



COMUNE DI MONTALE

**STUDIO IDROLOGICO E IDRAULICO
PER LA VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ
IDRAULICA E DEFINIZIONE DEGLI INTERVENTI DI
MESSA IN SICUREZZA IN UN'AREA POSTA ALLA
CONFLUENZA TRA I TORRENTI AGNA DELLE CONCHE
E AGNA DI ACQUIPUTTOLI IN FRAZIONE FOGNANO
NEL COMUNE DI MONTALE**

CODICE:

R.01

ELABORATO:

RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA

SCALA -

**WEST
Systems**

West Systems s.r.l. divisione
PHYSIS - Ingegneria per l'ambiente

Viale Donato Giannotti 24
- 50126 - FIRENZE
Tel. 055 4684253 / 055 461429
Fax. 055 6580564
Pec.: amministrazione@pec.westsystems.it

PROGETTISTA:

Ing. David Settesoldi

COLLABORATORI TECNICI:

Ing. Michele Catella
P.E. Mattia Fermi

COMMITTENTE:

MERIDIANA IMMOBILIARE

02					
01					
00	PRIMA EMISSIONE	21/01/2019	Ing. Michele Catella	Ing. Michele Catella	Ing. David Settesoldi
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
REVISIONE			DATA		
00			21/01/2019		

INDICE

1	PREMESSA	5
1.1	<i>Articolazione dello studio</i>	8
2	IL QUADRO CONOSCITIVO	9
2.1	<i>Gli studi esistenti</i>	9
2.2	<i>I dati territoriali</i>	9
2.3	<i>I rilievi topografici</i>	10
3	ANALISI IDROLOGICA.....	11
3.1	<i>Le curve di possibilità pluviometrica</i>	11
3.2	<i>Caratteristiche del modello afflussi-deflussi</i>	11
3.3	<i>Implementazione del modello idrologico</i>	20
3.4	<i>Taratura del modello idrologico</i>	21
3.5	<i>Confronto con studi precedenti</i>	23
4	ANALISI IDRAULICA	25
4.1	<i>Definizione dei corsi d'acqua oggetto di studio</i>	25
4.2	<i>Gli elementi del modello idraulico</i>	25
4.3	<i>Aree bidimensionali</i>	25
4.4	<i>Parametri del modello idraulico</i>	26
5	VERIFICA DELLO STATO ATTUALE.....	30
5.1	<i>Individuazione dei tratti critici e delle aree inondabili dello stato attuale</i>	30
5.2	<i>Perimetrazione della pericolosità idraulica dello stato attuale</i>	31
5.3	<i>Perimetrazione della magnitudo idraulica dello stato attuale</i>	31
6	DEFINIZIONE E VERIFICA DELLO STATO DI PROGETTO	32
6.1	<i>Definizione degli interventi di riassetto idraulico</i>	32
6.2	<i>Verifica dello stato di progetto</i>	32
7	CONCLUSIONI.....	34
A.	APPENDICE Il modello idrologico a parametri distribuiti PIENE	35
B.	APPENDICE Tabulati analisi idrologica con il modello PIENE (portate al colmo bacini totali) .	45

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 – Corografia dell'area di interesse (scala 1:10.000).....	5
Figura 1.2 – Planimetria del territorio urbanizzato nell'area di interesse (estratto elab. 2.1 P.O. Comune di Montale).	6
Figura 3.1 – Immissioni area torrenti Vincio e Vinciarello.	12
Figura 3.2 – Mappa coefficiente a	12
Figura 3.3 – Mappa coefficiente n	13
Figura 3.4 – Mappa coefficiente m	13
Figura 3-5 – Modello digitale del terreno.	17
Figura 3-6 – Capacità di ritenuta.	18
Figura 3-7 – Velocità filtrazione.....	19
Figura 3-8 – Sezione in corrispondenza dell'idrometro del Calice alla Variante Pratese.	22
Figura 3-9 – Evento 06-03-2017.	22
Figura 3-10 – Evento 08-12-2017.	23
Figura 4-1 – Particolare delle maglie di calcolo adottate per la schematizzazione del modello bidimensionale (scala 1:2.000).	27
Figura 4-2 – Planimetria della copertura del suolo del modello bidimensionale (scala 1:5.000).	28
Figura 6-1 – Confronto tra gli drogrammi della portata duecentennale in transito nella sezione _1 nello stato attuale e in quello di progetto.	33

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3-1- Elenco delle variabili utilizzate dal modello afflussi-deflussi	15
Tabella 3-2 – Tabella parametri.	21
Tabella 3-3 – Eventi del Calice alla Variante Pratese.	21
Tabella 3-4 – Stazioni pluviometriche.	21
Tabella 3-5 – Parametri taratura del Calice alla Variante Pratese.	23
Tabella 3-6 – Confronto dei colmi di portata con studi precedenti.	24
Tabella 4-1 – Elenco dei corsi d'acqua area torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli.	25
Tabella 4-2 – Maglie di calcolo bidimensionale dei corsi area d'acqua torrenti Greve e Vingone.	26
Tabella 4-3 – Scabrezze aree bidimensionali.	26
Tabella B-1 – Tabulati analisi idrologica per $Tr = 30$ anni sistema torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli.	46
Tabella B-2 – Tabulati analisi idrologica per $Tr = 200$ anni sistema torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli.	46

ELENCO ELABORATI

Relazioni

R.01 – Relazione idrologica e idraulica

Allegati

A.01 – Tabulati verifiche idrauliche stato attuale e stato di progetto

A.02 – Profili longitudinali e sezioni fluviali verifiche idrauliche stato attuale [scala varie]

A.03 – Profili longitudinali e sezioni fluviali verifiche idrauliche stato di progetto [scala varie]

Elaborati grafici

T.01 – Planimetria modello idraulico stato attuale e stato di progetto [scala 1:1.000]

T.02 – Battenti idrometrici di esondazione e velocità di propagazione delle esondazioni $Tr = 30$ e $Tr = 200$ anni - stato attuale [scala 1:2.000]

T.03 – Aree inondabili, pericolosità idraulica ai sensi del 53/R e ai sensi del P.G.R.A. e magnitudo idraulica ai sensi L.R. 41/18 - stato attuale [scala 1:2.000]

T.04 – Planimetria area di intervento stato attuale [scala 1:250]

T.05 – Planimetria interventi [scala 1:250]

T.06 – Battenti idrometrici di esondazione e velocità di propagazione delle esondazioni $Tr = 30$ e $Tr = 200$ anni - stato di progetto [scala 1:2.000]

T.07 – Aree inondabili, pericolosità idraulica ai sensi del 53/R e ai sensi del P.G.R.A. e magnitudo idraulica ai sensi L.R. 41/18 - stato di progetto [scala 1:2.000]

T.08 – Sezioni trasversali di progetto stato sovrapposto [scala varie]

1 PREMESSA

La società West Systems S.r.l. è stata incaricata di aggiornare lo studio idrologico-idraulico condotto dagli scriventi nel 2006 finalizzato alla valutazione della pericolosità idraulica e alla eventuale definizione degli interventi di messa in sicurezza di un'area posta alla confluenza tra i torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli in località Fognano nel Comune di Montale.

