ubicata principalmente in prossimità dei monti di Castellina Marittima.

Per quel che riguarda l'alveo del Fine, esso si presenta generalmente inciso nei depositi alluvionali di fondo valle, con presenza di tratti arginati solo nel tratto terminale in corrispondenza dello stabilimento Aniene e degli attraversamenti della linea ferroviaria Livorno-Roma e della vecchia Aurelia. Le sponde sono a pendenza piuttosto accentuata (a conferma della presenza di materiali coesivi limo-argillosi nei terreni del bacino) ed interessate su diversi tratti anche da fenomeni di erosione ed instabilità.

Durante i sopralluoghi effettuati si sono notati numerosi fenomeni di instabilità di sponda anche lungo il Savolano ed i suoi principali affluenti.

Le sponde del Fine sono ricoperte da vegetazione piuttosto fitta per gran parte dello sviluppo del fiume, con presenza sia di canneti che di macchie di arbusti ed alberi. In particolare nel tratto a monte della statale 206 l'alveo del Fine è interessato da vegetazione molto folta, comprendente anche alberi di discreta dimensione.

## **1.2 Caratteristiche geologiche**

Il bacino del Fine occupa in gran parte la fossa tettonica compresa tra i monti livornesi e le alture di Castellina Marittima. Le caratteristiche geologiche della zona sono riportate in dettaglio in tavola 3.

La fossa tettonica della Val di Fine è stata colmata in gran parte da depositi pleistocenici e pliocenici prevalentemente di origine marina e da depositi miocenici. Nella parte alta dei bacini del Fine, del Marmolaio ed in misura minore del Savolano affiorano calcari stratificati alternati con strati di argilloscisti. In corrispondenza della collina di Rosignano Marittimo vi è un altro affioramento significativo di calcari (formazione del calcare di Rosignano), costituita da un insieme eterogeneo nel quale prevalgono i calcari detritici. Le formazioni calcaree sono caratterizzate da buona permeabilità per fatturazione.

A quote più basse nel bacino del Fine e dei suoi affluenti maggiori si trova una serie di formazioni piuttosto omogenee costituite da argille, marne e marne argillose mioceniche. Particolare rilevanza sul comportamento idrologico del bacino idrografico hanno le argille azzurre plioceniche, variabili sia lateralmente che lateralmente in argille più o meno marnose, limose o sabbiose. Le argille azzurre coprono in gran parte i versanti collinari fino al limite delle alluvioni di fondo valle e sono caratterizzate da permeabilità estremamente ridotta. I depositi alluvionali sono costituiti da materiali di riempimento delle valli e paleovalli, depositatisi nell'olocene. Sono generalmente presenti a fondo valle in tutti i corsi d'acqua del bacino e sono caratterizzati da una copertura superficiale prevalentemente argillosa o limosa, sovrastante spesso orizzonti sabbiosi o ghiaiosi.

Nella parte terminale del corso del Fine, a valle della strettoia costituita dalla collina di Rosignano Marittimo, ai lati dei depositi alluvionali si trovano depositi sabbiosi e conglomerati di buona permeabilità. Tali formazioni interessano una parte ridotta del bacino, posta in prossimità del suo sbocco in mare.

## **1.3 Dati cartografici**

La cartografia topografica di base utilizzata nella redazione dello studio è costituita dalla cartografia numerica 1:10000 della Regione Toscana. La cartografia tematica numerica utilizzata è stata fornita dall'Ufficio Piano del Comune di Rosignano Marittimo e dalla Provincia di Pisa. Particolarmente dettagliata è risultata la cartografia del Piano Strutturale fornita dal Comune di Rosignano, con la carta dell'uso del suolo e la carta geologica su base 1:10000. La cartografia fornita dalla provincia di Pisa relativa all'uso del suolo deriva dalla cartografia Corine Land Cover, su base 1:25000 così come la cartografia geologica deriva da digitalizzazione della cartografia geologica tradizionale della Regione Toscana. Una limitata parte del bacino del Savolano, posta nell'estremità settentrionale del bacino idrografico ricade nel comune di Collesalveti: per essa si è fatto ricorso alla cartografia tradizionale della Regione Toscana su supporto cartaceo.

## **2. STUDIO IDROLOGICO DEL BACINO DEL FIUME FINE**

Lo studio idrologico del bacino del fiume Fine è stato effettuato utilizzando il codice di calcolo HEC-HMS, sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers. Il deflusso superficiale risultante dalle precipitazioni sul bacino idrografico viene simulato rappresentando il bacino come un sistema interconnesso di componenti idrologici, ognuno dei quali modella un determinato aspetto della trasformazione afflussi-deflussi e della successiva propagazione a moto vario delle portate di piena da monte verso valle.

Nell'impostazione del lavoro si sono tenuti presenti i risultati e le indicazioni presenti nello studio idrologico ed idraulico del fiume Fine redatto per conto della Provincia di Livorno dal prof. P.L. Aminti e dal prof. E. Paris nel 1995.

Rispetto a tale studio l'analisi si è tuttavia spinta più in dettaglio, sia a livello cartografico di base utilizzata, sia in quanto sono stati considerati singolarmente i vari sottobacini degli affluenti principali del Fine, il cui comportamento ha un'influenza determinante per la risposta del corso d'acqua principale alle precipitazioni meteoriche.

All'interno della Val di Fine vi sono vari sottobacini di area e caratteristiche geomorfologiche simili: il botro della Sanguigna, il Savolano a monte della confluenza con la Sanguigna, il Marmolaio a monte della confluenza con la Pescera, e la Pescera. Tali sottobacini presentano caratteristiche di risposta alle sollecitazioni meteoriche tra loro molto simili e sono caratterizzati da durate delle piogge critiche dello stesso ordine.

La situazione più critica per il tratto finale del Fine si ha quando sul bacino si hanno precipitazioni di forte intensità e durata di pioggia comprese tra due e quattro ore: per tali durate di pioggia si ha infatti la piena praticamente contemporanea dei principali affluenti del Fine. Ciò è testimoniato anche dalla dinamica dell'evento di pioggia dell'8 Ottobre 1993 che ha prodotto un'onda di piena disastrosa per il tratto finale del corso d'acqua e per gli abitati di Vada e Rosignano Solvay. In quella occasione infatti (come riportato più in dettaglio nel seguito) alla stazione pluviometrica installata presso la diga Solvay a Santa Luce furono registrati 113 mm di pioggia in tre ore, di cui solo 95 mm in due ore. Si noti come una pioggia di durata tutto sommato ridotta - considerata in rapporto alle dimensioni ragguardevoli (circa 168 kmq) del bacino del Fine - abbia portato ad un evento rovinoso: la spiegazione del fenomeno può essere ricercata se si analizza il processo di formazione delle onde di piena nel bacino del Fine considerando i diversi contributi portati dai vari affluenti.

Nel redigere questo studio si è tenuto si è provveduto quindi ad effettuare una discretizzazione del bacino complessivo nei principali sottobacini (si vedano la figura 2 e la tavola 1), al fine di evidenziare le mutue interazioni che si hanno in presenza di precipitazioni di forte intensità.

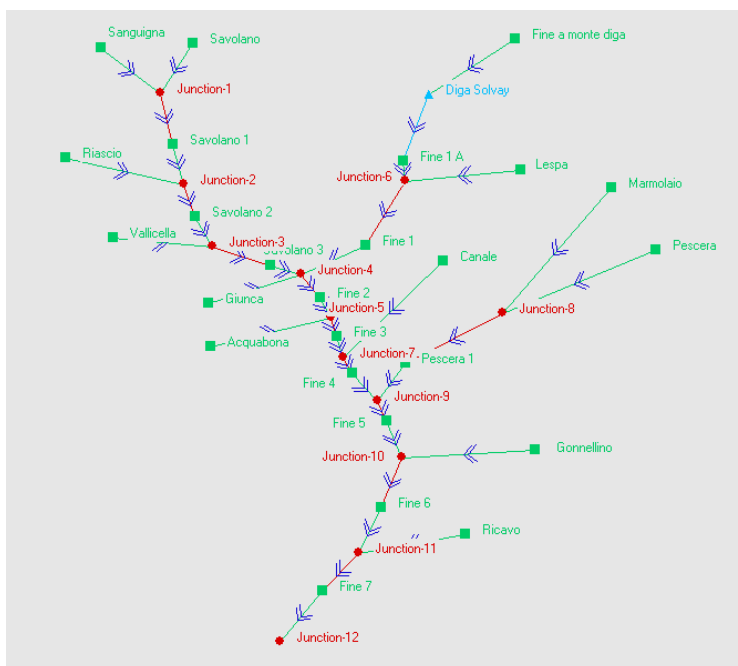


Figura 2: discretizzazione del bacino del fiume Fine: modello idrologico creato con HEC-HMS (riportata anche in appendice).

Per quel che riguarda la diga Solvay il suo contributo nella laminazione delle piene è limitato dal fatto che spesso la diga nel periodo autunnale non ha che limitati volumi disponibili per l'invaso delle acque di piena. Nelle simulazioni effettuate pertanto si è sempre assunto che la quota nell'invaso al momento dell'inizio della precipitazione fosse pari alla quota degli sfioratori superficiali, in accordo con quanto effettuato nello studio di Paris ed Aminti.

I metodi di calcolo utilizzati trovano riscontro nelle indicazioni dell'Autorità di Bacino dell'Arno in tema di progettazione di casse d'espansione (*Linee guida per il dimensionamento e la progettazione delle casse di espansione*). Nello studio idrologico sono stati inoltre considerati anche alcuni risultati recenti ottenuti nell'ambito della regionalizzazione delle portate di piena in Toscana dal progetto ALTO (ALLuvioni TOscana) e più in generale nell'ambito dell'attività di ricerca del Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI).

Il bacino idrografico in esame è stato suddiviso in vari sottobacini, a cui sono stati forniti in ingresso vari ietogrammi di pioggia, con diversa durata e diversa distribuzione nel tempo dell'altezza di pioggia. La pioggia efficace è stata calcolata considerando le perdite per infiltrazione e per detenzione, adottando il metodo CN del Soil Conservation Service (SCS) degli U.S.A. Gli ietogrammi di pioggia efficace così ottenuti sono stati applicati all'idrogramma unitario o forniti in ingresso al modello Kinematic Wave ottenendo così il deflusso di piena in uscita dalla sezione di chiusura dei vari sottobacini. Gli idrogrammi unitari utilizzati sono l'idrogramma geomorfologico e l'idrogramma SCS. Per l'analisi della propagazione delle onde di piena nei corsi d'acqua in esame si è utilizzato il metodo di Muskingum-Cunge.

Nel seguito si riportano in dettaglio i metodi di calcolo utilizzati.



## 2.1 Modello delle piogge intense: definizione degli afflussi al bacino

La stima delle portate di piena dei corsi d'acqua italiani viene condotta di solito a partire da serie storiche di dati idrologici che raramente superano i 50 anni, molto più corte, quindi, dei tempi di ritorno solitamente adottati nella progettazione di opere per la difesa idraulica del territorio. Per dare più senso ad estrapolazioni nel tempo così forti si fa generalmente ricorso a modelli di regionalizzazione.

Un metodo di stima regionale utile per la stima delle precipitazioni intense (consigliato dall'Autorità di Bacino dell'Arno) consiste nell'allungare artificialmente le serie storiche accorpendo, dopo averne normalizzato gli elementi componenti dividendoli per una altezza di pioggia *indice* di riferimento, quelle relative a più stazioni di misura ricadenti in regioni omogenee nei riguardi delle precipitazioni. Al campione adimensionale così ottenuto (di numerosità molto maggiore rispetto alle singole serie storiche) viene poi adattata una funzione di probabilità; a tale curva viene dato il nome di *curva di crescita*.

Per stimare l'altezza di pioggia di assegnato tempo di ritorno in un punto appartenente alla regione omogenea, occorre quindi stimare il valore della altezza di pioggia indice nel punto in esame. La grandezza indice viene generalmente assunta pari alla media  $\mu$  dei valori massimi delle altezze di pioggia di assegnata durata.

Per la stima delle piogge intense nei bacini del fiume Fine viene utilizzato il modello TCEV, facendo riferimento alla metodologia ed alle curve di crescita ottenute da Brath, Franchini e Galeati per l'Italia centrosettentrionale (Brath et al., 1998) ed aggiornando il valore della grandezza indice in base ai dati di pioggia disponibili per il bacino del Fine fino all'anno 1997. La scelta del modello TCEV rispetto alla legge di distribuzione di Gumbel trova riscontro anche con quanto osservato da Paris ed Aminti a proposito delle caratteristiche delle precipitazioni intense nel bacino del Fine.

### 2.1.1 Il modello TCEV

Il modello a doppia componente *TCEV* interpreta gli eventi massimi annuali come il risultato di una miscela di due popolazioni distinte: la prima relativa agli eventi massimi ordinari, più frequenti ma meno intensi, e la seconda agli eventi massimi straordinari, meno frequenti e spesso catastrofici. La distribuzione *TCEV* ha espressione

$$P(x) = \exp[-\lambda_1 \exp(-x/\theta_1) - \lambda_2 \exp(-x/\theta_2)], \quad (1)$$

dove  $P(x)$  indica la probabilità di non superamento del valore  $x$  della generica variabile casuale  $X$  mentre  $\lambda_i$  e  $\theta_i$  ( $i=1, 2$ ) sono i quattro parametri (positivi) della distribuzione.

Il massimo annuo di ciascuna delle due componenti risulta allora distribuito secondo una legge di Gumbel, mentre il massimo di ambedue risulta distribuito secondo la legge data dal prodotto delle due funzioni di probabilità, espresso appunto dalla (1). Identificando dunque con gli indici "1" e "2" la componente ordinaria e quella eccezionale dovrà essere, in generale,  $\lambda_1 \gg \lambda_2$  e  $\theta_1 \ll \theta_2$ .

La forma canonica della distribuzione (1) è

$$P(z) = \exp[-\exp(-z) - \lambda \exp(-z/\theta)], \quad z = (x - \varepsilon_1)/\theta_1; \quad (2)$$
$$\varepsilon_1 = \theta_1 \ln \lambda_1, \quad \theta = \theta_2/\theta_1, \quad \lambda = \lambda_2/(\lambda_1)^{1/\theta};$$

inoltre risulta

$$\mu = \theta_1 \eta(\lambda, \theta, \lambda_1), \quad \eta(\lambda, \theta, \lambda_1) = \left[ (\ln \lambda_1 + 0.5772) - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^j \lambda^j}{j!} \Gamma(j/\theta) \right]. \quad (3)$$

Scritta in termini della variabile adimensionale  $X = H_d / \mu(H_d)$ , la (1) assume la forma

$$P(x) = \exp\left[-\lambda_1 \exp(-x\eta) - \lambda \lambda_1^{1/\theta} \exp(-x\eta/\theta)\right], \quad x = h_d / \mu(H_d). \quad (4)$$

La funzione inversa della (4), espressa in funzione del tempo di ritorno  $T = 1/(1-P)$  definisce la curva di crescita.

L'omogeneità idrologica di una regione comporta l'invarianza spaziale della curva di crescita e quindi l'invarianza spaziale del coefficiente di asimmetria e del coefficiente di variazione; d'altra parte, nel caso della funzione di distribuzione adottata si può dimostrare che i coefficienti di asimmetria e di appiattimento dipendono solo da  $\lambda$  e  $\theta$ , mentre il coefficiente di variazione dipende anche da  $\lambda_1$ .

Perciò per il modello *TCEV* la ricerca delle zone omogenee viene generalmente effettuata in due fasi (o livelli): al primo livello si ricercano le zone omogenee in termini del coefficiente di asimmetria (il che consente la stima di  $\lambda$  e  $\theta$  per ciascuna zona) e al secondo livello si individuano una o più sottozone omogenee in termini di coefficiente di variazione (il che consente la stima di  $\lambda_1 | \lambda, \theta$  per ciascuna sottozona).

### 2.2.2 Area di indagine per la regionalizzazione delle piogge intense

L'area su cui è stato sviluppato il modello di stima regionale coincide con il territorio di competenza dei Compartimenti *SIMN* di Bologna, Pisa e Roma ed è compresa tra il mare Tirreno a ovest e il mare Adriatico a Est (Figura 3).

Dall'analisi statistica è risultata la necessità di considerare 4 sottozone denominate *Adriatica costiera*, *Adriatica appenninica*, *Tirrenica appenninica* e *Tirrenica costiera* (Figura 4). La regione corrispondente ai bacini toscani, ricade dunque nelle due ultime sottozone.

In particolare la zona corrispondente al bacino del Fine ricade nella sottozona Tirrenica costiera.