Tale studio è stato richiesto dal Genio Civile di Pistoia ad integrazione della documentazione redatta a supporto del Piano Operativo del comune di Montale.

Ad oggi l'area di interesse è oggetto di una previsione di ristrutturazione urbanistica mediante recupero di un complesso industriale oggi dismesso (Figura 1.1).

La previsione di ristrutturazione urbanistica ATS.5 è riportata nella Figura 1.2 così come riportato negli elaborati redatti a supporto del Piano Operativo comunale.

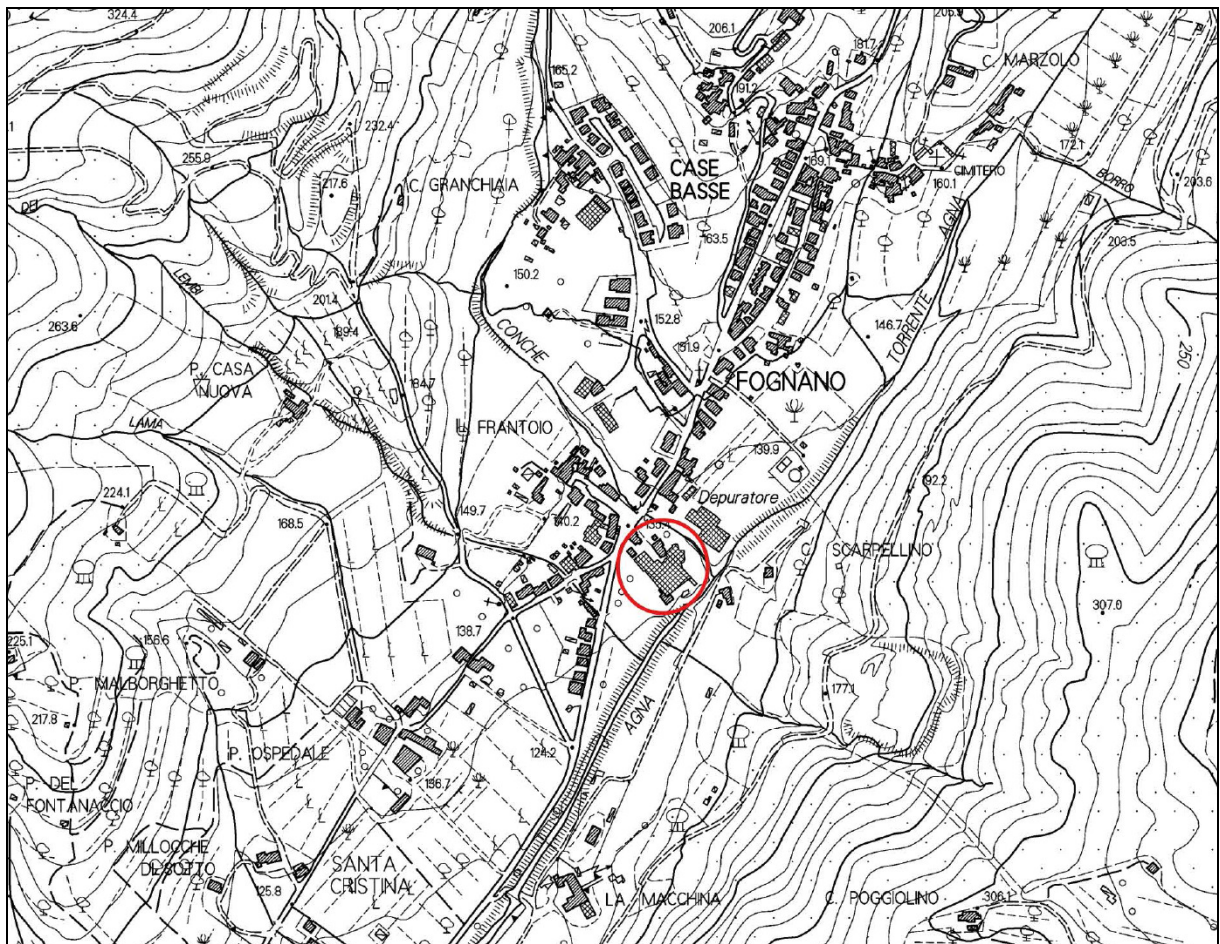


Figura 1.1 – Corografia dell'area di interesse (scala 1:10.000).

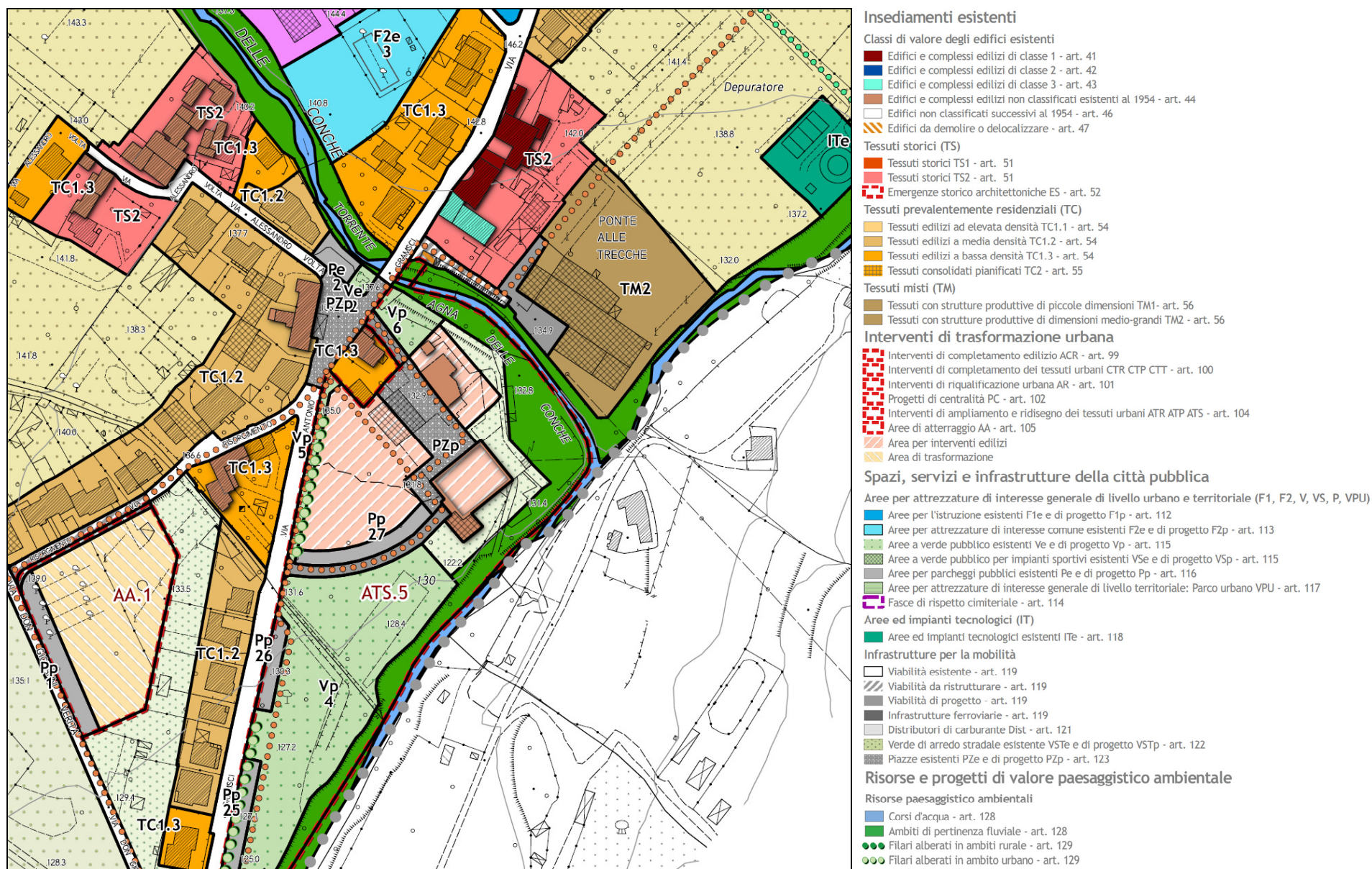


Figura 1.2 – Planimetria del territorio urbanizzato nell'area di interesse (estratto elab. 2.1 P.O. Comune di Montale).

Il presente studio è redatto in ottemperanza a quanto previsto dal D.P.G.R. n. 53/R/2011, dal P.G.R.A. (Piano di Gestione Rischio Alluvioni) dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale e dalla L.R. 41/2018 e costituisce un aggiornamento di quello precedente redatto nel 2006.

In particolare, gli ambiti di natura idrologico e idraulica oggetto di ulteriore approfondimento sono:

- utilizzo delle nuove curve di possibilità pluviometrica sviluppate dall'Università degli Studi di Firenze per conto della Regione Toscana con i dati aggiornati fino al 2012;
- utilizzo dei rilievi messi a punto nell'ambito del progetto Lidar dalla Regione Toscana.

La Regione Toscana a seguito degli eventi alluvionali del 2011 ha commissionato all'Università degli Studi di Firenze uno studio di supporto alla valutazione del rischio idraulico sul territorio regionale.

Nell'ambito della *Macroattività B – Modellazione idrologica – Attività B1 – Regionalizzazione precipitazioni* sono state aggiornate le curve di possibilità pluviometrica con i dati fino al 2012.

Nell'ambito della *Macroattività B – Modellazione idrologica – Attività B2 – Modellazione idrologica caso pilota e Implementazione modello distribuito Mobidic* sono state calcolate le caratteristiche idrologiche dei suoli della Toscana.

La modellistica idrologica adottata (*software* PIENE 4.13) è costituita da un modello a parametri distribuiti, omogeneo alle elaborazioni condotte negli studi precedenti a supporto degli strumenti urbanistici comunali, che utilizza le mappe e le curve di possibilità pluviometrica prodotte dall'Università degli Studi di Firenze.

La modellistica idraulica (*software* HEC-RAS 5.0.6) è costituita da un modello idraulico in moto vario monodimensionale sulle aste fluviali e bidimensionale nelle aree inondabili.

Le aree inondabili, modellate con aree bidimensionali, sono state simulate utilizzando il DTM (*Digital Terrain Model*) con celle di dimensione di 1×1 m disponibile presso il Sistema Informativo della Regione Toscana.

Il modello idraulico messo a punto per i torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli copre una superficie di circa 24.7 ha ed esamina 845 m di reticolo fluviale.

Per i corsi d'acqua indagati sono redatte le mappe di pericolosità idraulica da modellazione ai sensi del D.P.G.R. n.53/R/2011 e del P.G.R.A. attraverso la perimetrazione degli ambiti territoriali interessati da allagamenti per eventi riferibili a $TR \leq 30$ anni e $30 < TR \leq 200$ anni, nonché la mappa della magnitudo idraulica definita ai sensi della L.R. 41/2018 come il risultato della combinazione tra i valori dei battenti idrometrici e delle velocità di propagazione delle alluvioni poco frequenti.

Lo studio ha fornito in formato *shapefile* i seguenti metadati:

- traccia delle sezioni idrografiche utilizzate nei modelli idraulici;
- perimetro delle aree inondate per i vari tempi di ritorno;
- perimetro della pericolosità idraulica ai sensi del D.P.G.R. n.53/R/2011;
- perimetro della pericolosità idraulica ai sensi del P.G.R.A.;
- mappa della magnitudo idraulica ai sensi della L.R. 41/2018.

e in formato *raster* i risultati delle elaborazioni idrauliche:

- mappa dei battenti idrometrici delle esondazioni;
- mappa delle velocità di propagazione delle esondazioni.

1.1 Articolazione dello studio

Nella presente relazione idrologica e idraulica si riportano la metodologia ed i risultati ottenuti, secondo la seguente articolazione:

FASE 1 - definizione del quadro conoscitivo: in tale fase sono acquisiti ed esaminati gli studi, la documentazione e i dati disponibili riguardanti il reticolo idrografico considerato. In particolare sono acquisiti i rilievi topografici più recenti;

FASE 2 – analisi idrologica: per il sistema idrografico considerato sono valutate le portate al colmo e gli idrogrammi di piena per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni. Per i bacini idrografici dei Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli sono considerate le durate critiche corrispondenti a quella di 1.5 ore;

FASE 3 – analisi idraulica: la modellazione degli eventi di piena è eseguita attraverso un modello unidimensionale di moto vario, per la stima dei livelli idrici nelle sezioni fluviali e delle eventuali insufficienze idrauliche, accoppiato ad un modello bidimensionale per la stima dei battenti di esondazione. Le verifiche idrauliche sono condotte per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni e per la durata critica;

FASE 4 – valutazione delle aree inondabili e della pericolosità idraulica: sulla base dei battenti idrici ottenuti dal modello bidimensionale sono individuate le aree inondabili, le aree a diversa pericolosità ai sensi del D.P.G.R. n.53/R/2011 e del P.G.R.A e la magnitudo idraulica.

Di seguito si illustrano i criteri e le attività svolte per le singole fasi sopra descritte.

2 IL QUADRO CONOSCITIVO

2.1 Gli studi esistenti

Nel presente lavoro sono stati consultati i seguenti studi idrologici e idraulici:

- [1] *Studio idrologico e idraulico per la valutazione della pericolosità idraulica e definizione degli interventi di messa in sicurezza in un'area posta alla confluenza tra i torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli in frazione di Fognano*, redatto dalla Physis S.r.l., maggio 2006;
- [2] *Piano Operativo Comunale*, Comune di Montale, adottato con Delibera n.49 del 28/06/2018.

Il presente studio idrologico ha fatto riferimento, inoltre, ai seguenti studi:

- [3] *Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme. Macroattività B - Modellazione idrologica. Attività B1 - Regionalizzazione precipitazioni*, studio redatto nell'ambito dell'accordo di collaborazione scientifica tra Regione Toscana e Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze per lo sviluppo di attività di ricerca sulla mitigazione del rischio idraulico nella Regione Toscana, finalizzata all'approfondimento dell'attuale quadro conoscitivo e alla definizione delle azioni di riduzione del rischio idraulico e idrogeologico (Caporali E., Chiarello V. e Rossi G., marzo 2014);¹
- [4] *Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC. Addendum: Parametrizzazione HMS. Macroattività B - Modellazione idrologica. Attività B2 – Modellazione idrologica caso pilota*, redatto nell'ambito dell'accordo di collaborazione scientifica tra Regione Toscana e Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze per lo sviluppo di attività di ricerca sulla mitigazione del rischio idraulico nella Regione Toscana, finalizzata all'approfondimento dell'attuale quadro conoscitivo e alla definizione delle azioni di riduzione del rischio idraulico e idrogeologico (Castelli F., novembre 2014)².