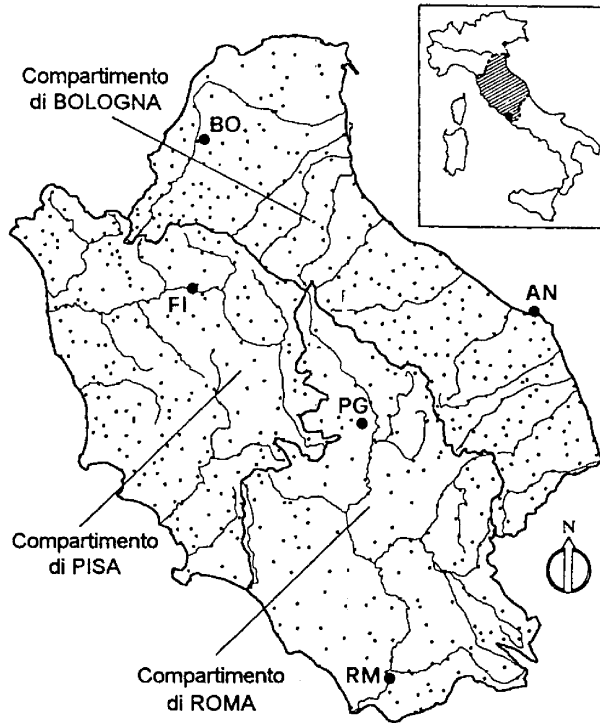


Figura 3 Area complessiva di indagine

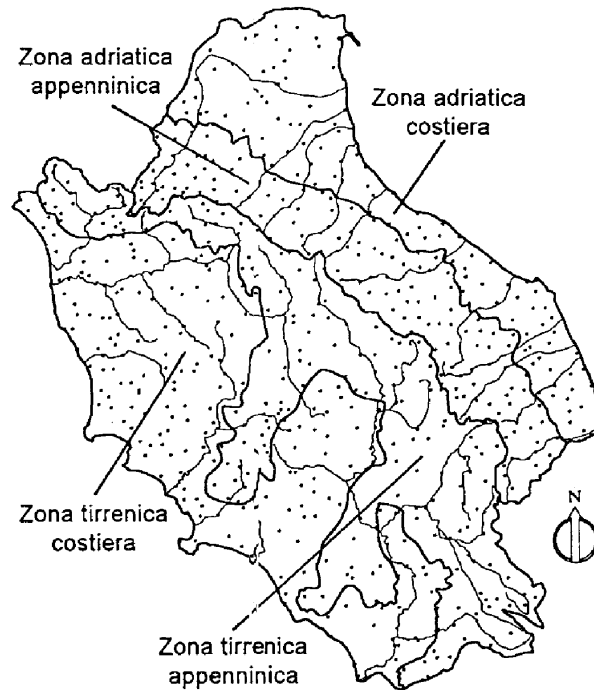


Figura 4 Sottozone omogenee nei riguardi delle piogge intense

Dato che la funzione di distribuzione  $TCEV$  non è invertibile analiticamente, per un agevole utilizzo delle curve di crescita sono state ricavate dagli Autori per interpolazione formule approssimate esplicite, valide per  $T \geq 5$  anni (Tabella 2). Per piogge di durata intermedia rispetto a quelle indicate si può procedere con una interpolazione.

Zone	$\lambda$	$\theta$	$\lambda_1$	$x(T)$	Note
Tirrenica Costiera	0.131	1.820	16.28	$0.8528+0.2524\ln T+0.0153\ln^2 T$	d=1 ora
	0.770	2.391	24.71	$0.5155+0.4604\ln T+0.0004\ln^2 T$	d=3 ore
	0.380	2.592	26.21	$0.3292+0.5043\ln T+0.0043\ln^2 T$	d=6 ore
	0.303	2.799	30.01	$0.2296+0.5267\ln T+0.0056\ln^2 T$	d=12 ore
	0.221	3.322	30.78	$-0.0327+0.6135\ln T+0.0083\ln^2 T$	d=24 ore, 1g

Tabella 2 Curve di crescita della variabile  $X = H_d / \mu(H_d)$

### 2.2.3 Applicazione al bacino del Fine: curva di possibilità pluviometrica

La grandezza indice è la media delle altezze massime annuali di precipitazione di assegnata durata  $d$ . Come si nota dalla tabella sopra per la regione tirrenica costiera non si ha invarianza di scala rispetto alla durata per cui le piogge di diversa durata presentano curve di crescita diverse.

Per determinare l'altezza di pioggia di assegnato tempo di ritorno si procede nel modo seguente:

- dalle serie dei valori massimi si calcola il valore medio relativo alle diverse durate di pioggia;
- si moltiplica il valore medio dei massimi di pioggia per la corrispondente curva di durata  $X_d(Tr)$ , in cui  $Tr$  è il tempo di ritorno considerato. Si ottengono così le altezze di pioggia di durata  $d$  col tempo di ritorno voluto.

Le stazioni pluviometriche utilizzate per la determinazione delle curve pluviometriche di vari tempi di ritorno per il bacino del Fine sono quelle di Nugola, Santa Luce, Casacce e Quercioletta. Di queste particolarmente significative risultano le stazioni di Casacce e Santa Luce, per la loro posizione approssimativamente baricentrica all'interno del bacino idrografico.

I dati delle piogge orarie massime utilizzati per ciascuna stazione sono riportati nelle tabelle seguenti, insieme con i valori di alcune grandezze statistiche significative: media, scarto quadratico medio, coefficiente di variazione ed asimmetria.

<b>Quercioletta</b>					
<b>Anno</b>	<b>1<sup>h</sup></b>	<b>3<sup>h</sup></b>	<b>6<sup>h</sup></b>	<b>12<sup>h</sup></b>	<b>24<sup>h</sup></b>
1975					
1976	32	83.6	94.6	94.8	94.8
1977	17	26	27.4	33	58
1980	31.6	38.6	45	45	45
1981	13.6	21.2	25.8	36.2	53.6
1984	21.2	25	29.6	38	54
1985	22	34.4	34.4	38.2	44.6
1986	15.8	28.2	35.4	40	42.8
1987	17.6	24.6	30.2	41	68.2
1988	37.4	81.8	117.2	123.5	126.6
1989	31.1	36	36	40.4	53.8
1990	24.4	57.2	62.4	62.4	70.4
1991	52.6	80.4	91	91.6	91.8
1992	39.4	68.2	92.8	115.6	131.6
1993	61.6	149	177.8	191.2	194.4
1994	31.6	74.6	98	100.6	103.2
1995	18.2	36.4	45	50.2	77.2
1996	19.2	44.8	52.8	67	67.8
media	28.61	53.53	64.44	71.10	81.05
s.q.m	13.35	33.14	41.74	43.21	39.99
CV	0.47	0.62	0.65	0.61	0.49
asimmetria	1.21	1.58	1.39	1.52	1.62

<b>Casacce</b>					
<b>Anno</b>	<b>1<sup>h</sup></b>	<b>3<sup>h</sup></b>	<b>6<sup>h</sup></b>	<b>12<sup>h</sup></b>	<b>24<sup>h</sup></b>
1959	25	27.8	35	56	70
1960	29.2	33.2	37.4	43	54.4
1961	24	42.6	76	88.2	88.2
1962	25	32	36	41.8	55.8
1963	56	68	68	68	71
1964	31.8	32	40.8	49	49.4
1966	23.4	27.8	33.4	49.4	71.4
1967	21	26.2	26.8	28.6	48
1968	43	53.4	56.6	57.4	61.4
1969	26	33.8	37	40.6	47.4
1970	22	30	36.2	38.2	41.6
1971	23.6	51.2	60.2	66	78.8
1972	27.6	30.2	30.8	38.4	44.8
1973	43.6	57	59.2	65.4	65.4
1974	17	29	30.2	31.4	44.2
1975	30.2	64	87.2	108.4	109.4
1976	34.2	54.2	59.4	64.2	66.2
1977	36.2	42.6	43.8	49	52.4
1978	23.4	25.6	31.8	37	54
1979	21	26.4	26.6	36.4	45
1980	19.6	34	36	42.6	47.2
1981	21.2	31	38.8	44.6	48.2
1982	40	40.4	40.4	52	59.6
1983	27.6	28	34.4	58	61.6
1984	40	55.8	55.8	55.8	56
1985	28.4	28.4	31	36.4	42.6
1986	19	24.8	29.4	36.4	42
1987	20.6	20.6	24.2	34.8	48.4
1988	22	44.1	56.9	69.2	80.8
1989	27.8	30.7	33.3	46.8	47.4
1990	29.8	39	70.6	87.8	87.8
1991	57.6	98.8	107.2	107.2	107.2
1992	32.8	57	66.4	73.4	85.2
1993	59.9	112.3	139.4	146.1	148.8
1994	33.8	45.6	60.4	63.4	64.2
1995	19.2	34.8	38.8	40	58.2
1996	31.8	47.6	57	59.8	63.2
1997	26.6	36.4	47	52.6	63.4
media	30.02	42.01	49.46	56.93	63.96
s.q.m	10.66	19.37	23.78	24.29	22.21
CV	0.35	0.46	0.48	0.43	0.35
asimmetria	1.43	2.05	1.94	1.84	1.94

<b>Santa Luce</b>					
<b>Anno</b>	<b>1<sup>h</sup></b>	<b>3<sup>h</sup></b>	<b>6<sup>h</sup></b>	<b>12<sup>h</sup></b>	<b>24<sup>h</sup></b>
1958	16.6	41.4	48.2	59.4	59.4
1959	14.4	33	37	41.2	46
1960	28	58.8	64.2	65.8	69.4
1961	36	62.4	104.8	111.8	116.8
1962	13	21.8	24	31.8	41
1963	38.4	48.4	50	50.4	54.4
1964	37	58	60	64.4	69.8
1965	37	47.4	47.4	57.8	72
1966	30	31.4	40	60	100
1967	23	33	46.6	46.8	49.8
1968	22	35.4	36	36.2	45
1969	25	31	36	46.6	51.2
1970	36	54.8	65.4	69.8	90
1971	19	38.6	53.2	60.6	74
1972	23.2	31.4	31.4	35.4	45.8
1973	36.2	58.6	63.2	64.4	65.2
1974	24.2	28	29.4	29.4	36.4
1975	36.8	58.6	80.2	86.6	86.6
1976	38.8	52	52	52	72
1977	12	25.2	27.8	41	72.6
1978	18.6	21.4	21.8	27.9	43.2
1979	19.7	27	28.5	36.5	45.8
1980	20.4	36.8	41.2	58	70
1981	37.8	41	59.8	60.6	67.4
1982	44.6	49.2	49.4	49.4	49.4
1983	23.8	31.2	32.4	63.2	71.6
1984	75.6	83	83	83	83
1985	44.8	44.8	44.8	44.8	61.6
1986	14.6	24.2	34.4	42	48.8
1987	10.2	23.8	38.4	58.2	76.2
1988	18.6	37.1	51.6	55.6	71.6
1989	22	23.3	25.6	29.2	30.6
1990	19.6	31.6	38.4	55	89.2
1992	28.4	63.6	71.6	78.4	87.4
1993	33.4	42	59.4	59.4	72.2
1994	32.8	38.2	44.2	49.2	64.8
1995	11.2	20.2	22.2	28	40.6
1996	21.8	51.8	59.4	60.6	63.4
media	27.49	40.51	47.44	53.96	64.58
s.q.m	12.58	14.63	18.33	17.69	18.90
CV	0.46	0.36	0.39	0.33	0.29
asimmetria	1.49	0.74	0.98	0.91	0.48

<b>Nugola</b>					
<b>Anno</b>	<b>1<sup>h</sup></b>	<b>3<sup>h</sup></b>	<b>6<sup>h</sup></b>	<b>12<sup>h</sup></b>	<b>24<sup>h</sup></b>
1936	38	38.6	38.6	38.8	43.4
1937	33.8	41.6	44.6	44.6	71.4
1942	41.6	43	52.2	64.4	72.4
1947	38.8	44.4	51.6	59.4	67.2
1948	21.4	21.6	25.2	39.4	39.4
1949	52.8	79.8	90.2	96.2	101.4
1950	21.6	26.2	35.6	62.2	62.6
1951	34.6	58	66.6	80.2	80.2
1952	29	36.4	46	53.6	84.8
1953	35.6	43	43.6	55	63.4
1954	33	45.4	45.6	48.4	77.8
1955	39.8	39.8	39.8	46.4	73
1956	18	36.6	44.4	52.6	55
1957	11	18	22	37.4	50
1958	53.4	53.4	53.4	53.6	54
1959	42	45.2	61.2	91	106.6
1960	39	49.8	51.2	61.4	68.4
1962	14.4	24	38.4	58.4	69.2
1963	38	44.4	58.4	61	82.2
1965	26.8	50.2	61	83.4	102.6
1966	42.2	42.8	51.8	52	78.8
1967	43	78	82	93	93.2
1968	29.4	29.4	31	40	55.2
1969	20.6	32.4	47.2	49.6	49.6
1970	17	25	32	35	46.6
1971	24	52.4	81.6	84.4	98.4
1972	20.8	40.2	44.8	45.6	55.4
1973	50.4	59	84.6	104.8	135.6
1974	35.2	68	68	68.2	68.2
1975	22	27.4	32.4	44	59.2
1976	31	36.2	36.2	37.2	54.4
1977	17	29.8	33	39.6	48.6
1978	22.4	22.4	22.4	24	31.6
1979	26.2	42.8	81.8	93.6	97
1980	19.2	31.4	37	59	73
1981	39	59.2	67.6	67.8	69
1982	20	24	34.4	51	55.4
1983	31.6	46.8	51.8	52.8	53.8
1984	32	35.4	35.8	45.6	68.4
1985	20	40	67.2	67.2	67.4
1986	21	28	34.2	39.6	67
1987	22.4	32.4	32.4	56	86.8
1988	19.1	39.6	56.9	89.6	94.4
1989	23.4	44.9	65	65	100
1990	44.4	78.4	102.4	109.4	109.6
1991	40.2	67	80.8	86	95
1992	34.2	36.2	44.8	66.8	86.4
1993	51.2	90.1	112.3	127.2	147.8
1994	27.6	37.4	37.4	48.8	69.2



1995	23.2	32	42.6	43.8	52.4
1996	51	62.2	62.2	62.6	67.6
1997	26.2	39.8	43	43	43
max	53.40	90.10	112.30	127.20	147.80
media	30.95	43.27	52.04	61.15	73.13
s.q.m	10.93	16.07	20.30	21.79	23.45
CV	0.35	0.37	0.39	0.36	0.32
asimmetria	0.36	1.00	0.99	0.99	0.95

Per il calcolo della grandezza indice relativa a tutto il bacino del Fine è stata effettuata una media pesata dei valori relativi alle singole stazioni, calcolando i pesi con il metodo dei topoi. I pesi delle singole stazioni risultano i seguenti:

- Nugola: 1;
- Santa Luce: 29;
- Casacce: 58;
- Quercioletta: 12.

La media delle grandezze statistiche di interesse così calcolata è riportata nella seguente tabella 3:

Valori medi per l'intero bacino del Fine					
media	29.13	42.97	50.70	57.81	66.29
s.q.m	11.54	19.62	24.32	24.62	23.40
CV	0.40	0.45	0.47	0.42	0.35
asimmetria	1.41	1.60	1.59	1.52	1.47

Tabella 3: grandezze statistiche medie per il bacino del Fine.

Applicando la legge TCEV si trovano quindi i seguenti valori delle altezze di pioggia di assegnato tempo di ritorno  $T_r$  per alcune durate significative  $d$ , relative all'intero bacino del Fine (tabella 4):

	$T_r$ (anni)	d(ore)						
		1h	3h	6h	10h	12h	18h	24h
h(mm)	500	93.5928	123.8535	147.7988	168.3614	176.3736	195.5856	210.473
h(mm)	200	80.09265	105.9885	126.4798	144.0763	150.9329	167.3737	180.1136
h(mm)	100	71.18976	94.20706	112.4207	128.0612	134.1556	148.7689	160.0927
h(mm)	30	58.01338	76.77045	91.61292	104.3586	109.325	121.2335	130.4614
h(mm)	20	54.14928	71.65699	85.51085	97.40756	102.0432	113.1585	121.7717

Tabella 4: altezze di pioggia.

Le altezze di pioggia trovate possono essere agevolmente interpolate con un procedimento di approssimazione ai minimi quadrati con una curva biparametrica del tipo:

$$h = ad^n T_r^m$$

trovando infine l'espressione della curva di possibilità pluviometrica:

$$h = 32.54d^{0.255} T_r^{0.17}$$

da cui è agevole calcolare le espressioni delle curve di possibilità relative a diversi tempi di ritorno, riportate per comodità nel grafico seguente relativamente ai tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni.

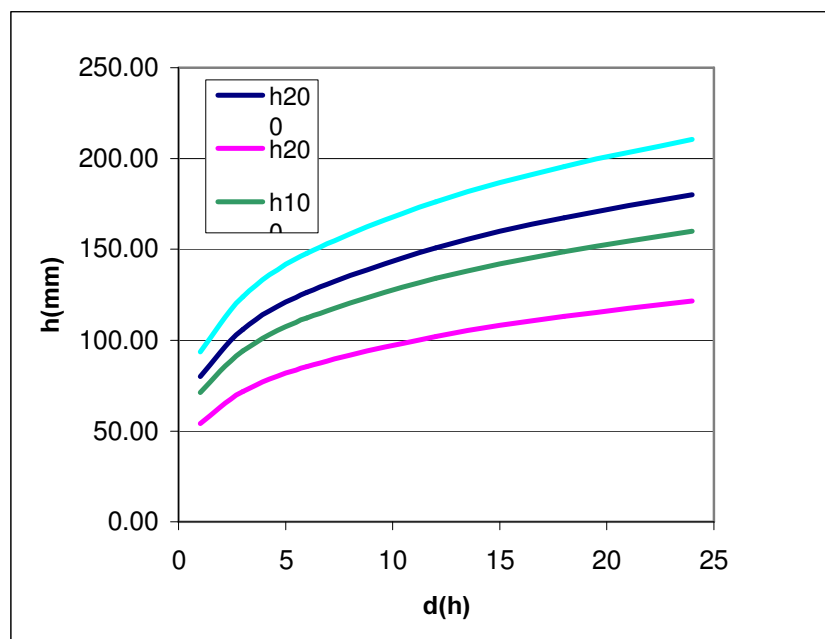


Figura 5: curve pluviometriche per il bacino del Fine.

#### 2.2.4 Curve di possibilità pluviometrica puntuali e ragguaglio delle piogge all'area

In generale la curva di possibilità pluviometrica dedotta per una certa località all'interno di un bacino non può essere assunta valida in tutta l'area  $A$  del bacino stesso. La stima dell'altezza di precipitazione di assegnata durata e assegnato tempo di ritorno può essere condotta moltiplicando l'altezza di pioggia puntuale di pari durata e tempo di ritorno per un fattore di ragguaglio  $r < 1$ :

$$h_A(d; T) = rh(d; T).$$

Generalmente infatti si suppone che durante il verificarsi degli eventi di massima intensità registrati in una stazione si siano verificate proprio in corrispondenza di quella stazione, o nelle sue immediate vicinanze, le massime precipitazioni tra tutte quelle cadute nei vari punti del bacino. Segue da ciò che l'altezza di pioggia media ragguagliata risulta in ciascuno degli eventi suddetti minore dell'altezza di pioggia relativa alla località considerata e quindi il fattore di ragguaglio  $r$  è minore dell'unità. Il valore del coefficiente di ragguaglio dipende poi dalla durata della precipitazione e dall'area considerata.