2.2 I dati territoriali

Per la redazione dello studio sono stati acquisiti i seguenti dati:

- [1] cartografia C.T.R. 1:10.000 in formato vettoriale [263010_1998; X_263050_1998]
- [2] cartografia C.T.R. 1:2.000 in formato vettoriale [21J49_1998; 21J50_1998; 21J57_1998; 21J58_200];
- [3] ortofoto OFC2K fornite dalla Regione Toscana [21J49_2011; 21J50_2011; 21J57_2011; 21J58_2011];
- [4] rilievi Lidar (dtm) con passo 1×1 m fornito dalla Regione Toscana [21j49_1x1_dtm_004_2010; 21j50_1x1_dtm_004_2010; 21j57_1x1_dtm_004_2010; 21j58_1x1_dtm_004_2010];
- [5] mappe dei parametri K_{SAT} (150 cm) e W_{GRAV} realizzate nell'ambito dello studio *Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC. Addendum: Parametrizzazione HMS. Macroattività B – Modellazione idrologica. Attività B2 – Modellazione idrologica caso pilota*.

¹ I risultati dell'Analisi di Frequenza Regionale sono archiviati nello spazio ServiziOnline della Regione Toscana: http://www.regione.toscana.it/cittadini/ambiente/difesa-del-suolo/-/asset_publisher/eonjZadAbVH6/content/nuovi-dati-sulla-regionalizzazione-delle-precipitazioni

² I parametri e i risultati derivanti dall'implementazione del modello idrologico distribuito per il territorio toscano sono archiviati nello spazio ServiziOnline della Regione Toscana: <http://www.regione.toscana.it/-/implementazione-di-modello-idrologico-distribuito-per-il-territorio-toscano>

2.3 I rilievi topografici

Le sezioni fluviali sono state ricavate dalle seguenti fonti:

[1] rilievi eseguiti nello studio [1].

Nel corso del presente studio è stata eseguita una campagna topografica per integrare il quadro conoscitivo esistente.

In particolare, sono stati materializzati alcuni punti all'interno dell'area oggetto di previsione ed è stata verificata la posizione altimetrica del rilievo topografico del 2006 attraverso la misura del centrino IGM posto presso La Rocca di Montemurlo utilizzato come punto di appoggio.

3 ANALISI IDROLOGICA

Obiettivo dell'analisi idrologica è fornire gli idrogrammi di piena per i bacini oggetto del presente studio.

Le condizioni di portata sono determinate con riferimento ai tempi di ritorno di 30 e 200 anni e per le durate critiche dei torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli.

Le immissioni nel sistema idraulico sono riportate nella Figura 3.1.

L'analisi idrologica è condotta mediante l'applicazione di un modello idrologico a parametri distribuiti, denominato PIENE, che prevede la schematizzazione a celle del bacino, per ciascuna delle quali viene definito un set di parametri che ne caratterizzano la risposta idrologica.

Il suddetto modello a parametri distribuiti è in grado di simulare sia il fenomeno della formazione dell'onda di piena che quello del suo trasferimento a scala di bacino.

3.1 Le curve di possibilità pluviometrica

Le curve di possibilità pluviometrica sono quelle dello studio di approfondimento condotto dalla Università di Firenze che utilizza i dati pluviometrici al 2012.

La curva di possibilità pluviometrica può essere espressa nella forma generica:

$$h = a \times t^n$$

dove:

- h altezza di pioggia in [mm/h];
- a coefficiente dipendente dal tempo di ritorno [mm/hn];
- n esponente della curva di possibilità pluviometrica.

Lo studio fornisce i valori di a e n su una maglia di 1×1 km su tutto il territorio regionale per vari tempi di ritorno.

Approssimando la curva di crescita, che dipende dal modello probabilistico utilizzato per la stima delle altezze di pioggia per le varie durate e per i vari tempi di ritorno, con un legge di potenza la curva di possibilità pluviometrica può essere espressa nella forma:

$$h = a' \times t^n \times T^m$$

dove:

- a' coefficiente [mm/hn ym];
- T tempo di ritorno in anni [y].

Di seguito si riportano i valori dei coefficienti a , n e m (Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4).

Tali coefficienti sono utilizzati sia per durate superiori che inferiori all'ora.

3.2 Caratteristiche del modello afflussi-deflussi

Il modello idrologico utilizzato può essere classificato come distribuito in quanto i parametri sono definiti per ognuna delle singole celle. Dal punto di vista concettuale il modello valuta dapprima la formazione del deflusso superficiale mediante la simulazione del fenomeno dell'intercettazione e, successivamente, il trasferimento di tale deflusso sino alla sezione di chiusura.

Il modello che simula il fenomeno dell'intercettazione calcola il deflusso superficiale di ciascuna cella, considerando sia la capacità di ritenuta del suolo che la velocità di infiltrazione a saturazione (percolazione). Il modello mette in conto anche la componente di deflusso ipodermico che raggiunge il reticolo con tempi maggiori rispetto al deflusso superficiale.

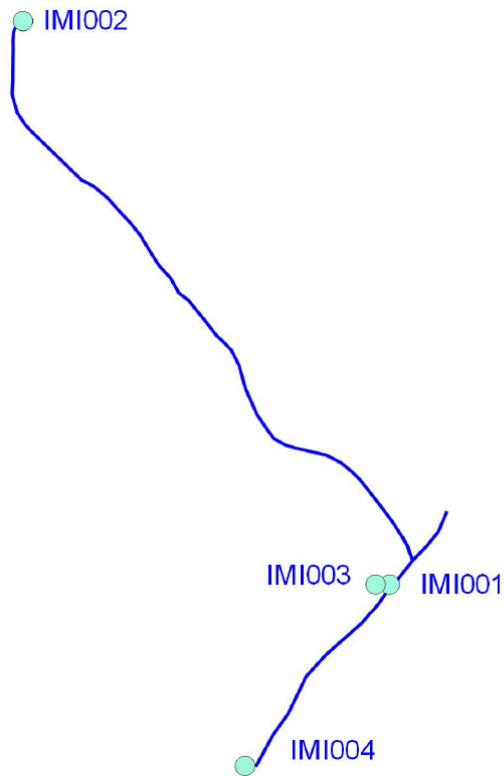


Figura 3.1 – Immissioni area torrenti Vincio e Vinciarello.

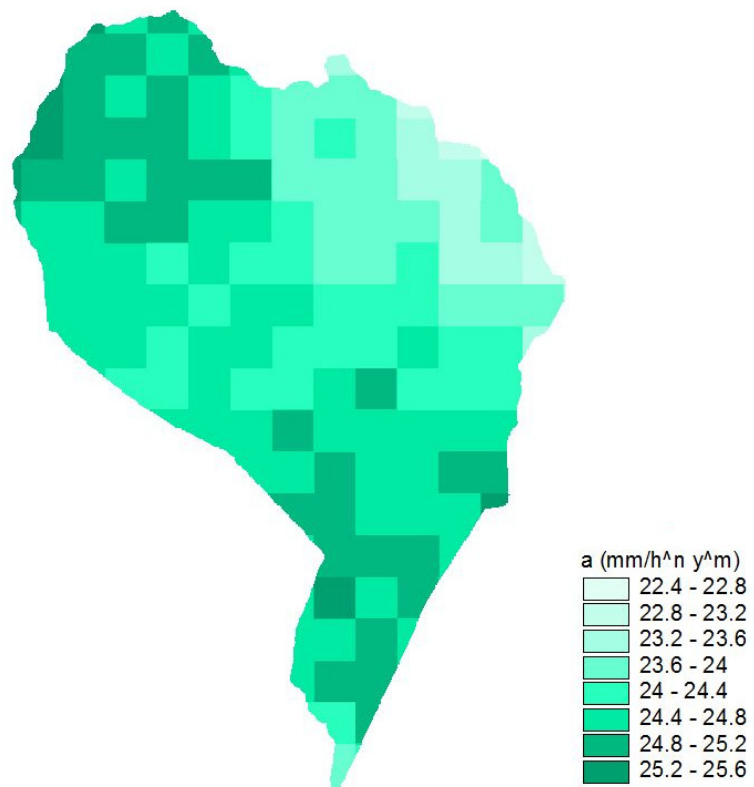


Figura 3.2 – Mappa coefficiente a.

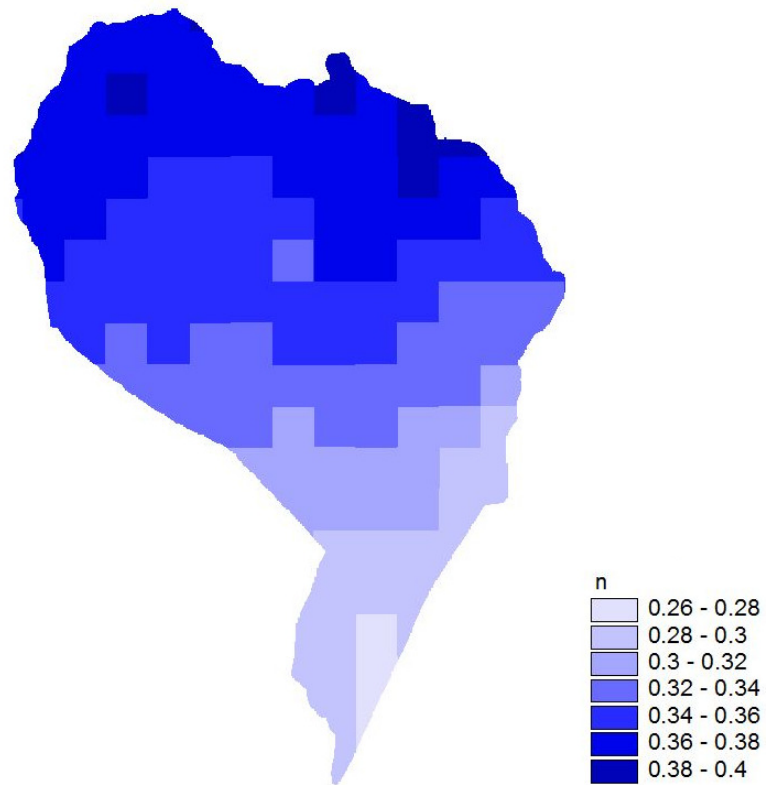


Figura 3.3 – Mappa coefficiente n .

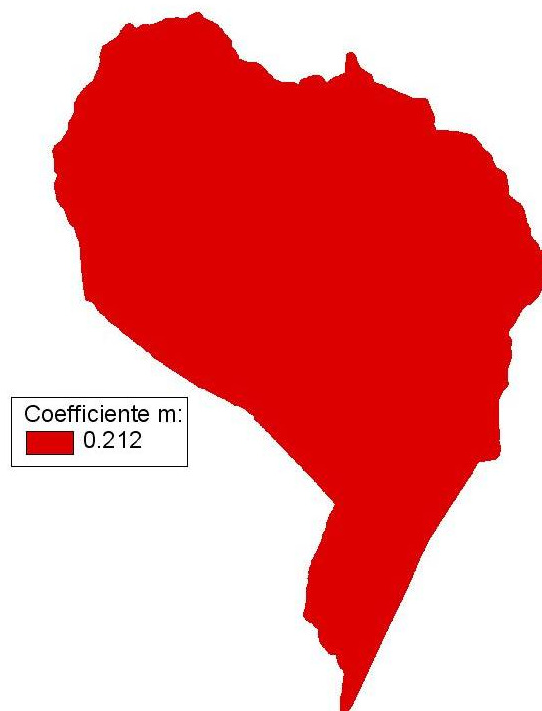


Figura 3.4 – Mappa coefficiente m .

La capacità di ritenuta e la velocità di filtrazione a saturazione sono state ricavate dal DB idrologico realizzato nell'ambito dello studio condotti dalla Regione Toscana *Macroattività B – Modellazione idrologica – Attività B2 – Modellazione idrologica caso pilota e Implementazione modello distribuito Mobidic*.

La simulazione delle modalità di trasferimento del deflusso superficiale si basa sulla schematizzazione del fenomeno mediante una componente di tipo cinematico e una di tipo "serbatoio lineare" (modello tipo Clark).

Il modello necessita, quindi, di una serie di mappe relative alle grandezze idrologiche e geografiche.

Le mappe che forniscono la parametrizzazione dei processi di formazione e trasferimento dei deflussi sul bacino in esame sono:

1. *mappa dei puntatori*;
2. *mappa degli ordini di calcolo*;
3. *mappa dei bacini*;
4. *mappa delle velocità*;
5. *mappa dei tempi di trasferimento*;
6. *mappa della capacità di ritenuta (GRAV – contenuto di acqua gravimetrica)*;
7. *mappa della velocità di filtrazione a saturazione (percolazione) (KSAT-150 conducibilità satura intero suolo)*.

3.2.1 Le fasi computazionali

Il calcolo viene condotto per ciascuna cella e per tutti i passi temporali secondo le seguenti fasi:

- *intercettazione*: in questa fase si effettua una stima della quantità di acqua che viene comunque sottratta al deflusso superficiale;
- *suolo*: in questa fase si ricostruisce il bilancio idrologico del suolo, valutando la quantità d'acqua che va ad alimentare il volume profondo ed eventualmente la componente del deflusso ipodermico;
- *canale*: in questa fase si simula il trasferimento del deflusso superficiale e di quello ipodermico dalla singola cella alla sezione di chiusura.

Con riferimento alle variabili elencate nella Tabella 3-1 si riportano i principali calcoli effettuati dal programma per ciascuna cella costituente il bacino.