Facendo riferimento alla superficie dell'intero bacino del Fine (circa 168 Km<sup>2</sup>) sarebbe lecito aspettarsi che a priori una certa attenuazione dei valori massimi registrati ai pluviometri. Tuttavia poiché lo studio del bacino del Fine è finalizzato a determinare non solo le portate di piena relative alla sezione di chiusura dell'intero bacino, ma anche quelle dei principali affluenti (che sottendono superfici dell'ordine di poche decine di Km<sup>2</sup>) e dei bacini

idrografici minori si è ritenuto (a favore di sicurezza) di porre il fattore di ragguaglio pari all'unità.

Tale assunzione è confortata dall'analisi delle registrazioni pluviometriche relative all'evento dell'8 Ottobre 1993, che ha evidenziato come la distribuzione delle precipitazioni sul bacino sia stata piuttosto uniforme. L'evento meteorico, che ha riversato sul bacino del Fine un'altezza di pioggia di tempo di ritorno all'incirca duecentennale, si è mosso dalla costa verso l'interno ed alle stazioni di Casacce e Santa Luce (invaso Solvay), che sono le stazioni che rivestono l'importanza maggiore per la caratterizzazione degli afflussi al bacino, si sono registrati valori relativi alle piogge di tre e sei ore praticamente coincidenti: a Casacce 114.2 mm in tre ore e 139 mm in sei ore; a Santa Luce 113.6 mm in tre ore e 138.6 in sei ore. A Quercioletta si sono avuti valori di pioggia addirittura superiori. La parte più intensa dell'evento meteorico fu piuttosto localizzata sul bacino del Fine: alla stazione di Nugola quel giorno vennero infatti registrati solo 49 mm di pioggia.

### 2.2.5 Ietogramma di progetto

Le curve di possibilità pluviometrica forniscono solo l'intensità media dell'evento meteorico, non l'andamento temporale delle intensità di pioggia. A parità cioè di tempo di ritorno  $T_r$  e di durata  $d$  di pioggia possono aversi infinite realizzazioni dello ietogramma a ciascuna delle quali i modelli associano differenti onde di piena.

Nella pratica questo problema viene spesso superato ammettendo che tra tutte le possibili precipitazioni proprio quella di intensità costante pari al valor medio dell'intensità fornita dalla curva di possibilità pluviometrica conduca ad una portata al colmo del medesimo tempo di ritorno prescelto per le piogge. Tale ultima ipotesi è consigliata dalle prescrizioni dell'Autorità di Bacino del fiume Arno in materia di casse di espansione.

Risulta tuttavia interessante verificare la risposta del bacino anche a piogge che a parità di altezza totale di precipitazione presentano una diversa forma dello ietogramma. Nella letteratura tecnica varie sono le forme di ietogramma proposte. Nel caso del bacino del fiume Fine come guida per la scelta di uno ietogramma di progetto si è preso come riferimento lo ietogramma registrato alla stazione di Santa Luce (invaso Solvay) l'8 Ottobre 1993, in cui dalle ore 10 si sono verificate le seguenti piogge:

dalle 10 alle 11	18.6 mm
dalle 11 alle 12	55.0 mm
dalle 12 alle 13	40.0 mm
dalle 13 alle 14	15.0 mm
dalle 14 alle 15	10.0 mm
dalle 15 alle 23	10.4 mm

come si nota la parte dell'evento caratterizzata dalle intensità di pioggia maggiori è costituita dalle prime quattro ore, ed in particolare dal periodo tra le ore 11 e le ore 13 in cui sono caduti 95 mm di pioggia.

Nella figura sottostante sono riportati i profili di pioggia adimensionali riferiti a vari ietogrammi di progetto a confronto con il profilo di pioggia relativo all'evento critico dell'8/10/1993. Tali profili sono costruiti riportando in ascissa il valore del rapporto tra il generico istante  $t$  e la durata di pioggia  $d$ , ed in ordinata il corrispondente rapporto tra l'altezza di pioggia  $h$  caduta all'istante  $t$  e l'altezza di pioggia totale  $H$ .

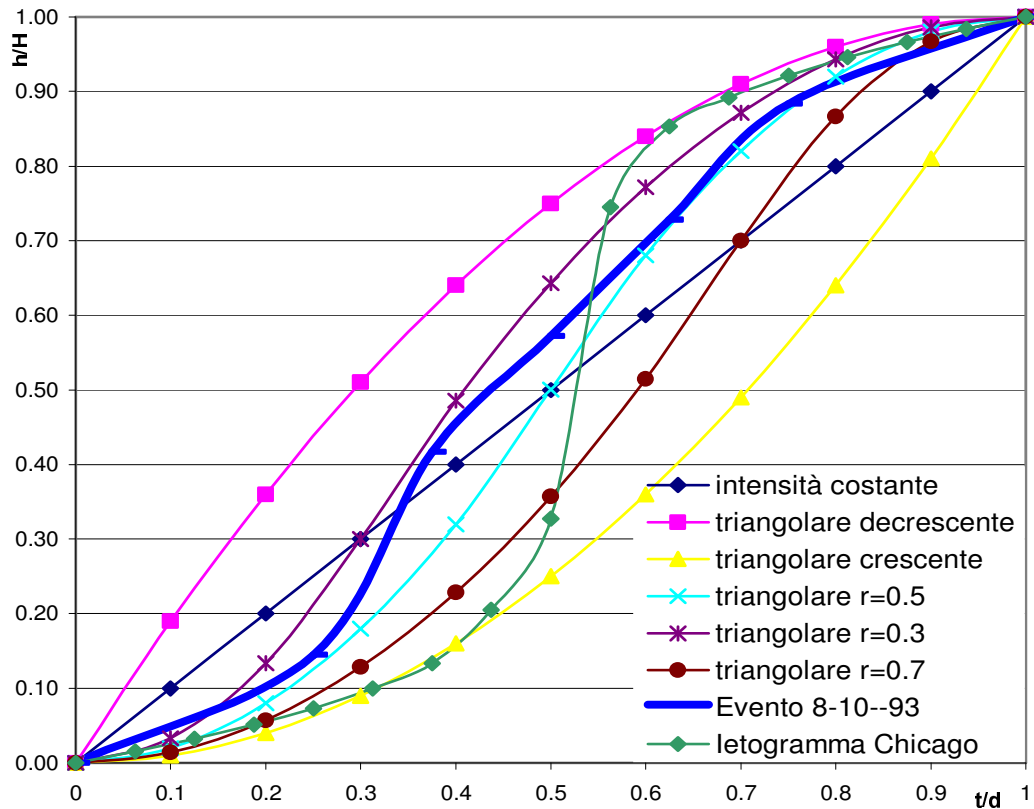


Figura 6: profili di pioggia relativi all'evento dell'8/10/1993 e a vari ietogrammi di progetto.

La disponibilità di un solo profilo di pioggia non consente chiaramente un'elaborazione statistica alla Huff per la determinazione di profili di pioggia di dato tempo di ritorno, ma risulta tuttavia utile per la scelta tra i vari ietogrammi di progetto disponibili.

Come si nota l'evento dell'8/10/1993 presenta un profilo intermedio tra uno ietogramma triangolare con picco in posizione 0.3 d (indicato con  $r=0.3$ ) ed uno ietogramma triangolare con picco in posizione 0.5 d (indicato con  $r=0.5$ ). Risulta pertanto interessante determinare la risposta dei corsi d'acqua del bacino del Fine a questi due diversi tipi di ietogramma triangolare, in quanto ritenuti rappresentativi delle caratteristiche pluviometriche della zona.

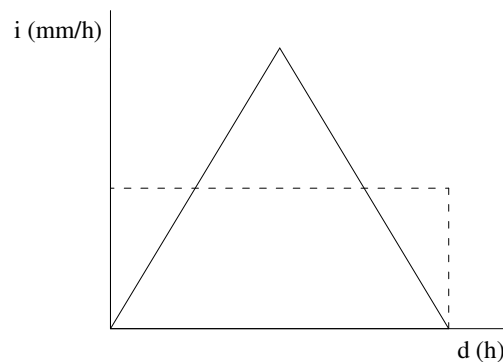


Figura 7: ietogramma triangolare con picco in posizione 0.5 d (tratteggiato lo ietogramma ad intensità costante di uguale altezza di pioggia)

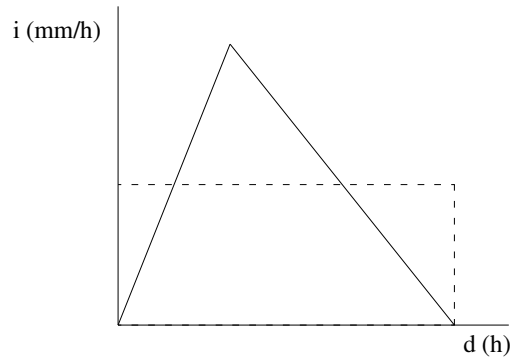


Figura 8: ietogramma triangolare con picco in posizione  $0.3 d$  (tratteggiato lo ietogramma ad intensità costante di uguale altezza di pioggia)

Per quanto riguarda la durata della precipitazione si è ritenuto opportuno indagare un campo di durate che va da piogge di durata 1 ora a piogge di durata 24 ore. Questo data la variabilità delle estensione dei diversi sottobacini compresi all'interno del bacino idrografico del fiume Fine, a cui corrispondono quindi piogge critiche di durata diversa.

In conclusione quindi le piogge considerate nell'analisi risultano essere le seguenti:

- piogge ad intensità costante di durata 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 18 e 24 ore;
- piogge con ietogramma triangolare con picco in posizione  $0.3 T_p$  di durata 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 18 e 24 ore;
- piogge con ietogramma triangolare con picco in posizione  $0.5 T_p$  di durata 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 18 e 24 ore;

Nella progettazione delle opere di messa in sicurezza idraulica verrà valutata l'opportunità di approfondire lo studio per durate di pioggia diverse, a seconda del comportamento delle opere di laminazione in progetto per le durate di pioggia già considerate.

### 3. MODELLI DI TRASFORMAZIONE AFFLUSSI-DEFLUSSI

#### 3.1 Le perdite di bacino

Nei modelli di piena l'ingresso al sistema è costituito dalla portata di precipitazione netta, dove per precipitazione netta si intende quella parte di precipitazione che, istante per istante, dà origine al deflusso superficiale. Le perdite di bacino sono state valutate con il metodo *Curve Number (CN)*, sviluppato dal *Soil Conservation Service (SCS)*;

L'assegnazione dei valori di CN ai singoli sottobacini è stata effettuata utilizzando il software Arc-View, utilizzando la cartografia tematica numerica geologica e dell'uso del suolo.

Nel metodo CN per cui la pioggia efficace  $P_e$  al generico istante  $t$  è data da:

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

in cui:

$P$  = altezza di pioggia cumulata all'istante  $t$

$S$  = ritenzione massima potenziale, funzione attraverso il parametro CN dell'uso del suolo, del tipo di gruppo idrologico del terreno e delle condizioni di umidità iniziale del suolo.

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

valida per  $S$  espresso in mm.

$I_a$  = perdite iniziali dovute all'intercezione da parte della copertura vegetale, all'immagazzinamento nelle depressioni superficiali ed al volume di acqua infiltratosi prima che di raggiungere il "ponding time". Tali perdite, che si hanno prima che inizi il deflusso superficiale, sono generalmente comprese nel seguente intervallo:

$$I_a = 0,10 \div 0,40 \cdot S$$

Mediamente in pratica spesso si assume  $I_a = 0,20 \cdot S$ . Nella valutazione del termine  $I_a$  si è anche fatto riferimento a dati riportati nella letteratura tecnica per quanto riguarda l'effetto della copertura boscata (dati derivati dal progetto ALTO), riportati nel grafico seguente.

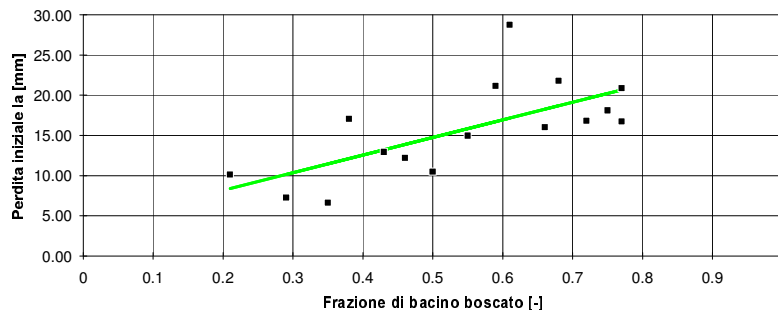


Figura 9: relazione tra copertura boscata del bacino e perdite iniziali.

L'indice *CN* è un numero adimensionale, compreso tra 0 e 100, funzione della natura del suolo, del tipo di copertura vegetale e dalle condizioni di umidità del suolo antecedenti la precipitazione. Per quanto riguarda il primo fattore, il *SCS* ha classificato i vari tipi di suolo in quattro gruppi (A, B, C e D) sulla base della capacità di assorbimento del terreno nudo a seguito di prolungato adacquamento (Tabella 5).

Tabella 5

<b>Tipo di Descrizione suolo</b>	
A	Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla; anche ghiaie profonde, molto permeabili.
B	Potenzialità di deflusso moderatamente bassa. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A, ma il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione.
C	Potenzialità di deflusso moderatamente alta. Comprende suoli sottili e suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali, anche se meno che nel 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 pressochè impermeabili in vicinanza della superficie.

Tabella 6

<b>Tipo di copertura (uso del suolo)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Terreno coltivato. Senza trattamenti di conservazione	72	81	88	91
Terreno coltivato. Con interventi di conservazione	62	71	78	81
Terreno da pascolo. Cattive condizioni	68	79	86	89
Terreno da pascolo. Buone condizioni	39	61	74	80
Praterie Buone condizioni	30	58	71	78
Terreni boscosi o forestati. Terreno sottile, sottobosco povero, senza foglie	45	66	77	83
Terreni boscosi o forestati. 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
Spazi aperti, prati rasati, parchi. Condizioni normali, con copertura erbosa intorno al 50%	49	69	79	84
Aree commerciali (impermeabilità 85%)	89	92	94	95
Distretti industriali (imp. 72%)	81	88	91	93
Aree residenziali. Impermeabilità media 65%	77	85	90	92
Aree residenziali. Impermeabilità media 38%	61	75	83	87
Aree residenziali. Impermeabilità media 30%	57	72	81	86
Aree residenziali. Impermeabilità media 25%	54	70	80	85
Aree residenziali. Impermeabilità media 20%	51	68	79	84
Parcheggi impermeabilizzati, tetti	98	98	98	98
Strade. Pavimentate, con cordoli e fognature	98	98	98	98
Strade. Inghiaiate o selciate con buche	76	85	89	91
Strade in terra battuta (non asfaltate)	72	82	87	89

Per quanto riguarda l'influenza dello stato di imbibimento del suolo all'inizio dell'evento meteorico, il metodo individua tre classi caratterizzate da differenti condizioni iniziali (*AMC*,

*Antecedent Moisture Condition*), a seconda del valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei 5 giorni precedenti l'evento meteorico. La categoria a cui fare riferimento si può individuare in base alla precipitazione totale dei 5 giorni precedenti quello dell'evento di pioggia e in base alla stagione (vegetativa o non vegetativa) come indicato in Tabella 4. I valori di *CN* riportati in Tabella 6 si riferiscono a una condizione di umidità del suolo di tipo standard, precisamente quella intermedia, indicata come *AMCII*. Per condizioni iniziali differenti vengono utilizzate le seguenti relazioni per la determinazione del *CN* a partire dai valori di *CN(II)* relativi alla condizione *AMCII*:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}, \quad CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

Tabella 7

Classe AMC	Precipitazione nei 5 giorni precedenti (mm)	
	Stagione di riposo	Stagione di crescita
I	<13	<36
II	13-28	36-54
III	>28	>54

Le caratteristiche pluviometriche e climatologiche del bacino del Fine sono tali per cui le precipitazioni avvengono prevalentemente nel periodo da settembre a marzo con piovosità massima in autunno (i due eventi critici più recenti sono avvenuti in data 8 Ottobre 1993 ed in data 1 Ottobre 1949). Lo stesso evento del 1993 è stato caratterizzato da una serie di piogge persistenti prima dell'8 Ottobre, giorno in cui si è avuto lo scroscio critico. Per i vari bacini in esame si è quindi considerata la condizione III di umidità iniziale del suolo; inoltre per ogni sottobacino si è considerato un valore medio del *CN*, calcolato come media pesata sulle aree a diverso uso del suolo.

Le voci della tabella 6 (estratta dall'Autorità di Bacino dell'Arno, e qui riportata solo per comodità di lettura) relative ai valori del *CN* per i diversi usi del suolo sono state integrate dove necessario con le voci delle tabelle originali relative al metodo *CN* riportate nel National Engineering Handbook dell'USDA, che sono più dettagliate rispetto a quelle qui riportate.

Le colline argillose della Val di Fine sono in gran parte interessate da un'attività agricola improntata sulla coltivazione dei cereali, con la monosuccessione cerealicola talvolta interrotta da prati di sulla e favino. Per quel che riguarda i dati relativi all'uso del suolo si è fatto riferimento alle condizioni medie del suolo che si hanno nel periodo autunnale, in cui generalmente si sono verificate le precipitazioni e le portate di piena maggiori. In tale periodo infatti gran parte dei terreni presenti nel bacino del Fine sono privi di copertura vegetale, oppure coperti da cereali nel primissimo stadio di germinazione. La capacità di assorbimento del terreno ne risulta quindi notevolmente diminuita.