- 1) L'afflusso sulla singola cella, Pi_k [mm/h] è determinato con il metodo dei topoieti;
- 2) Il suolo è assimilato a un serbatoio lineare che si riempie in ragione della precipitazione (di intensità costante sul passo di bilancio) e si svuota in ragione della percolazione, Ks [mm/h], e del deflusso ipodermico regolato dal parametro K [1/h].
- 3) L'equazione di continuità, da cui si ricava il contenuto di acqua nel suolo da un passo a quello successivo, è esprimibile in forma differenziale nel seguente modo:

$$\Delta\theta = \theta_{k+1} - \theta_k = \left(P_i - K_s - K \cdot \frac{\theta_{k+1} + \theta_k}{2} \right) dt$$

$$\Rightarrow \frac{\theta_{k+1}}{dt} + \frac{K}{2} \cdot \theta_{k+1} = \frac{\theta_k}{dt} - \frac{K}{2} \cdot \theta_k + P_i - K_s$$

$$\theta_{k+1} = \left(\frac{\left(\frac{1}{dt} - \frac{K}{2} \right) \theta_k + P_i - K_s}{\frac{1}{dt} + \frac{K}{2}} \right)$$

Simbolo	Significato	U.M.
P_{i_k}	valore dell'afflusso (precipitazione) per la singola cella al passo k-esimo	[mm/h]
Δt	passo temporale	[h]
Dx	passo spaziale	[m]
SC	valore della capacità di ritenuta del suolo (<i>storage capacity</i>)	[mm]
KL	valore della velocità di infiltrazione a saturazione	[mm/h]
RI	coefficiente moltiplicativo della capacità di ritenuta del suolo	[/]
IN	<i>coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione</i>	[/]
IP	coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica	[/]
T	valore dei tempi di trasferimento	[h]
$T_{c=CI T}$	valore dei tempi di trasferimento o di risposta secondo lo schema cinematico	[h]
$T_{i=(1-CI) T/MT}$	valore dei tempi di trasferimento secondo lo schema di trasferimento di invaso	[h]
MT	coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento	[/]
CI	coefficiente ripartizione cinematico-invaso	[/]
$\theta_{max}=RI SC$	valore distribuito della capacità di ritenuta massima del suolo (volume utile del suolo)	[mm]
$K_s=IN KL$	valore distribuito della velocità di infiltrazione a saturazione (o permeabilità)	[mm/h]
$\tau_c=T_c/MT$	valore distribuito dei tempi di trasferimento secondo il metodo cinematico	[h]
$\tau_i=T_i/MT$	valore distribuito dei tempi di trasferimento secondo il metodo dell'invaso	[h]
$C_{s=1/\tau_i}$	valore distribuito della costante di esaurimento del serbatoio lineare	[1/h]
α_o	frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale)	[/]
θ_o	contenuto di acqua nel suolo nello stato iniziale	[mm]
$K=IP(KL/SC)$	coefficiente di deflusso ipodermico	[1/h]
θ_k	contenuto di acqua nel suolo al passo k-esimo	[mm]
I_{eff}	Infiltrazione effettiva	[mm/h]
Q_{1k}	contributo verso il reticolo al passo k-esimo	[mm/h]
ϕ_k	volume d'acqua invasata nel reticolo	[mm]
Q_k	contributo alla foce passo k-esimo	[mm/h]

Tabella 3-1- Elenco delle variabili utilizzate dal modello afflussi-deflussi

- 4) Il contenuto di acqua nel suolo all'inizio θ_o [mm] è uguale a $\alpha_o \theta_{max}$ dove α_o è il grado di saturazione iniziale. Il valore del contenuto di acqua nel suolo è limitato tra 0 e θ_{max} , pertanto si possono distinguere tre casi:

- *essiccamento del suolo*:

se $\theta_k/dt + P_{i_k} > K_s$ allora

$$\theta_{k+1} = 0$$

$$Q_{1k} = \theta_k/dt + P_{i_k} - K_s$$

$$I_{eff} = K_s$$

altrimenti

$$\theta_{k+1} = 0$$

$$Q_{1k} = 0$$

$$I_{eff} = \theta_k/dt + P_{i_k}$$

- *saturazione del suolo*:

$$\begin{aligned}\theta_{k+1} &= \theta_{\max} \\ Q_{1k} &= (\theta_k - \theta_{\max})/dt + Pi_k - K_s \\ I_{\text{eff}} &= K_s\end{aligned}$$

- caso *intermedio*:

$$\begin{aligned}0 < \theta_{k+1} &< \theta_{\max} \\ Q_{1k} &= (\theta_k - \theta_{k+1})/dt + Pi_k - K_s \\ I_{\text{eff}} &= K_s\end{aligned}$$

Il modello di trasferimento nel reticolo è costituito da una componente di invaso e da una componente cinematica poste in serie. La componente di invaso è caratterizzata dalla seguente espressione:

$$\varphi_{k+1} = \left(\frac{\left(\frac{1}{dt} - \frac{C_s}{2} \right) \varphi_k + Q_{1k}}{\frac{1}{dt} + \frac{C_s}{2}} \right)$$

dove C_s , [1/h] è il parametro del serbatoio calcolato come $1/\tau_i$ e φ_k il volume d'acqua nel reticolo (assunto inizialmente nullo). Il contributo verso la componente cinematica risulta

$$Q_k = C_s \frac{\varphi_{k+1} + \varphi_k}{2}$$

5) La componente cinematica trasla nel tempo il contributo Q_k di un fattore pari a τ_c .

Il contributo complessivo alla sezione di chiusura avviene attraverso la convoluzione dei contributi delle singole celle.

Sulla base di quanto esposto, il modello necessita della definizione dei seguenti parametri validi su tutto il bacino:

- α_o frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale) [/];
- Rl coefficiente moltiplicativo del raster della capacità di ritenuta del suolo [/];
- IN coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione [/];
- IP coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica [/];
- MT coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento [/];
- Cl coefficiente ripartizione cinematico-invaso [/].

3.2.2 Le caratteristiche geografiche

Le basi di dati cartografici, in formato digitale (*grid*), sono costituite da:

- modello digitale del terreno con maglia 10×10 m adeguata a consentire l'individuazione delle linee di impluvio ed una corretta individuazione dei bacini imbriferi (Figura 3-5);
- mappa della capacità di ritenuta ritenuta (Figura 3-6);
- mappa della velocità di filtrazione a saturazione (Figura 3-7).

La mappa dei "puntatori idrologici e dei tempi di trasferimento" sono stati elaborati a partire dal DTM 10×10 m. La mappa dei puntatori indica la direzione del deflusso superficiale e viene ricavato assumendo che ogni cella versi nella cella vicina a quota minore.

I tempi di trasferimento sono stati valutati nella ipotesi che la velocità di trasferimento nella singola sezione sia proporzionale all'area del bacino a monte elevata all'esponente 0.15 e alla pendenza locale elevata alla 0.2.

Il legame funzionale è quindi del tipo $v = 1.85 A^{0.15} J^{0.2}$, dove v è la velocità di trasferimento [m/s], A l'area del bacino [km²] e J la pendenza locale.

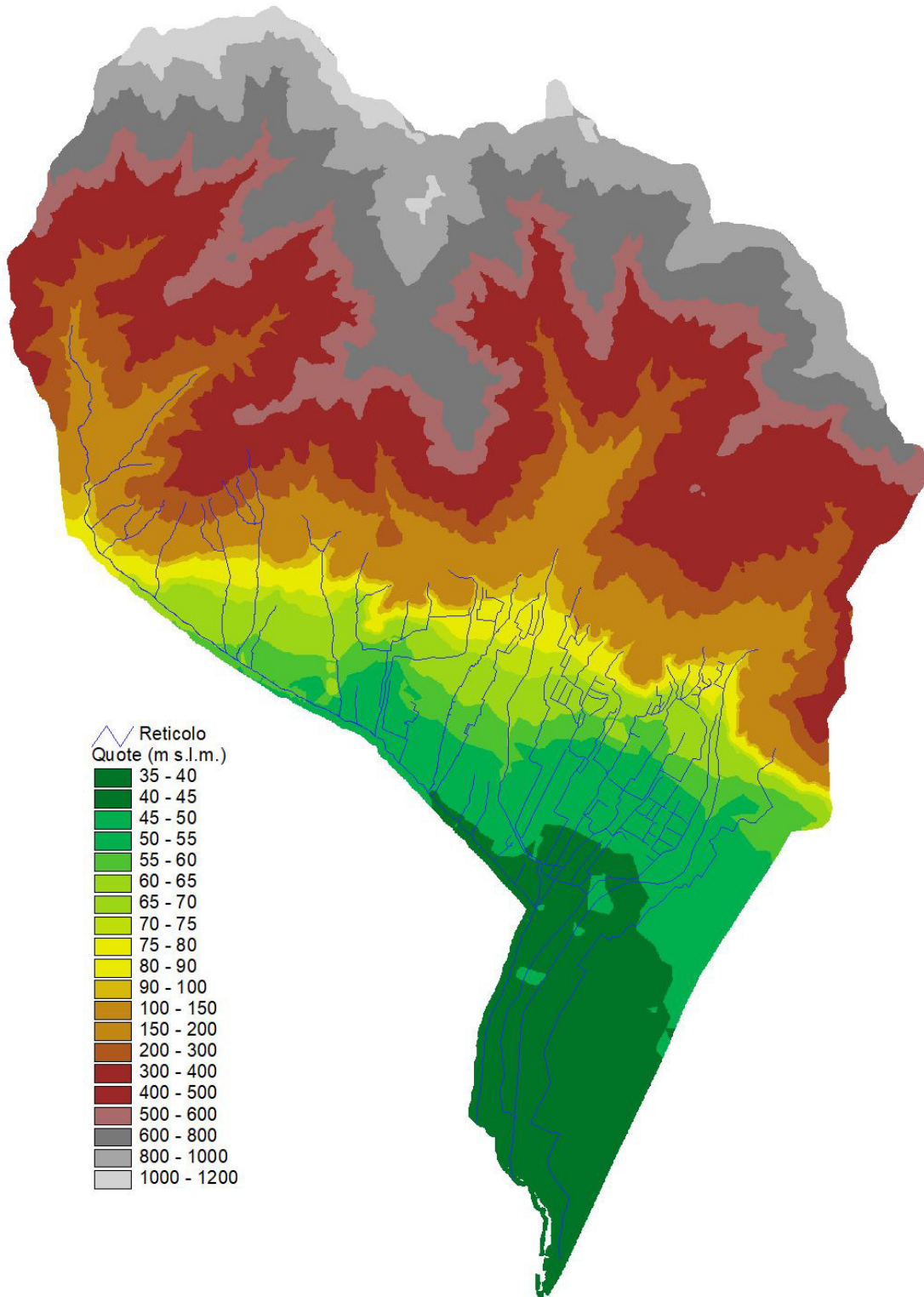


Figura 3-5 – Modello digitale del terreno.

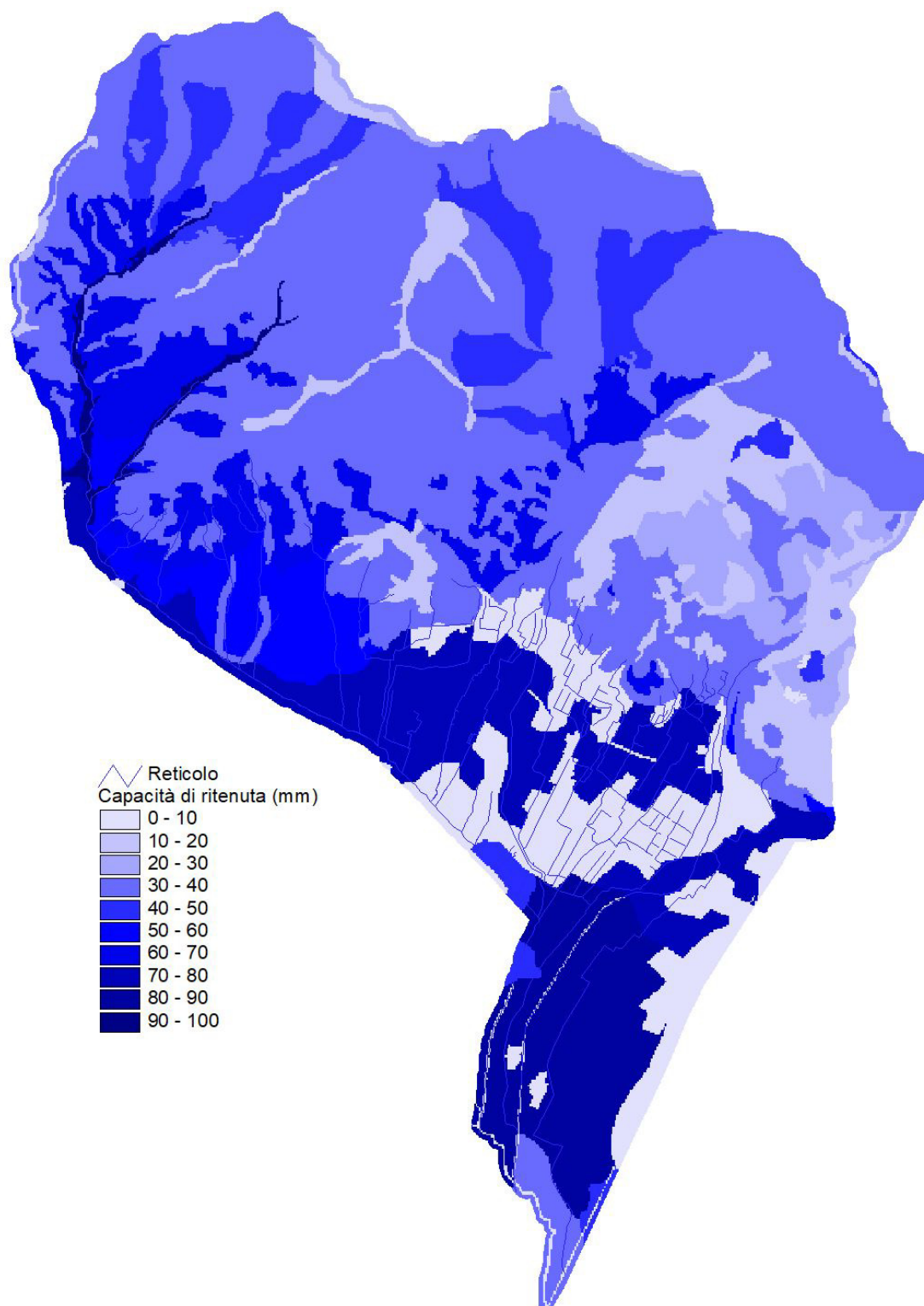


Figura 3-6 – Capacità di ritenuta.