La seguente tabella 8 riporta il valore del *CNIII* utilizzato per i vari sottobacini costituenti il bacino idrografico del fiume Fine.

Tabella 8

Sottobacino	<i>CN<sub>III</sub></i>
Savolano	93.21
Sanguigna	88.85
Fine a monte diga	89.47



Lespa	89.5
Marmolaio	85.16
Pescera	84.74
Pescera 1	93.13
Riascio	89.84
Giunca	88.68
Acquabona	84.9
Gonnellino	86.9
Ricavo	85.26
Fine 7	83.33
Fine 6	84.53
Fine 5	86.19
Fine 4	89.16
Fine 3	91.49
Fine 2	92.47
Fine 1	92.37
Vallicella	90.81
Savolano 2	90.81
Savolano 1	90.81
Savolano 3	90.81
Fine 1 A	92.37
Botro Canale	90.08

### 3.2 La trasformazione afflussi deflussi

Per effettuare la trasformazione afflussi- deflussi si sono adottati il metodo dell'idrogramma unitario ed il metodo Kinematic Wave.

Nello studio idrologico si sono utilizzati due tipi di idrogrammi unitari: per i bacini idrografici di dimensioni maggiori, caratterizzati da un reticolo idrografico ben sviluppato si è utilizzato l'idrogramma unitario istantaneo geomorfologico (GIUH= Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph), espresso tramite il modello di Nash; per i bacini caratterizzati da un reticolo idrografico di basso ordine si è utilizzato l'idrogramma adimensionale del SCS. Per i bacini minori (generalmente aree drenate direttamente dai corsi d'acqua maggiori) si è adottato un metodo di trasformazione afflussi- deflussi fisicamente basato: il metodo Kinematic Wave di HEC-HMS.

La seguente tabella riporta il metodo di trasformazione afflussi-deflussi utilizzato nei vari sottobacini (GIUH = idrogramma unitario geomorfologico; SCS = idrogramma unitario del Soil Conservation Service; K WAVE = metodo kinematic wave):

Tabella 9

Savolano	GIUH
Sanguigna	GIUH
Fine a monte diga	GIUH
Lespa	GIUH
Marmolaio	GIUH
Pescera	GIUH
Riascio	SCS
Giunca	SCS
Acquabona	SCS
Gonnellino	SCS
Ricavo	SCS
Vallicella	SCS
Canale	SCS
Pescera 1	K WAVE
Fine 7	K WAVE
Fine 6	K WAVE
Fine 5	K WAVE
Fine 4	K WAVE
Fine 3	K WAVE
Fine 2	K WAVE
Fine 1	K WAVE
Savolano 2	K WAVE
Savolano 1	K WAVE
Savolano 3	K WAVE
Fine 1 A	K WAVE

Di seguito si riporta una breve descrizione dei metodi di trasformazione afflussi-deflussi utilizzati.

#### 3.2.1 Il modello di Nash e l'idrogramma unitario istantaneo geomorfologico (GIUH)

E' possibile stimare l'*IUH* di un dato bacino a partire dalla conoscenza della struttura morfologica del suo reticolo idrografico e dalla determinazione dei parametri che esprimono l'organizzazione del reticolo. Si dimostra che l'*IUH* assume una forma particolare alla quale viene attribuito il nome di *Idrogramma Unitario Istantaneo Geomorfologico (GIUH)*. Sebbene la struttura matematica del *GIUH* sia piuttosto complessa, ai fini operativi esso può essere considerato equivalente all'*IUH* di Nash.

Il modello di Nash schematizza il bacino come un insieme di  $n$  serbatoi lineari in serie tutti caratterizzati dalla medesima costante di tempo  $k$  ed è perciò caratterizzato dai due parametri  $n$  e  $k$ . L'*IUH* relativo al modello di Nash ha la forma:

$$h(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{-t/k} \quad (n \geq 1, \quad k > 0),$$

dove  $\Gamma(n) = (n - 1)!$  per  $n$  naturale.

Le costanti  $n$  e  $k$  relative all'idrogramma di Nash possono essere determinate in base all'analisi geomorfologica, che offre la possibilità di pervenire ad una valutazione dei parametri della risposta del bacino anche nel caso di bacini privi di registrazioni idropluviometriche,

L'analisi geomorfologica dei bacini idrografici può essere impostata sia seguendo la classificazione del reticolo idrografico di Horton-Strahler, che seguendo la più recente classificazione del reticolo idrografico di Shreve. Le possibilità offerte dal metodo di analisi di Shreve sono state illustrate in numerosi lavori sviluppati negli ultimi anni in Italia dal Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI), ed in campo internazionale da numerosi ricercatori. Nel presente lavoro si è scelto di seguire quest'ultimo approccio.

Le principali grandezze utilizzate per la classificazione del reticolo idrografico secondo l'approccio di Shreve sono le seguenti:

- sorgenti: punti della rete da cui i vari corsi d'acqua hanno origine;
- segmenti esterni: elementi compresi tra una sorgente e la prima giunzione o biforcazione a valle;
- segmenti interni: elementi compresi tra due successive biforcazioni;
- magnitudine  $m$  di un segmento: numero dei segmenti esterni posti a monte del segmento considerato;
- magnitudine  $M$  della rete: numero complessivo delle sorgenti;
- distanza topologica  $x$  del tratto compreso tra una sorgente e la chiusura della rete: è il numero di segmenti compreso nel percorso che unisce questi due punti;
- livello di biforcazione  $b$  associato ad un segmento: numero di segmenti compreso tra la chiusura della rete e il segmento considerato;
- asta principale della rete: è la successione più lunga di segmenti che congiungono una sorgente alla sezione di chiusura del bacino;
- diametro della rete  $\lambda$ : è la massima distanza topologica (equivalente topologico della lunghezza geometrica dell'asta principale);
- funzione di larghezza  $W$ : fornisce il numero di segmenti che appartengono ad ogni livello.

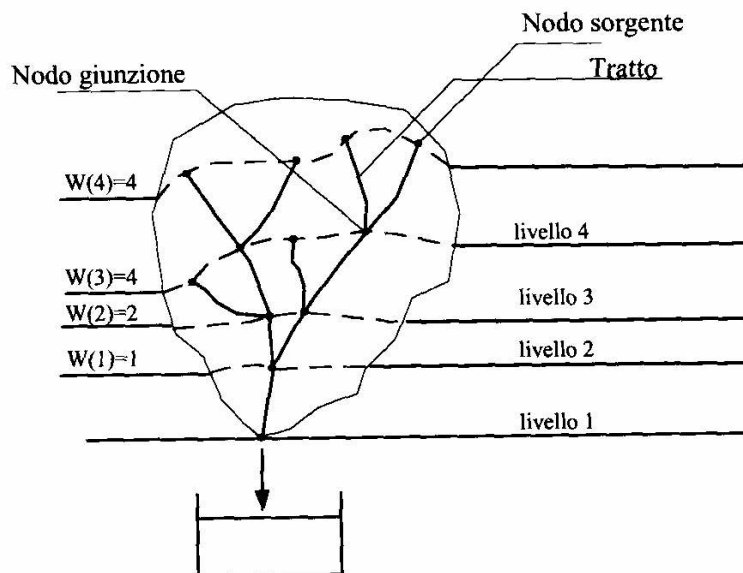


Figura 10: ordinamento della rete idrografica secondo il criterio di Shreve.

In particolare si può dimostrare come sia possibile stimare i parametri  $n$  e  $k$  dell'idrogramma di Nash con le espressioni

:

$$n = 3.97 \cdot \lambda^{-0.74} \cdot M^{0.50}$$

$$k = 0.26 \cdot \lambda^{0.53} \cdot M^{-0.46} \frac{L}{v},$$

dove  $v$  indica un parametro cinematico rappresentativo della velocità media di propagazione dei deflussi nella rete idrografica.

La valutazione di  $k$  richiede invece anche la stima del parametro  $v$  che può essere assunto pari alla velocità media spazio temporale della corrente nell'asta principale della rete.

L'approccio dell'idrogramma unitario istantaneo geomorfologico è stato seguito anche nel modello di piena *ALTO* (ALLuvioni in TOscana) per la stima regionale delle portate di piena dei corsi d'acqua toscani, modello idrologico messo a punto nell'ambito delle ricerche condotte in collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze.

Per evitare le difficoltà legate alla valutazione del parametro cinematico  $v$  è possibile stimare il parametro  $n$  dall'analisi geomorfologia del bacino, mentre il parametro  $k$  può essere stimato (in accordo con la metodologia adottata nel progetto *ALTO*) considerando che il prodotto  $nk$  rappresenta il tempo di ritardo del bacino  $T_l$  (pari a  $0.6 T_c$ , con  $T_c$ =tempo di corrivazione del bacino). Per la stima dei parametri dell'idrogramma unitario si effettua quindi prima l'analisi geomorfologia del bacino e successivamente si stima il tempo di corrivazione da cui si ricava il parametro  $k$ .

Il GIUH è stato utilizzato per i bacini idrografici principali: Savolano, Sanguigna, Lespa, Fine a monte della diga, Marmolaio e Pescera. Per il bacino del Fine a monte della diga Solvay si sono utilizzati i valori delle costanti  $n$  e  $k$  forniti da Paris e Aminti tramite calibrazione dell'idrogramma di piena in base ai valori di portata registrati nell'evento dell'8/10/93 in uscita dall'invaso di Santa Luce.

La tabella seguente riporta i parametri dell'idrogramma unitario geomorfologico per i diversi sottobacini esaminati:

Tabella 10

Sottobacino	n	k
Savolano	3.16	0.66
Sanguigna	3.41	0.48
Fine a monte diga	2.76	0.15
Lespa	2.48	0.63
Marmolaio	2.88	0.60
Pescera	2.85	0.51

### 3.2.2 L'idrogramma unitario del Soil Conservation Service (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 dimensioni grandi e piccole. Esso ha un vasto campo di applicazione nel campo delle trasformazioni afflussi deflussi effettuate nelle applicazioni pratiche per la sua semplicità d'uso e per la sua generalità.

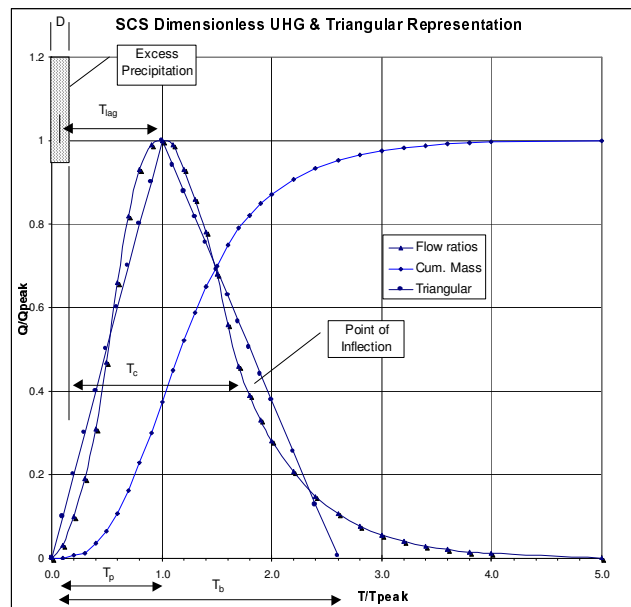


Figura 11: idrogramma unitario SCS

Per la definizione dell'idrogramma unitario adimensionale del SCS per è necessario specificare il tempo di ritardo  $T_1$  del bacino idrografico. Seguendo le indicazioni del SCS si ritiene che il tempo di ritardo sia una caratteristica del bacino: esso può essere valutato a partire dal tempo di corrivazione  $T_c$  secondo la relazione:

$$T_1 \approx \frac{3}{5} T_c$$

L'idrogramma SCS è stato utilizzato per i bacini del Gonnellino, del Ricavo, dell'Acquabona, della Giunca, della Vallicella, del Botro Canale e del Riascio. La tabella seguente riporta il valore del tempo di ritardo per i diversi sottobacini:

Tabella 11

Sottobacino	T <sub>lag</sub> (min.)
Riascio	50
Giunca	36
Acquabona	36
Gonnellino	83
Ricavo	76
Vallicella	27
Canale	47

### 3.2.3 Note sulla scelta del tempo di corrivazione

Nonostante l'importanza pratica della valutazione del tempo di corrivazione (o del tempo di ritardo) si riscontra una certa carenza di formule affidabili basate su serie aggiornate di dati numerosi e significativi. La formula tradizionalmente utilizzata in Italia per la determinazione del tempo di corrivazione è la formula di Giandotti, che è stata però ricavata per bacini di estensione notevole rispetto ai sottobacini del fiume Fine (il bacino idrografico minimo considerato da Giandotti per la deduzione della sua formula ha area di 170 kmq).

Recentemente nell'ambito del progetto VAPI (VALutazione delle Piene in Italia), promosso dal CNR - Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, e nell'ambito dello studio di regionalizzazione delle portate di piena in Toscana sono state proposte nuove formule per la stima del tempo di corrivazione di un bacino idrografico.

Per la stima del tempo di corrivazione dei sottobacini del Fine si è fatta una prima scelta tra le numerose formule disponibili nella letteratura tecnica considerando le caratteristiche idrografiche dei bacini esaminati (in particolare area e pendenza media). In seguito i valori forniti dalle diverse formule sono stati confrontati tra loro e con il valore del tempo di corrivazione stimato attraverso il calcolo del tempo di percorrenza attraverso il percorso idraulico più lungo dei diversi bacini (suddiviso in tratti di lunghezza  $L_i$ ), valutando per ogni tratto la velocità  $V_i$  della corrente in condizioni di piena utilizzando la formula di Manning per il deflusso in canali e corsi d'acqua e la formula dell' *overland flow* per il moto delle particelle d'acqua sui versanti. Il tempo di corrivazione si può quindi calcolare con la relazione:

$$T_c = \sum_i \frac{L_i}{V_i}$$

Sono stati quindi assunti i valori medi dei tempi di corrivazione così calcolati, confortati dal fatto che generalmente i risultati forniti dai diversi metodi di calcolo non sono risultati troppo dissimili tra loro. Di seguito si riportano le varie formule utilizzate per la stima dei tempi di corrivazione (o dei tempi di ritardo, ad essi proporzionali).

In un recente lavoro rosso, Bocchiola, De Michele e Pecora hanno analizzato le caratteristiche di risposta alle precipitazioni di numerosi bacini italiani, giungendo alla seguente espressione del tempo di ritardo del bacino

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

Ferro confrontando tra loro diverse espressioni del tempo di corrivazione dovute a vari Autori ha proposto le due relazioni seguenti:

$$T_c = \frac{0.02221}{60} \left( \frac{L}{1000} \frac{1}{\sqrt{i}} \right)^{0.8}$$

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

A partire da una relazione proposta da Troutman e Karlinger, basata sull'ordinamento del reticolo idrografico secondo Shreve, nell'ambito del progetto VAPI è stata proposta la relazione

$$T_c = \frac{1.25}{0.6} \frac{\sqrt{A}}{c}$$

in cui  $c$  rappresenta la celerità media di propagazione dei picchi di piena.

Nello studio di regionalizzazione delle portate di piena in Toscana sono state individuate 1 e relazioni:

$$T_c = \frac{0.17}{0.6} L$$

$$T_c = \frac{0.32}{0.6} \sqrt{A}$$

Nelle relazioni sopra  $A$ ,  $i$ ,  $L$ ,  $c$  e  $i_m$  e  $S$  indicano rispettivamente l'area del bacino ( $\text{Km}^2$ ), la pendenza media dell'alveo (m/m), la lunghezza dell'asta principale (Km), la celerità di propagazione delle portate (m/sec), la pendenza media del bacino (%) e la ritenzione massima (espressa in mm in funzione del valore del CN).

### 3.2.4 Il Metodo dell'Onda Cinematica (Kinematic Wave)

Il metodo dell'onda cinematica (Kinematic Wave) è un metodo di trasformazione afflussi-deflussi fisicamente basato. Nel metodo KW si utilizzano direttamente 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 vengono definiti due piani rettangolari, percorsi dal deflusso superficiale (*overland flow planes*) ed un canale principale, che raccoglie il deflusso proveniente dai piani rettangolari. In aggiunta al canale principale (che rappresenta fisicamente l'alveo del corso d'acqua principale) possono essere definiti anche due canali collettori secondari, che fisicamente possono rappresentare la rete idrografica minore (scoline e capofossi) drenante le acque della campagna nel corso d'acqua principale.

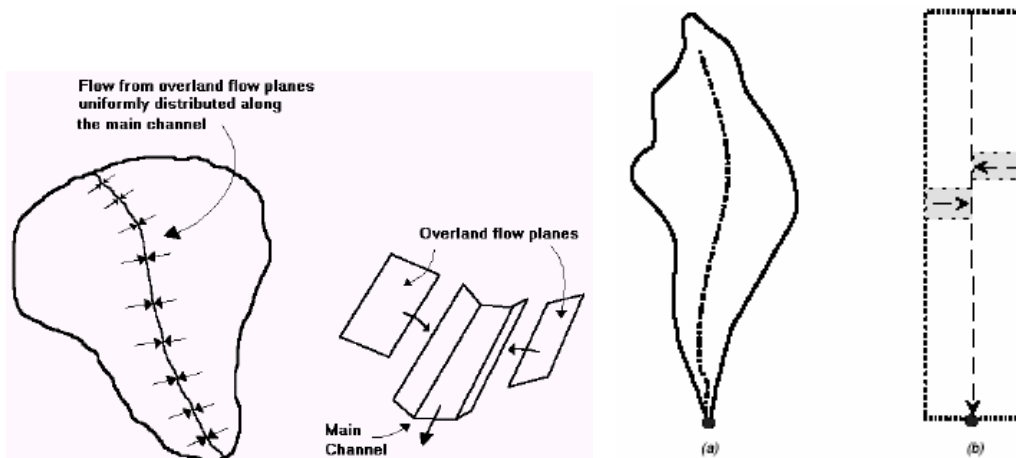


Figura 12: rappresentazione del bacino con il modello KW

Il calcolo inizia a partire 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, considerando le perdite ideologiche con il metodo CN. 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.

Tale metodo risulta particolarmente adatto per la schematizzazione dei sottobacini Savolano 1, 2 e 3 e Fine 1, 1A, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, costituiti da aree minori di ridotta estensione che drenano direttamente nel corso d'acqua principale. In tal caso infatti la schematizzazione fisica del bacino come due piani inclinati risulta perfettamente corrispondente alla realtà fisica ed i parametri del modello possono essere facilmente stimati. L'utilizzo di tale modello consente inoltre di effettuare direttamente la propagazione a moto vario dei deflussi di piena nel canale principale, utilizzando il metodo di Muskingum-Cunge per sezioni dotate di alveo centrale ed aree golenali laterali.

L'equazione che modella il fenomeno di trasferimento della massa liquida sui versanti (*overland flow planes*) che è 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,  $\alpha$  ed  $m$  due parametri univocamente determinati dalla geometria e dalla scabrezza della sezione di deflusso, essendo per ipotesi nel metodo cinematico la scala di deflusso espressa dalla relazione:

$$Q = \alpha A^m$$

Il coefficiente di scabrezza  $N$  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 $\leq$ 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.

*Tabella 8: valori del coefficiente di scabrezza N per correnti overland.*

#### 4. MODELLI DI PROPAGAZIONE A MOTO VARIO DEI DEFLUSSI

Per la definizione delle caratteristiche degli idrogrammi di piena generati da un dato bacino idrografico la propagazione dei deflussi viene generalmente studiata con modelli idrologici delle equazioni complete del moto vario. Infatti ciò che interessa è la definizione dell'andamento delle portate nel tempo in uscita da una prefissata sezione, ed in quest'ottica i fattori determinati sono da ricercarsi nella dinamica delle perdite idrologiche e degli afflussi meteorici, oltretutto nelle caratteristiche di propagazione dei deflussi sui versanti del bacino. Il passaggio poi dagli idrogrammi di piena così calcolati agli effettivi livelli nell'alveo del corso d'acqua avverrà con l'utilizzo di modelli idraulici durante lo studio idraulico.

Per lo studio della propagazione dei deflussi di piena si è adottato il metodo di Muskingum-Cunge. Tale variante del metodo di Muskingum consente una accuratezza dello stesso ordine dei modelli parabolici di propagazione delle onde di piena: il suo impiego risulta quindi preferibile rispetto alla versione tradizionale del metodo di Muskingum.

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

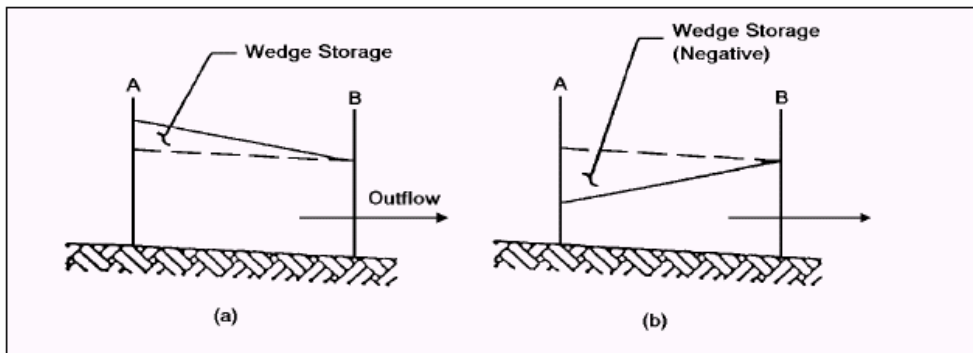


Figura 13: propagazione delle onde di piena con il metodo di Muskingum.

Nel metodo di Muskingum si pone:

$$V = K[XI + (1-X)Q]$$

In cui  $K$  rappresenta il tempo che impiega una portata di riferimento a propagarsi nel tratto di corso d'acqua in esame ed  $X$  è un fattore peso, variabile tra 0 e 0.5.

Il metodo di Muskingum-Cunge è basato sull'equazione di continuità e sull'approssimazione parabolica delle equazioni complete di De Saint Venant. I coefficienti del metodo di Muskingum vengono calcolati in base alle relazioni:

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

in cui  $\Delta x$  è l'intervallo di discretizzazione spaziale,  $\Delta t$  il passo temporale di calcolo,  $c$  la celerità di traslazione dell'onda,  $S_0$  la pendenza di fondo ed  $A$  l'area liquida.

Con tale metodo i valori dei coefficienti  $K$  ed  $X$  del metodo di Muskingum vengono calcolati in base alle caratteristiche del corso d'acqua. Nel caso di alvei a sezione composta costituiti da un alveo centrale e due zone di espansione golenale il calcolo viene effettuato separatamente per le tre sottoaree, assumendo che la pendenza della linea dell'energia sia la stessa nell'alveo centrale e nelle golene laterali.

## **5. RISULTATI: GLI IDROGRAMMI DI PIENA E LE PORTATE MASSIME CON TEMPO DI RITORNO DUECENTENNALE**

A seguire si riportano le portate massime in uscita dai vari sottobacini del fiume Fine per varie durate e per tempi di ritorno di 200 anni. I valori trovati risultano dello stesso ordine di quelli trovati nello studio di Paris ed Aminti, benché l'approccio allo studio del bacino idrografico sia diverso. Nello studio di Paris ed Aminti si determina infatti in un primo tempo l'onda di piena corrispondente ad un dato tempo di ritorno relativa all'intero bacino del Fine (ovvero del fiume Fine più gli affluenti) chiuso alla sezione di sbocco a mare. Successivamente si effettua la propagazione a moto vario di tale onda di piena dalla sezione 17 (a monte della confluenza tra Fine e Savolano) alla sezione 1 di sbocco a mare, considerando il Fine come un'asta solitaria, non considerando cioè il sommarsi delle onde di piena generate dai bacini degli affluenti perché precedentemente considerato per la deduzione degli idrogrammi di piena. Nel presente studio si cerca invece di seguire da monte verso valle l'evoluzione dei fenomeni di formazione e di propagazione degli idrogrammi di piena contemporaneamente per l'asta principale del Fine e per i corsi d'acqua ad esso affluenti.

Per illustrare le differenze tra l'approccio seguito da Paris ed Aminti e l'approccio seguito nel presente studio basta considerare ad esempio le due sezioni lungo il Fine poste la prima a monte della confluenza con il Marmolaio (sezione 11 nella numerazione di Paris ed Aminti) e la seconda a valle della confluenza (sezione 10). Nel modello di Paris ed Aminti tra la sezione 10 e la sezione 11 si verifica una diminuzione della portata defluente nell'alveo del Fine a causa dei fenomeni di laminazione delle portate di piena, nel presente modello si verifica invece un aumento della portata defluente, dovuto al sommarsi delle onde di piena generate separatamente dal Marmolaio e dal Fine. Si ritiene che tale aumento sia di gran lunga superiore alla laminazione che può verificarsi in un tratto così breve come quello compreso tra le sezioni 10 e 11.

## **6. GLI IDROGRAMMI DI PIENA E LE PORTATE MASSIME CON TEMPO DI RITORNO CINQUECENTENNALE**

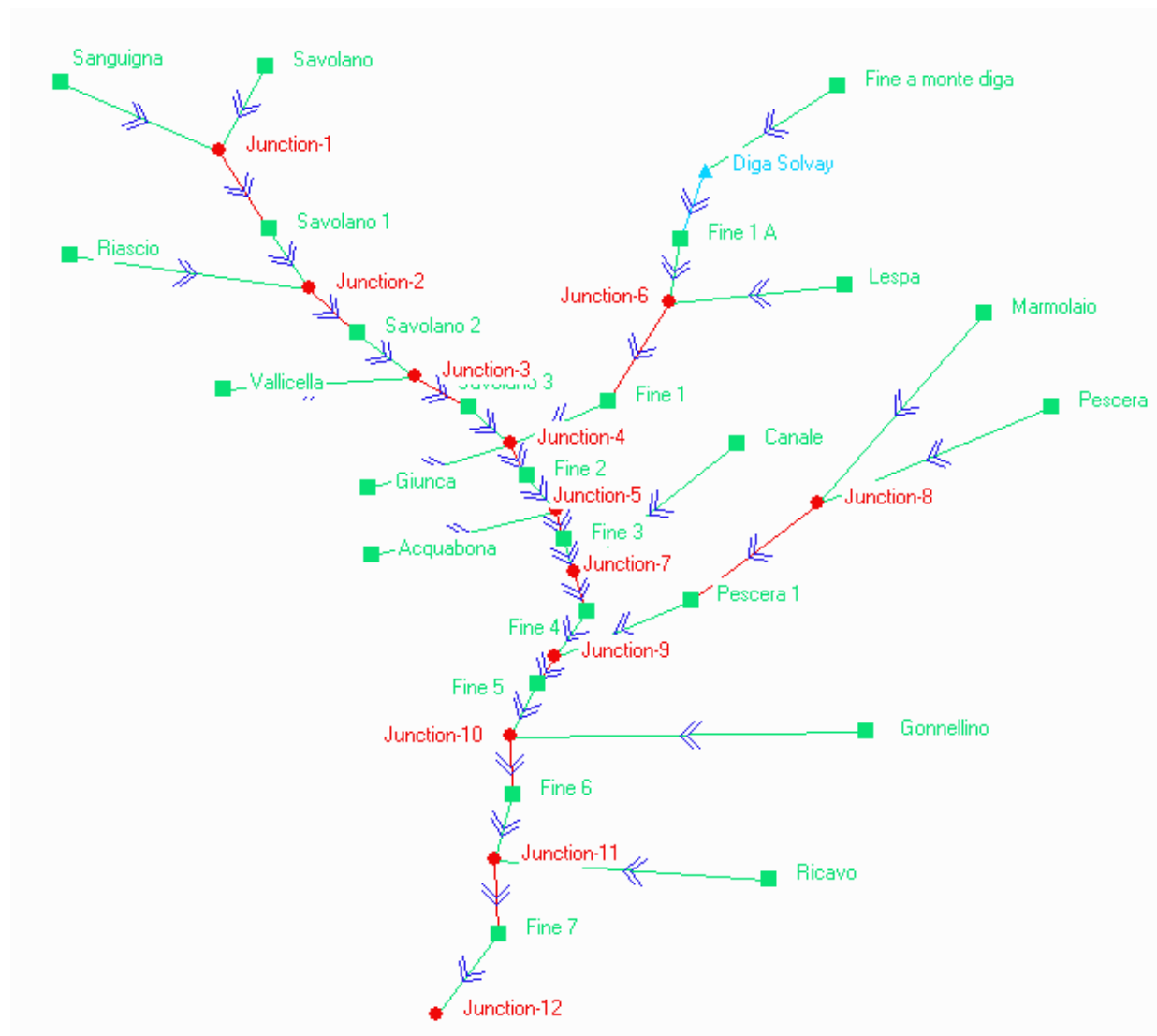
In fase di redazione del progetto preliminare è stata poi richiesta la verifica con tempo di ritorno cinquecentennale della zona di Vada in cui potrà sorgere il nuovo terminale gas Solvay.

Tale verifica è prevista dalla valutazione di impatto ambientale del terminale, attualmente ancora in corso presso il Ministero dell'Ambiente. Si noti che alla data attuale la società Solvay non è in grado di dire se il nuovo terminale gas sarà realizzato o meno, tuttavia come integrazione e completamento dello studio sul fiume Fine (che è basato ai sensi della normativa attualmente vigente in materia di rischio idraulico sulla portata duecentennale) è stata richiesta anche una verifica sulla portata cinquecentennale.

Sulla base di quanto emerso dall'analisi del bacino del Fine per eventi duecentennali, la verifica con tempo di ritorno cinquecentennale è stata effettuata prendendo in esame solamente le piogge con ietogramma triangolare a picco centrato, che si sono rivelate le più gravose per i vari sottobacini in cui è stato suddiviso il Fine. Sono state pertanto prese in esame le piogge con ietogramma triangolare con picco in posizione 0.5 Tp di durata 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 18 e 24 ore. I risultati dell'analisi sono esposti nel seguito.

PORTATE MASSIME DEI PRINCIPALI CORSI D'ACQUA DEL BACINO DEL FINE PER TEMPI DI RITORNO DI 200 E 500 ANNI

IDROGRAMMI DI PIENA IN SEZIONI SIGNIFICATIVE DEL FINE E DEI SUOI PRINCIPALI AFFLUENTI PER TEMPI DI RITORNO DI 200 E 500 ANNI



Schema del bacino del Fine realizzato su HEC-HMS

**Portate massime per piogge con ietogramma triangolare  $r=0.5d$  e varia durata;  $T_r=200$**

Elemento:	Note:	durata di pioggia d(h)									
		1	2	3	4	5	6	12	18	24	max
Acquabona		27.9	27.3	24.3	21.6	19.4	17.7	11.8	9.1	5.1	27.9
Giunca		41.4	39.2	34.4	30.3	27.1	24.6	16.1	12.3	7.2	41.4
Vallicella		14.1	12.0	10.1	8.7	7.7	6.9	4.4	3.3	2.0	14.1
Riasco		37.9	39.4	36.1	32.6	29.6	27.1	18.2	14.0	8.0	39.4
Sanguigna		130.5	154.8	158.8	153.4	145.5	137.3	99.6	76.1	41.7	158.8
Savolano		184.4	218.4	228.8	226.2	217.8	207.9	155.5	117.5	67.5	228.8
Junction-1		311.9	370.5	385.5	377.8	361.8	343.9	254.6	193.6	109.2	385.5
Savolano 1		309.5	368.3	384.1	376.8	361.3	343.5	254.6	192.7	107.9	384.1
Junction-2		336.6	398.9	413.6	404.1	386.7	367.3	271.7	206.7	115.9	413.6
Savolano 2		331.3	394.3	411.1	402.4	386.0	366.7	272.0	205.3	113.4	411.1
Junction-3		332.9	397.0	415.1	406.8	390.6	371.3	275.7	208.5	115.4	415.1
Savolano 3	sezione di chiusura bacino Savolano	322.1	387.1	408.9	402.3	388.2	369.4	275.8	205.4	111.2	408.9
Fine a monte diga		836.4	694.3	576.9	493.8	433.0	387.7	247.1	187.3	116.7	836.4
Diga Solvay		346.0	384.2	372.0	349.8	327.4	307.2	226.2	177.8	99.1	384.2
Fine 1 A		344.9	384.4	373.4	351.4	329.2	309.0	227.7	178.6	98.8	384.4
Lespa		71.6	84.7	86.7	83.9	79.7	75.5	55.4	43.1	24.2	86.7
Junction-6		415.4	468.3	459.2	434.6	408.4	384.0	282.8	221.7	123.0	468.3
Fine 1		406.0	463.9	462.6	440.5	416.5	392.2	290.8	225.4	120.9	463.9
Junction-4		730.9	862.7	886.1	859.5	820.8	778.2	579.3	443.1	239.3	886.1
Fine 2		710.1	846.8	879.4	860.0	826.0	785.3	588.5	440.6	230.6	879.4
Junction-5		715.6	856.1	892.7	873.6	839.9	798.5	599.1	449.7	235.7	892.7
Fine 3		713.5	855.3	888.5	872.9	846.6	806.2	607.5	451.2	235.0	888.5
Canale		49.5	50.4	45.6	41.0	37.0	33.8	22.6	17.3	10.1	50.4
Junction-7		730.9	881.6	914.3	899.0	875.4	833.1	628.0	468.5	245.1	914.3
Fine 4		651.9	819.0	888.4	875.1	861.5	818.9	629.5	457.6	235.5	888.4
Marmolaio		87.5	108.0	110.8	113.3	106.5	104.6	77.6	59.1	29.9	113.3
Pescera		77.8	94.2	97.0	94.0	89.4	84.6	62.2	48.1	25.1	97.0
Junction-8		164.3	201.1	206.8	206.5	195.1	188.6	139.5	107.1	55.0	206.8
Pescera 1	sezione di chiusura bacino Pescera-Marmolaio	164.4	202.5	211.6	210.4	202.9	196.6	146.8	112.0	57.2	211.6
Junction-9	confluenza Fine-Marmolaio	786.5	990.9	1078.8	1075.1	1058.1	1009.1	775.0	569.6	292.7	1078.8
Fine 5		682.3	871.9	995.7	1000.9	1014.1	972.5	775.7	531.2	250.1	1014.1
Gonnellino		63.7	76.1	77.8	75.0	70.9	66.9	48.8	36.4	19.0	77.8
Junction-10	confluenza Fine-Gonnellino	720.9	925.7	1061.5	1064.2	1078.6	1032.9	822.7	567.5	269.1	1078.6
Fine 6		715.3	921.8	1057.9	1062.4	1082.6	1039.7	835.4	544.8	227.5	1082.6
Ricavo		40.9	48.8	49.4	47.3	44.5	41.9	30.3	22.8	11.7	49.4
Junction-11	confluenza Fine-Ricavo	729.2	945.3	1090.3	1095.5	1118.9	1074.0	863.6	567.6	239.2	1118.9
Fine 7	sezione a monte FFSS Livorno-Roma	690.3	899.7	1045.0	1060.8	1092.8	1055.6	860.6	518.6	198.6	1092.8

**Portate massime per piogge con ietogramma triangolare  $r=0.3d$  e varia durata;  $T_r=200$**

Elemento:	Note:	durata di pioggia d(h)									
		1	2	3	4	5	6	12	18	24	max
Acquabona		27.0	25.2	22.0	19.5	17.5	15.9	10.6	8.2	6.8	27.0
Giunca		40.1	36.4	31.5	27.7	24.7	22.4	14.8	11.4	9.4	40.1
Vallicella		13.4	11.1	9.3	8.0	7.1	6.4	4.1	3.1	2.6	13.4
Riasco		37.2	37.3	33.5	30.1	27.2	24.9	16.9	13.1	10.8	37.3
Sanguigna		129.7	150.9	151.1	144.1	135.5	127.4	92.2	73.0	61.0	151.1
Savolano		183.8	215.3	221.7	216.1	206.4	196.2	146.9	117.7	98.9	221.7
Junction-1		310.5	363.7	370.9	358.4	340.5	322.4	238.7	190.5	159.9	370.9
Savolano 1		308.1	361.7	369.6	357.7	340.1	322.1	238.7	190.6	159.9	369.6
Junction-2		334.8	390.8	396.8	382.8	363.5	344.0	254.6	203.2	170.5	396.8
Savolano 2		329.7	386.8	394.6	381.7	362.8	343.7	254.9	203.5	170.8	394.6
Junction-3		331.3	389.8	398.6	386.1	367.3	348.0	258.3	206.3	173.2	398.6
Savolano 3	sezione di chiusura bacino Savolano	320.8	380.7	392.9	382.7	365.2	346.7	258.4	206.6	173.5	392.9
Fine a monte diga		786.1	636.9	526.8	451.3	396.3	355.0	227.5	173.4	142.6	786.1
Diga Solvay		340.7	365.2	347.0	323.7	301.7	282.6	209.0	164.2	137.0	365.2
Fine 1 A		339.8	365.9	348.5	325.4	303.5	284.3	210.4	165.4	138.0	365.9
Lespa		71.1	82.5	82.5	78.8	74.4	70.1	51.4	40.9	34.3	82.5
Junction-6		409.9	447.7	430.2	403.6	377.3	354.0	261.4	206.1	172.3	447.7
Fine 1		401.2	445.7	434.6	410.6	385.4	362.4	268.9	212.5	177.7	445.7
Junction-4		725.5	839.0	842.7	809.1	766.5	724.8	539.2	428.7	359.7	842.7
Fine 2		705.6	826.3	839.8	812.7	773.1	732.9	548.1	436.5	366.4	839.8
Junction-5		711.2	836.0	852.4	825.8	786.0	745.4	557.9	444.4	373.0	852.4
Fine 3		709.2	834.9	855.9	831.4	793.4	753.6	566.0	451.4	379.0	855.9
Canale		48.5	47.5	42.3	37.8	34.1	31.1	20.9	16.2	13.4	48.5
Junction-7		726.7	860.0	883.8	858.9	819.7	778.6	585.0	466.6	391.8	883.8
Fine 4		649.1	794.9	846.1	831.7	802.3	767.7	584.5	468.8	394.0	846.1
Marmolaio		87.0	105.6	109.2	106.4	101.6	96.5	72.2	58.0	48.8	109.2
Pescera		77.3	91.3	91.6	87.5	82.4	77.6	56.5	44.9	37.6	91.6
Junction-8		163.2	195.9	200.0	193.1	183.4	173.5	128.5	102.7	86.4	200.0
Pescera 1	sezione di chiusura bacino Pescera-Marmolaio	163.5	198.2	205.0	200.3	191.2	181.5	135.4	108.4	91.3	205.0
Junction-9	confluenza Fine-Marmolaio	783.2	969.0	1031.3	1022.1	986.6	944.1	718.8	576.9	485.0	1031.3
Fine 5		680.5	860.5	942.1	959.7	945.4	916.6	717.9	581.0	490.6	959.7
Gonnellino		63.2	74.0	73.9	70.1	65.6	61.5	44.6	35.4	29.7	74.0
Junction-10	confluenza Fine-Gonnellino	718.9	913.2	1001.4	1019.7	1003.5	972.2	760.6	615.5	519.7	1019.7
Fine 6		713.4	909.7	999.4	1020.9	1009.3	981.0	772.9	626.4	529.4	1020.9
Ricavo		40.6	47.2	46.6	43.9	40.9	38.3	27.5	21.8	18.3	47.2
Junction-11	confluenza Fine-Ricavo	727.4	933.1	1029.0	1053.3	1041.9	1012.9	798.5	647.3	547.1	1053.3
Fine 7	sezione a monte FFSS Livorno-Roma	688.8	890.1	991.1	1024.7	1021.5	998.6	796.0	647.5	548.1	1024.7

Portate massime per piogge con ietogramma ad intensità costante e varia durata; Tr=200											
Elemento:	Note:	durata di pioggia d(h)									Valori max
		1	2	3	4	5	6	12	18	24	
Acquabona		25.2	21.6	17.6	14.8	14.8	11.3	7.0	5.2	4.2	25.2
Giunca		36.8	30.1	24.0	19.9	19.9	15.0	9.1	6.8	5.5	36.8
Vallicella		11.7	8.5	6.5	5.3	5.3	4.0	2.4	1.8	1.4	11.7
Riasco		35.4	32.0	26.7	22.5	22.5	17.1	10.4	7.8	6.3	35.4
Sanguigna		127.5	142.2	135.6	122.3	122.3	97.5	60.5	45.2	36.7	142.2
Savolano		181.4	205.2	202.3	187.9	187.9	153.6	95.1	70.7	57.2	205.2
Junction-1		306.3	345.7	337.2	309.9	309.9	251.1	155.6	115.9	93.8	345.7
Savolano 1		304.0	343.8	335.9	309.3	309.3	251.0	155.7	116.0	93.9	343.8
Junction-2		330.3	372.0	361.5	331.4	331.4	268.1	166.1	123.7	100.2	372.0
Savolano 2		325.4	368.2	359.3	330.5	330.5	268.2	166.5	124.0	100.5	368.2
Junction-3		327.0	371.2	363.5	335.0	335.0	272.1	168.9	125.8	101.9	371.2
Savolano 3	sezione di chiusura bacino Savolano	317.0	363.1	358.5	332.5	332.5	271.9	169.4	126.2	102.3	363.1
Fine a monte diga		706.1	486.1	368.9	301.3	301.3	225.4	136.4	101.4	82.1	706.1
Diga Solvay		333.0	343.6	312.0	276.2	276.2	220.8	135.7	101.1	82.0	343.6
Fine 1 A		332.0	343.5	312.5	277.0	277.0	222.1	136.6	101.8	82.5	343.5
Lespa		70.0	78.3	75.2	68.3	68.3	54.8	34.1	25.4	20.6	78.3
Junction-6		401.2	421.7	387.6	345.2	345.2	276.9	170.7	127.2	103.1	421.7
Fine 1		392.4	416.7	386.3	346.8	346.8	283.3	175.8	131.2	106.3	416.7
Junction-4		714.9	795.4	762.7	697.0	697.0	569.9	354.3	264.2	214.1	795.4
Fine 2		695.8	783.1	757.9	697.6	697.6	577.8	361.1	269.3	218.4	783.1
Junction-5		701.3	792.1	769.1	710.4	710.4	589.1	368.1	274.6	222.7	792.1
Fine 3		699.4	790.9	769.1	711.9	711.9	596.2	374.0	279.1	226.4	790.9
Canale		45.7	40.3	33.2	27.8	27.8	21.1	12.8	9.5	7.7	45.7
Junction-7		716.8	814.4	794.7	737.8	737.8	617.2	386.8	288.6	234.1	814.4
Fine 4		642.6	762.3	768.4	726.6	726.6	617.8	391.6	292.5	237.3	768.4
Marmolaio		86.1	101.4	101.6	95.3	95.3	79.5	51.0	38.4	31.2	101.6
Pescera		76.1	87.0	84.0	76.6	76.6	62.0	39.2	29.5	24.0	87.0
Junction-8		161.2	187.5	185.2	171.7	171.7	141.5	90.2	67.9	55.3	187.5
Pescera 1	sezione di chiusura bacino Pescera-Marmolaio	161.4	189.2	189.2	178.0	178.0	148.5	95.1	71.5	58.3	189.2
Junction-9	confluenza Fine-Marmolaio	775.9	929.8	943.7	898.2	898.2	766.0	486.6	364.1	295.6	943.7
Fine 5		676.3	837.1	882.6	865.1	865.1	761.5	494.2	370.6	301.1	882.6
Gonnellino		62.1	69.0	65.0	58.9	58.9	47.8	30.2	22.7	18.4	69.0
Junction-10	confluenza Fine-Gonnellino	714.8	889.0	939.5	921.1	921.1	809.2	524.5	393.3	319.6	939.5
Fine 6		709.4	885.7	937.6	921.3	921.3	815.2	534.2	401.1	326.1	937.6
Ricavo		39.8	43.8	40.9	36.9	36.9	29.8	18.9	14.2	11.6	43.8
Junction-11	confluenza Fine-Ricavo	723.5	909.4	966.7	952.6	952.6	844.6	553.1	415.3	337.6	966.7
Fine 7	sezione a monte FFSS Livorno-Roma	685.6	870.3	937.8	934.9	934.9	839.2	554.4	416.8	339.1	937.8



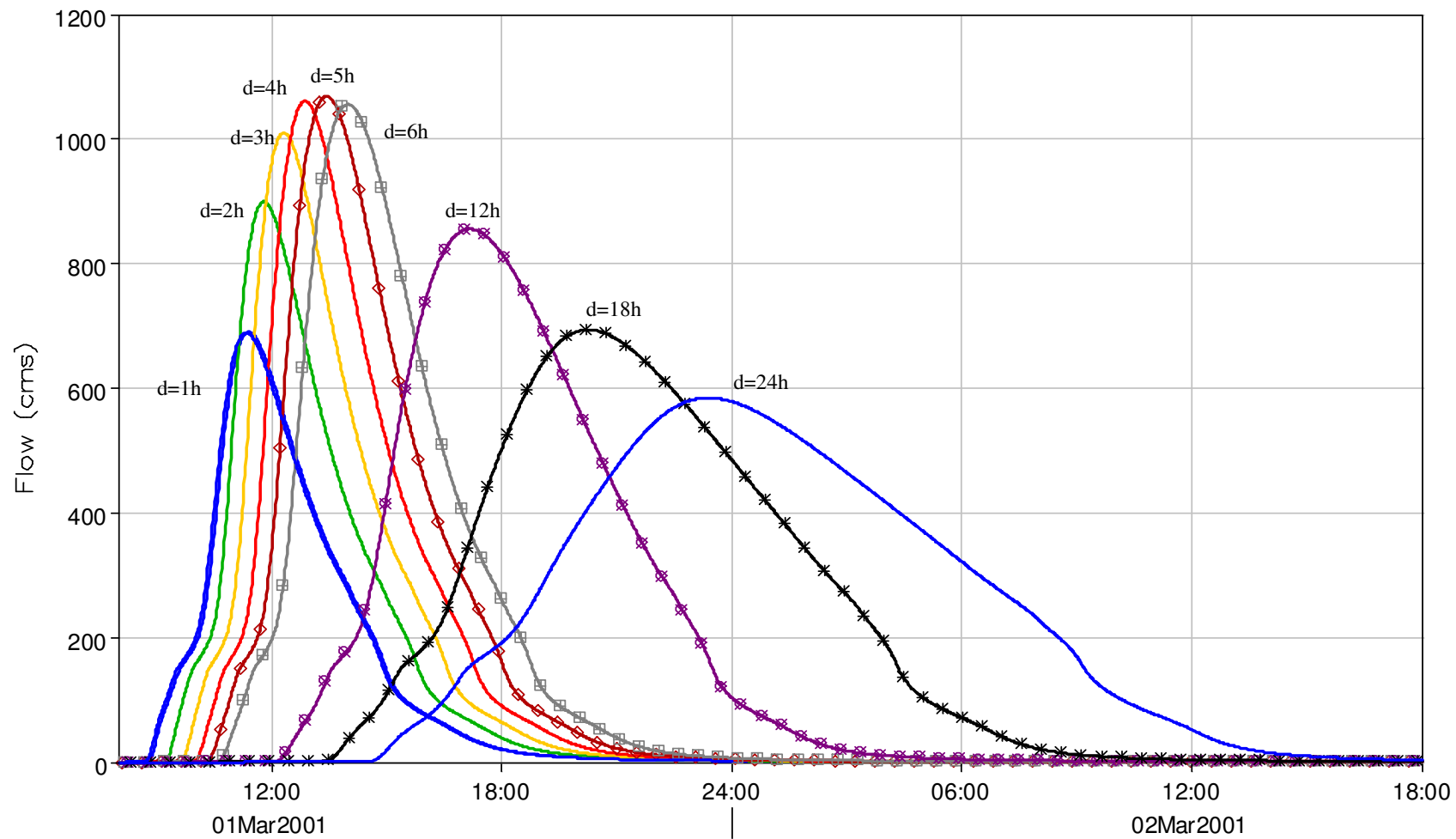


Figura 14 - Onde di piena a monte del ponte della linea FS Livorno-Roma per varie durate d di pioggia con ietogramma triangolare a picco centrato ( $r=0.5$ )

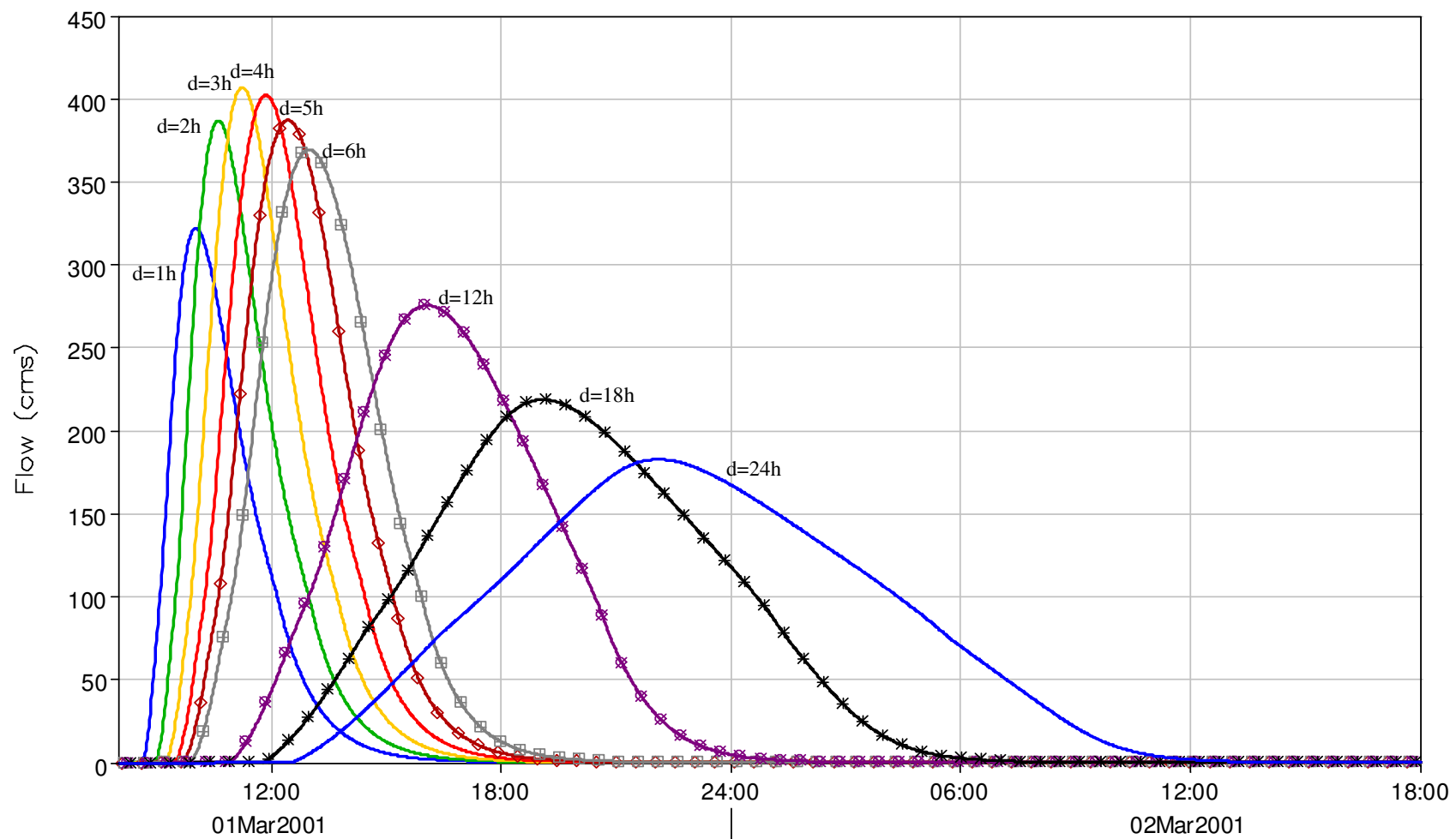


Figura 15 - Onde di piena alla sezione di chiusura del bacino complessivo del Savolano per varie durate d di pioggia con ietogramma triangolare a picco centrato ( $r=0.5$ )

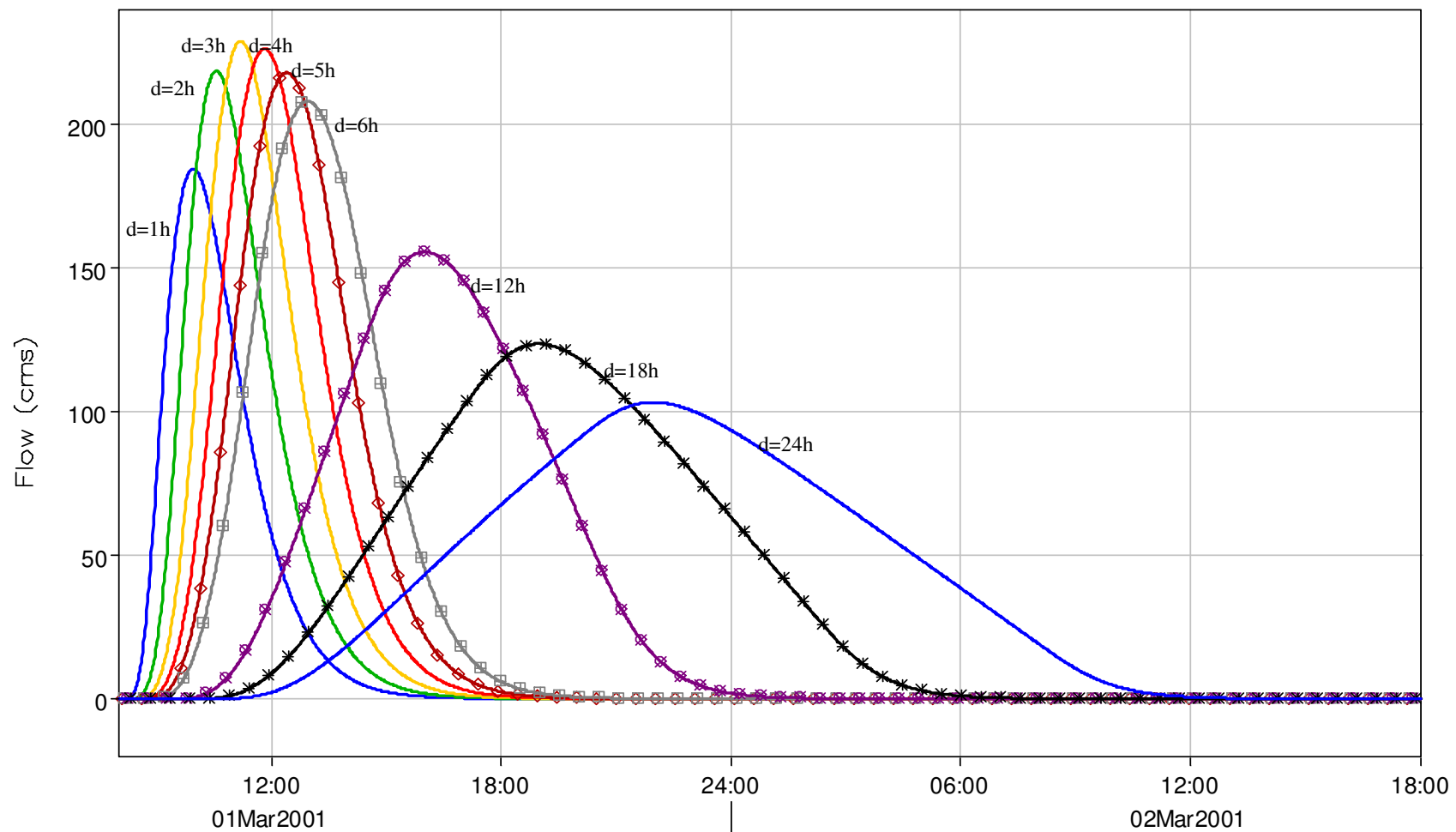


Figura 16 - Onde di piena alla sezione di chiusura del bacino del Savolano a monte della confluenza con la Sanguigna per varie durate d di pioggia con ietogramma triangolare a picco centrato ( $r=0.5$ )

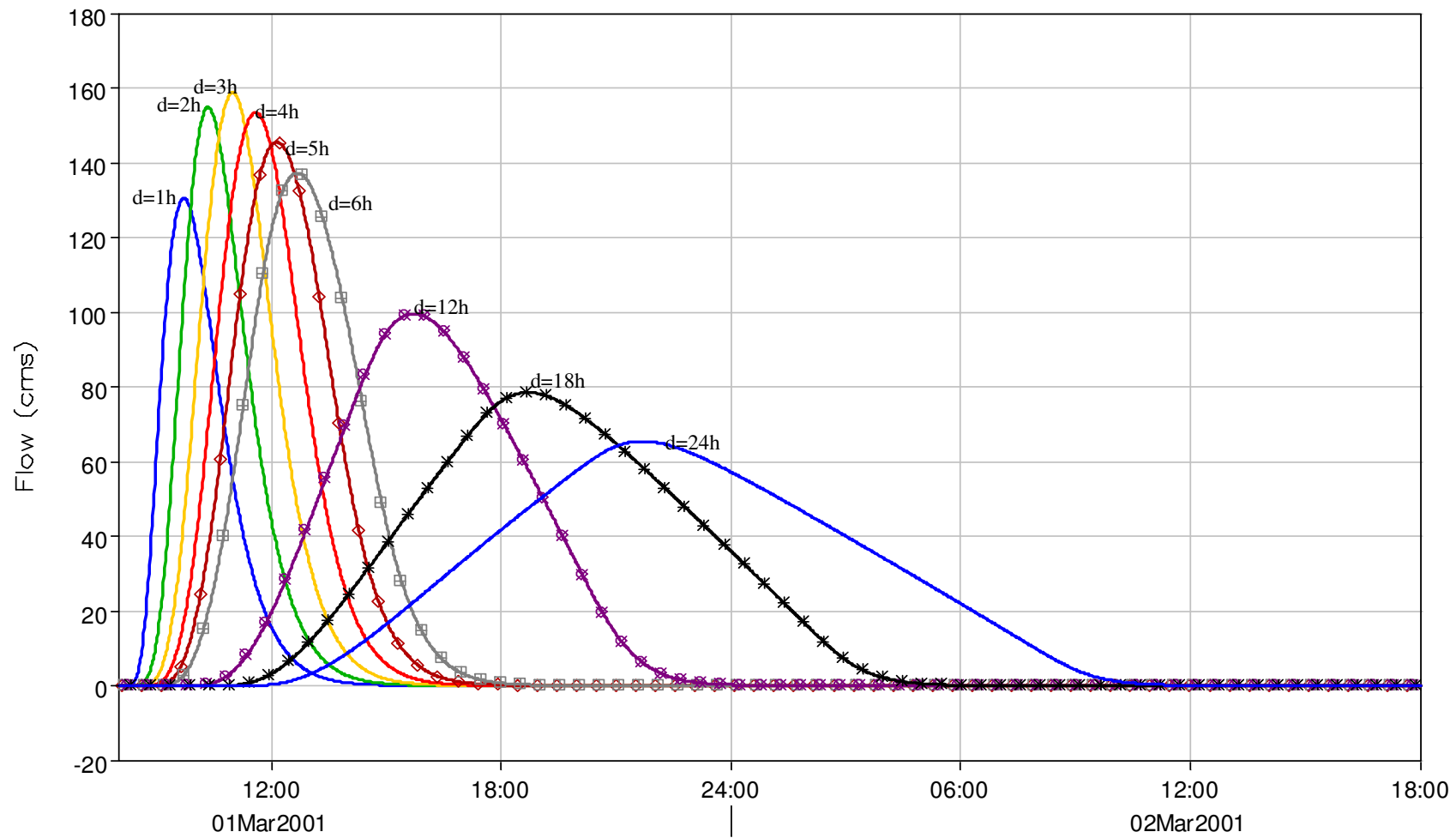


Figura 17 - Onde di piena alla sezione di chiusura del bacino della Sanguigna per varie durate d di pioggia con ietogramma triangolare a picco centrato ( $r=0.5$ )

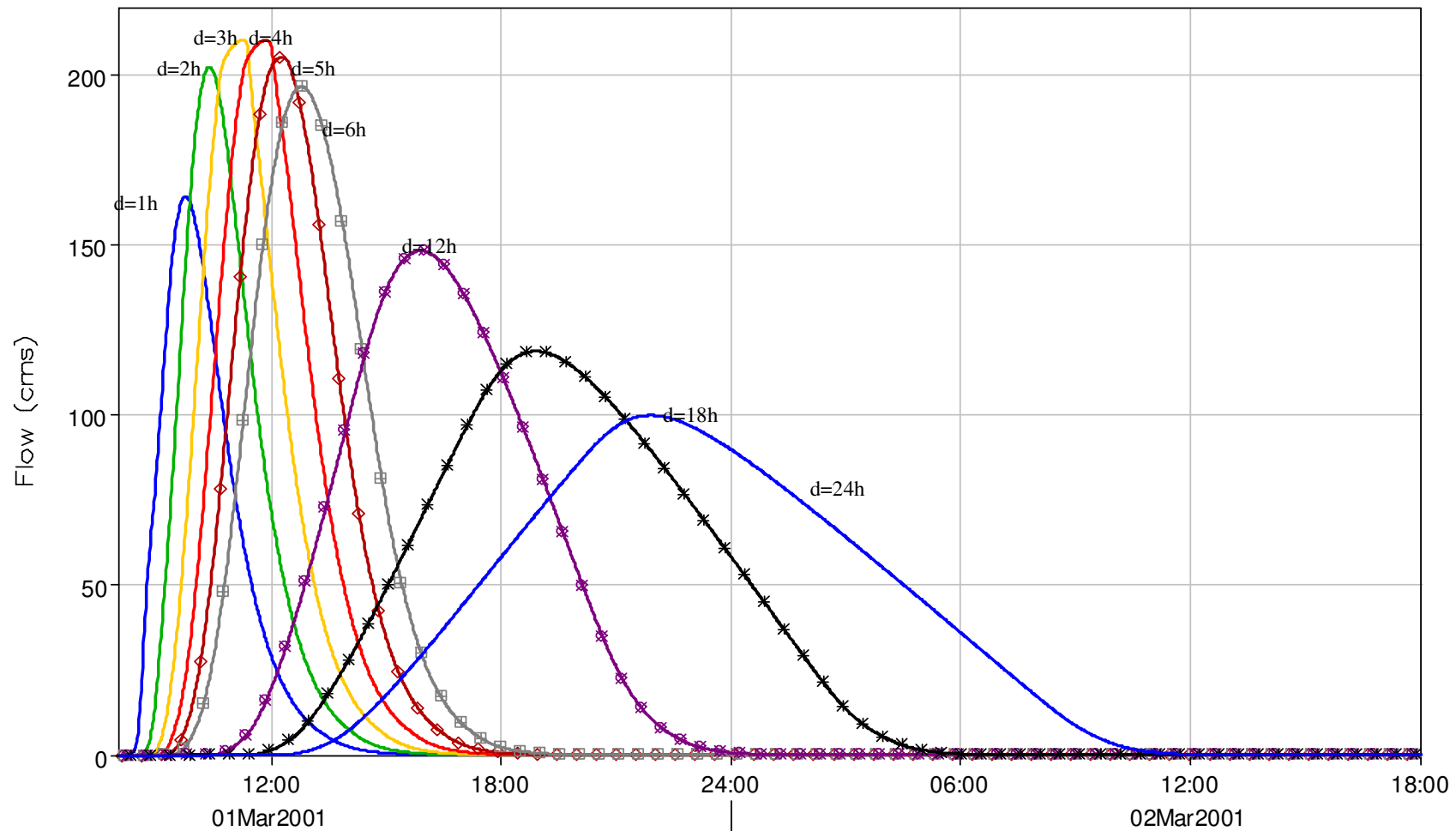


Figura 18 - onde di piena alla sezione di chiusura del bacino della Pescara-Marmolaio per varie durate d di pioggia con ietogramma triangolare a picco centrato ( $r=0.5$ )

**Portate massime per piogge con ietogramma triangolare  $r=0.5d$  e varia durata;  $T_r=500$**

Elemento:	Note:	durata di pioggia d(h)									
		1	2	3	4	5	6	12	18	24	max
Acquabona		35.3	34.0	30.0	26.6	23.8	21.6	14.3	11.0	9.1	35.3
Giunca		51.2	47.9	41.7	36.7	32.7	29.6	19.3	14.7	12.1	51.2
Vallicella		17.2	14.5	12.2	10.4	9.2	8.2	5.2	3.9	3.2	17.2
Riasco		46.7	47.9	43.7	39.3	35.6	32.5	21.7	16.7	13.7	47.9
Sanguigna		161.8	189.9	193.4	186.2	175.9	165.5	119.2	93.6	77.8	193.4
Savolano		223.5	262.9	274.3	270.4	259.7	247.3	183.9	145.7	121.5	274.3
Junction-1		381.5	449.5	465.1	454.3	433.6	411.2	302.5	239.0	199.2	465.1
Savolano 1		378.8	446.9	463.2	453.2	432.9	410.7	302.5	239.1	199.3	463.2
Junction-2		412.6	484.4	499.0	486.2	463.5	439.3	322.9	255.2	212.6	499.0
Savolano 2		406.5	479.3	495.7	484.3	462.5	438.8	323.2	255.5	213.0	495.7
Junction-3		408.5	482.7	500.6	489.8	468.1	444.2	327.6	259.1	216.0	500.6
Savolano 3	sezione di chiusura bacino Savolano	396.0	471.3	492.4	484.7	464.9	442.2	327.6	259.4	216.4	492.4
Fine a monte diga		1026.7	843.9	697.6	595.6	520.9	465.3	294.8	223.0	182.1	1026.7
Diga Solvay		432.5	475.1	455.8	425.9	396.2	369.9	265.5	213.1	176.0	475.1
Fine 1 A		431.2	475.5	457.5	428.0	398.4	372.0	267.3	214.6	177.2	475.5
Lespa		88.4	103.6	105.3	101.6	96.2	90.8	66.2	52.3	43.6	105.3
Junction-6		518.1	577.9	561.6	528.5	493.9	462.3	333.4	266.5	220.6	577.9
Fine 1		507.7	573.5	565.1	536.2	503.2	472.3	342.5	274.2	227.2	573.5
Junction-4		907.5	1059.5	1076.6	1040.9	988.3	934.6	686.5	546.2	454.1	1076.6
Fine 2		882.3	1041.2	1069.3	1042.7	994.9	943.5	697.4	555.7	462.3	1069.3
Junction-5		890.4	1054.3	1085.9	1060.2	1012.0	960.0	710.1	566.0	471.0	1085.9
Fine 3		879.4	1047.4	1082.9	1062.1	1017.6	967.4	719.9	574.6	478.4	1082.9
Canale		60.9	61.2	55.1	49.3	44.5	40.5	26.9	20.6	16.9	61.2
Junction-7		897.9	1073.5	1114.3	1095.1	1049.7	998.2	744.1	593.9	494.6	1114.3
Fine 4		834.4	1006.1	1063.4	1061.3	1029.6	986.7	745.9	596.9	498.4	1063.4
Marmolaio		110.8	134.8	141.7	139.6	134.1	127.8	95.9	76.6	64.3	141.7
Pescera		98.8	117.8	120.2	115.9	109.7	103.5	75.4	59.6	49.8	120.2
Junction-8		208.2	251.3	260.8	254.5	243.0	230.6	171.0	136.1	114.0	260.8
Pescera 1	sezione di chiusura bacino Pescera-Marmolaio	205.8	243.0	256.6	254.8	246.2	235.5	179.6	143.2	120.1	256.6
Junction-9	confluenza Fine-Marmolaio	1002.9	1249.1	1319.8	1315.8	1275.5	1222.1	923.3	739.2	617.9	1319.8
Fine 5		868.5	1103.9	1215.8	1240.2	1224.5	1189.2	922.5	744.2	624.4	1240.2
Gonnellino		79.8	94.1	95.5	91.7	86.4	81.2	58.7	46.4	38.7	95.5
Junction-10	confluenza Fine-Gonnellino	922.1	1176.7	1288.9	1315.1	1298.7	1261.0	978.9	789.4	662.3	1315.1
Fine 6		917.5	1169.2	1284.0	1314.2	1301.9	1269.0	994.1	803.3	674.5	1314.2
Ricavo		51.8	60.8	61.1	58.2	54.5	51.1	36.7	28.9	24.1	61.1
Junction-11	confluenza Fine-Ricavo	939.0	1201.1	1320.5	1353.9	1343.3	1310.2	1028.1	830.9	697.8	1353.9
Fine 7	sezione a monte FFSS Livorno-Roma	889.0	1141.9	1270.6	1318.5	1318.3	1292.2	1025.6	831.2	698.9	1318.5

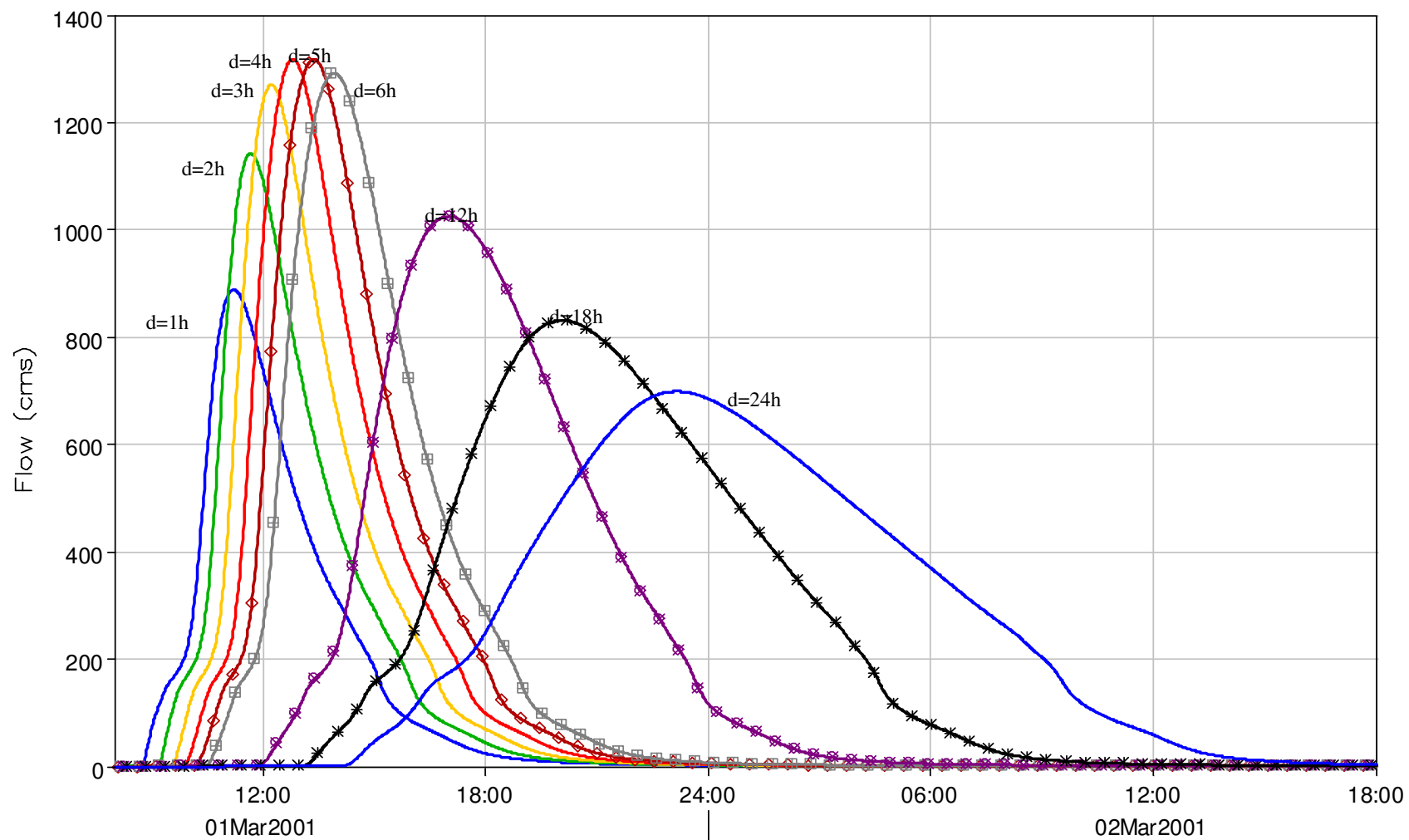


Figura 19 - Onde di piena a monte del ponte della linea FS Livorno-Roma per varie durate d di pioggia con ietogramma triangolare a picco centrato ( $r=0.5$ ),  $T_r=500$ .

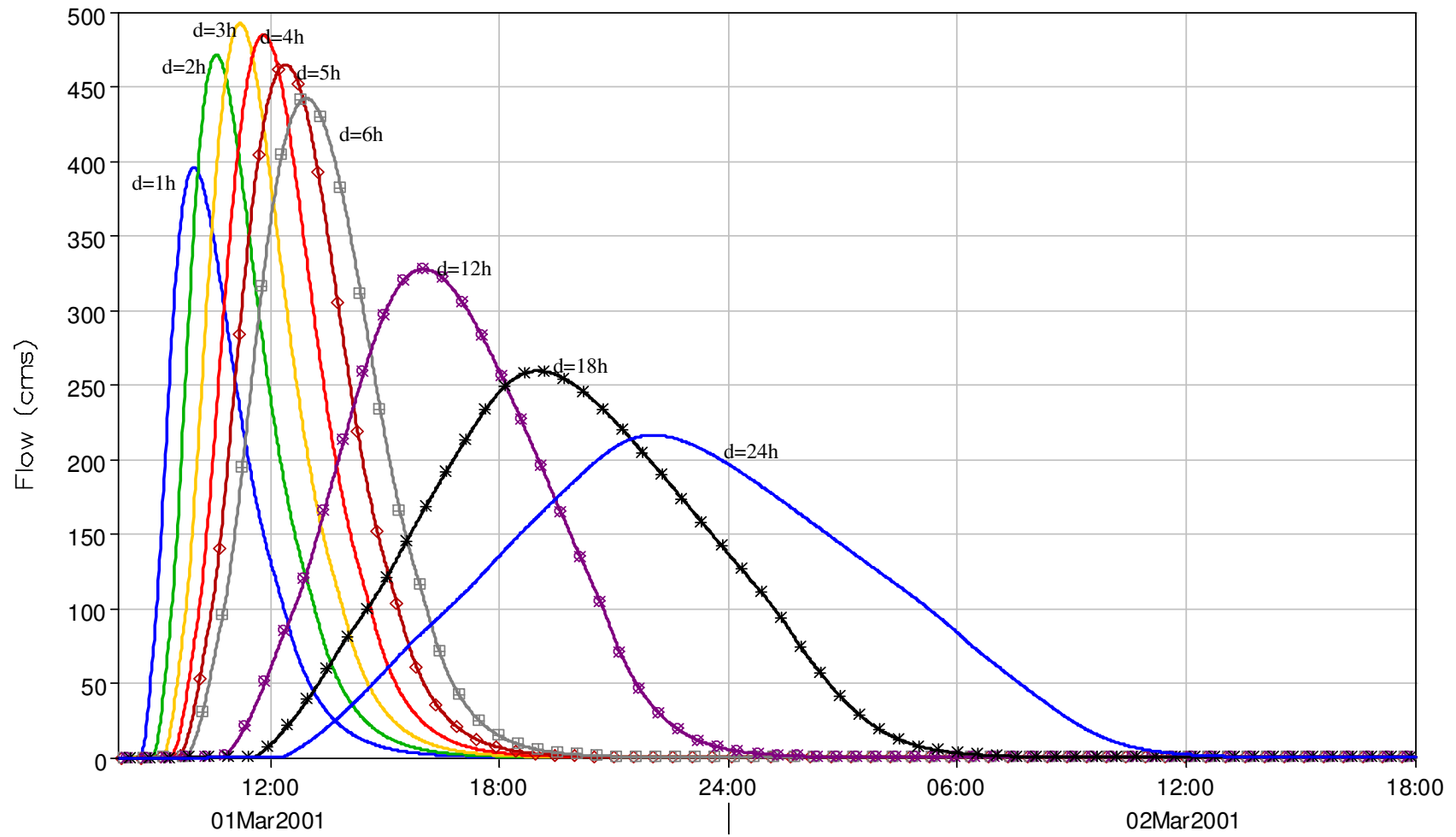


Figura 20 - Onde di piena alla sezione di chiusura del bacino complessivo del Savolano per varie durate d di pioggia con ietogramma triangolare a picco centrato ( $r=0.5$ ),  $T_r=500$ .



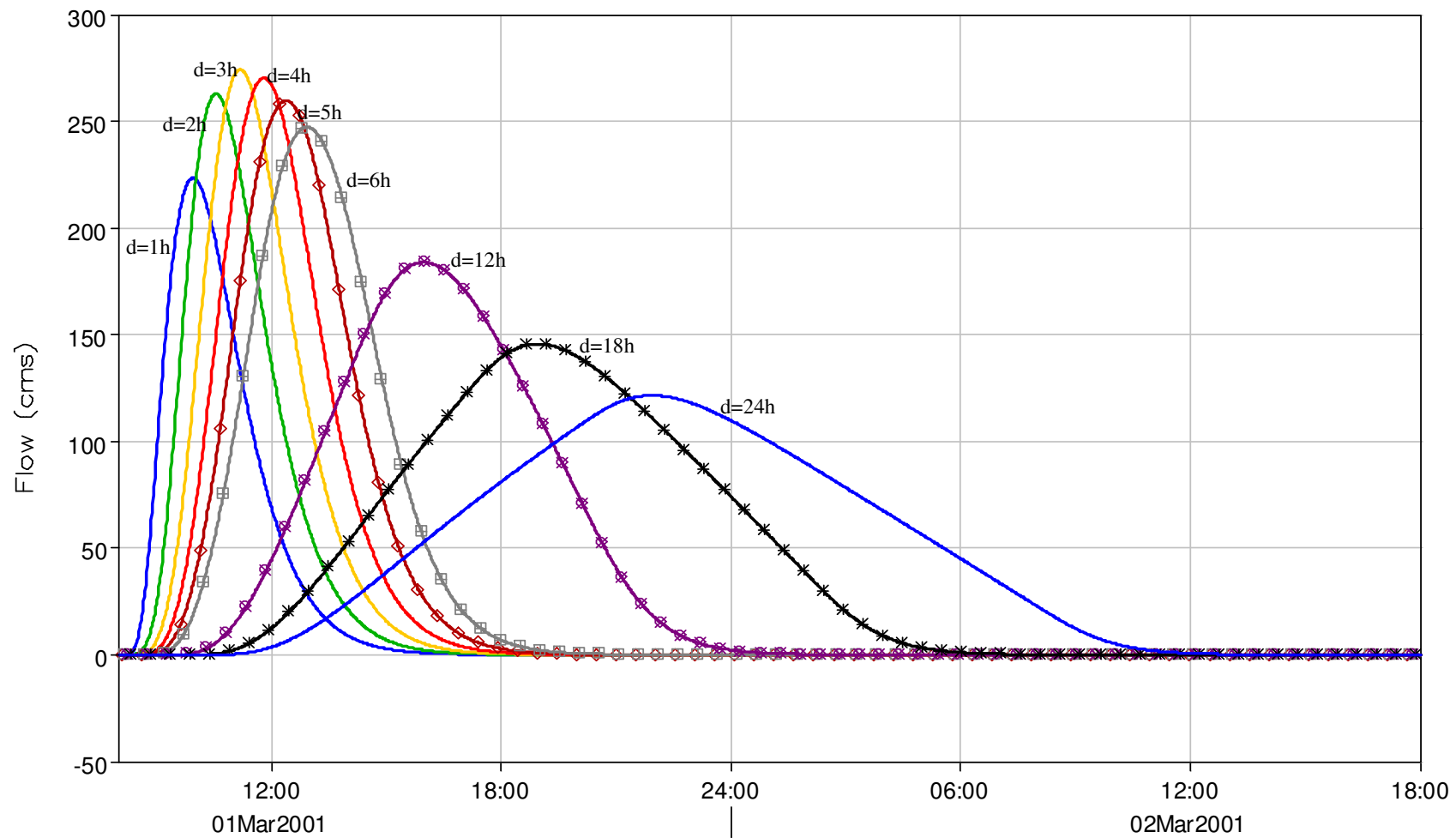


Figura 21 - Onde di piena alla sezione di chiusura del bacino del Savolano a monte della confluenza con la Sanguigna per varie durate d di pioggia con ietogramma triangolare a picco centrato ( $r=0.5$ ),  $T_r=500$ .

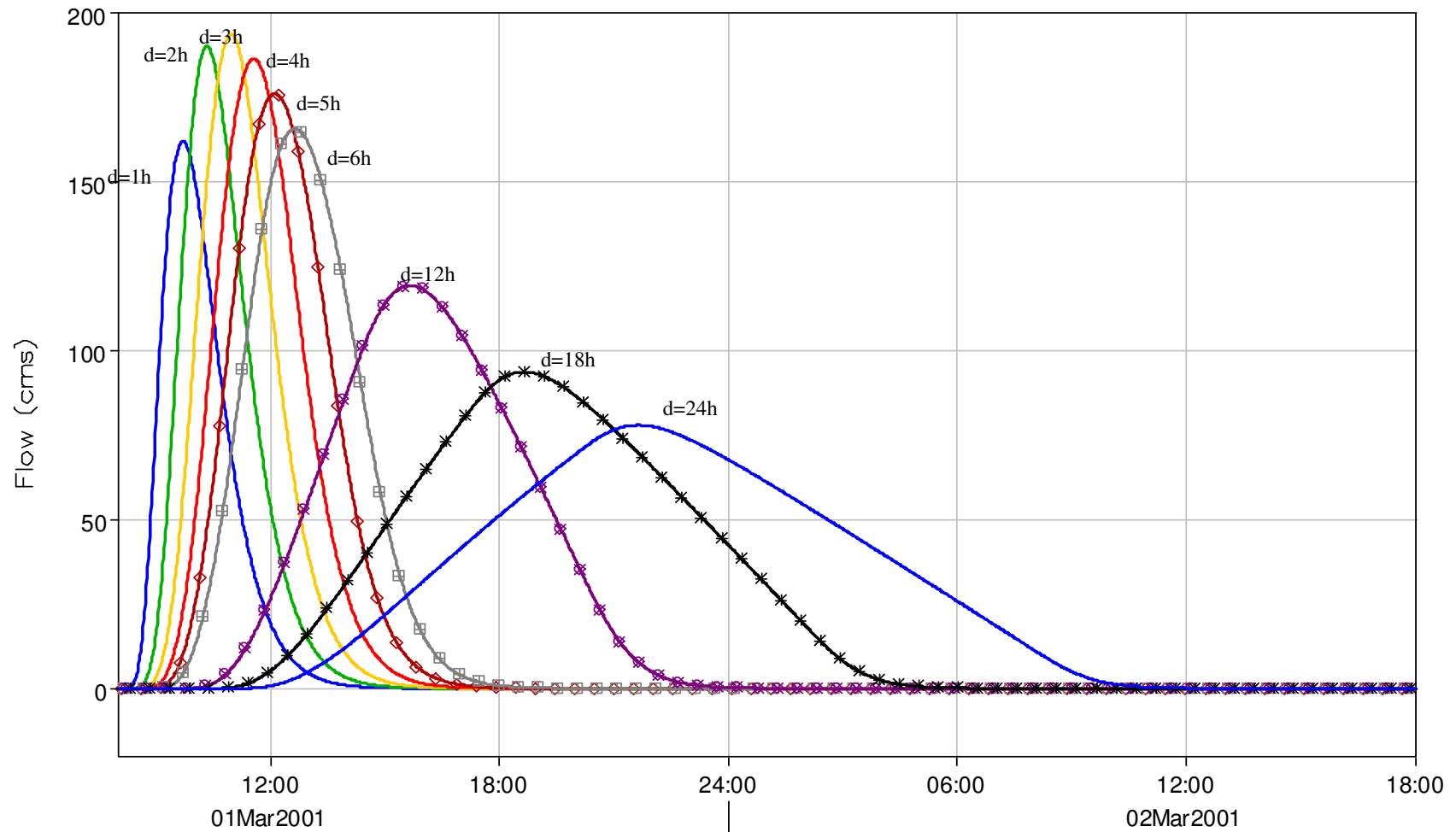


Figura 22 - Onde di piena alla sezione di chiusura del bacino della Sanguigna per varie durate d di pioggia con ietogramma triangolare a picco centrato ( $r=0.5$ ),  $T_r=500$ .

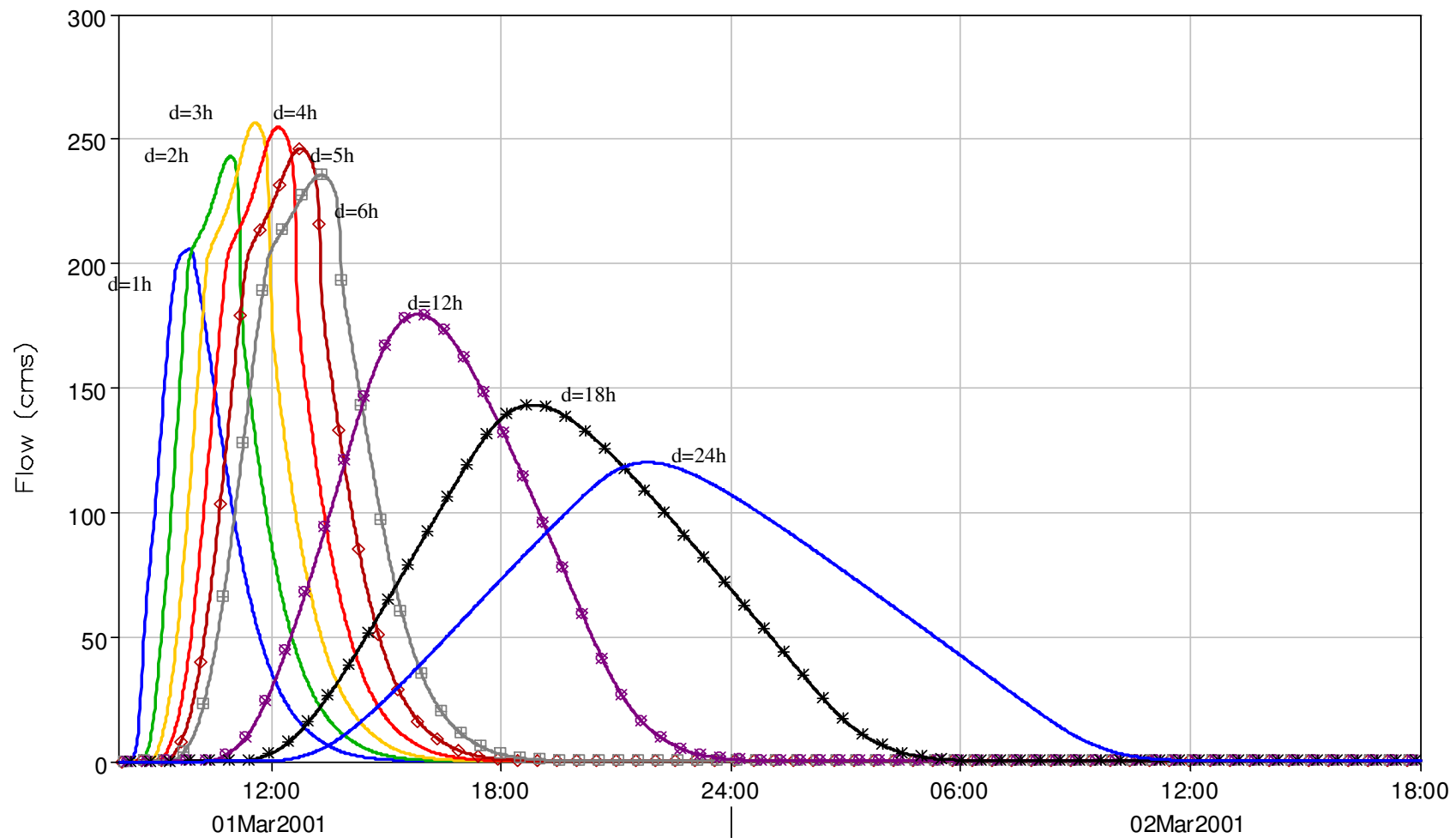


Figura 23 - onde di piena alla sezione di chiusura del bacino della Pescera-Marmolaio per varie durate d di pioggia con ietogramma triangolare a picco centrato ( $r=0.5$ ),  $T_r=500$ .