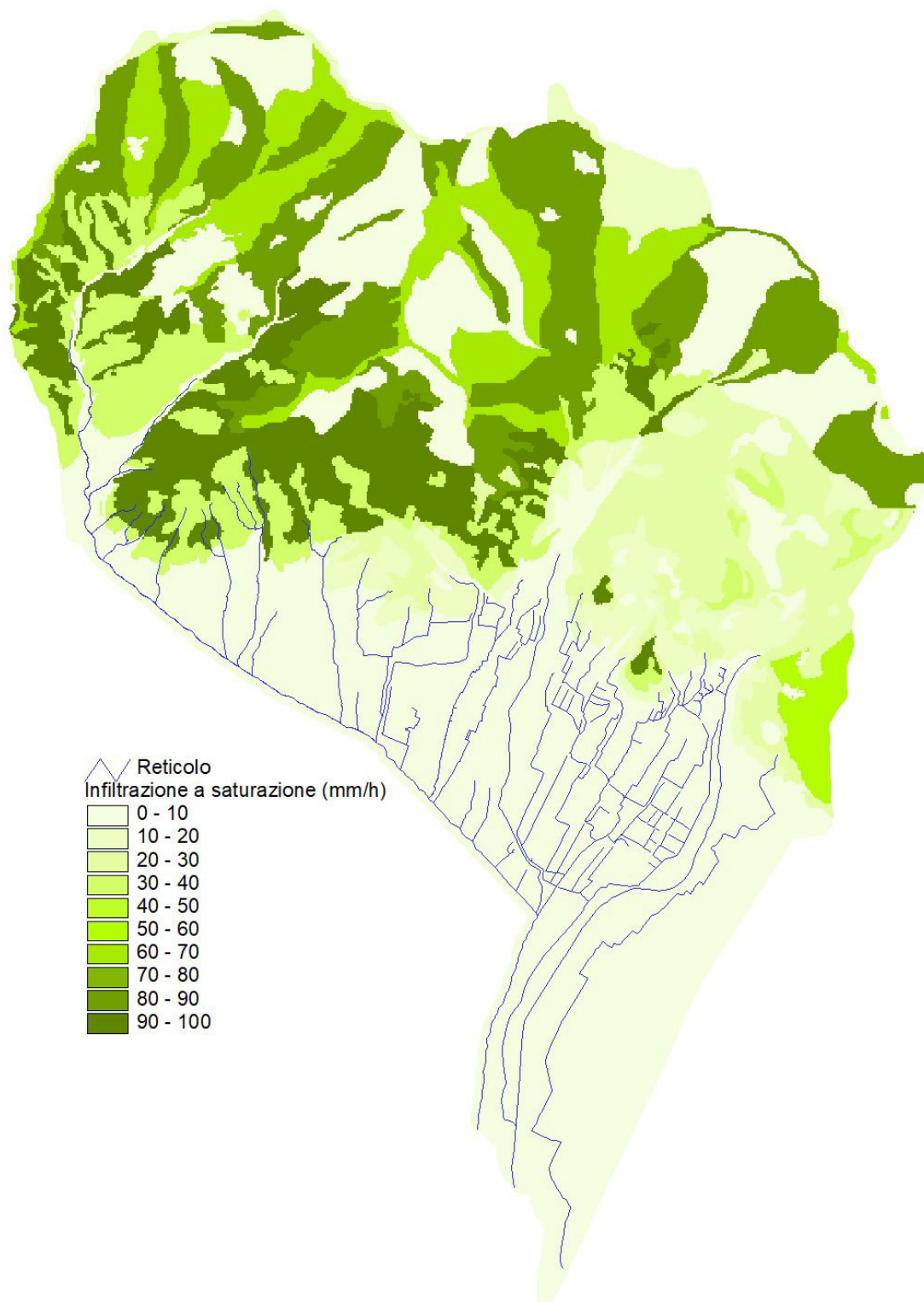


Figura 3-7 – Velocità filtrazione.

3.3 Implementazione del modello idrologico

Il modello idrologico prima descritto è stato implementato per ricavare gli idrogrammi di piena per i diversi tempi di ritorno e per le diverse durate sia dei bacini complessivi che degli interbacini.

La variabilità spazio-temporale della precipitazione è messa in conto attraverso un coefficiente di riduzione, K_r , del tipo:

$$K_r = \frac{h_A(A, t)}{h(t)}$$

dove $h_A(A, t)$ è l'altezza di pioggia di durata t ragguagliata all'area A e $h(t)$ è l'altezza di pioggia di durata t nel centro di scroscio.

Il valore di K_r dipende da tre fattori:

- l'estensione dell'area investita dalla precipitazione;
- la durata considerata;
- l'altezza di pioggia.

Per la quantificazione di K_r si è fatto riferimento alla formula dell'USWB opportunamente modificata per tenere in conto delle caratteristiche peculiari della Regione Toscana:

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

dove α , β e γ sono i parametri della formula, t [h] la durata della precipitazione e A [km²] l'area del bacino.

Per la regione Toscana nell'ambito dello studio di regionalizzazione sono stati definiti i seguenti valori per i parametri:

- $\alpha = F_a \times a = 0.036 \times a$, dove a è il parametro della curva di possibilità;
- $\beta = F_b = 0.25$;
- $\gamma = F_c = 0.01$.

Per il calcolo delle portate degli interbacini è stata utilizzata l'opzione globale che consente di mantenere congruente il volume complessivo della precipitazione procedendo da monte verso valle su un dato corso d'acqua.

Per il calcolo di K_r dell'interbacino K_a si procede pertanto al calcolo separatamente per la sezione di monte K_m e per la sezione di valle K_v procedendo pertanto al calcolo con la seguente formula:

$$K_a = \frac{K_v A_v - K_m A_m}{(A_v - A_m)}$$

dove:

- K_v = coefficiente di ragguaglio areale per il bacino di valle;
- A_v = area del bacino di valle;
- K_m = coefficiente di ragguaglio areale per il bacino di monte;
- A_m = area del bacino di monte.

I parametri del modello idrologico sono riportati nella Tabella 3-2.

Nell'Appendice B si riportano i valori delle portate al colmo per i bacini complessivi calcolati in corrispondenza delle immissioni riportate nella Figura 3.1.

Acque Alte		
α_0	frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale) [/]	0.20
Rl	coefficiente moltiplicativo della capacità di ritenuta del suolo [/]	1.00
IN	coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione [/]	0.03
IP	coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica [/]	0.20
MT	coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento [/]	1.85
CI	coefficiente ripartizione cinematico-invaso [/]	0.35

Tabella 3-2 – Tabella parametri.

3.4 Taratura del modello idrologico

Il modello idrologico è stato tarato su 2 eventi significativi registrati nella stazione idrometrica del Calice a Variante Pratese (codice TOS03004847-751559-4847) i cui periodi di osservazione sono riportati nella Tabella 3-3. La stazione sottende un bacino di circa 91.7 km².

Inoltre, sono state utilizzate le precipitazioni delle stazioni riportate nella Tabella 3-4.

I dati pluvio-idrometrici sono stati forniti dal Servizio Idrografico Regionale. Le precipitazioni sono state ragguagliate al bacino con il metodo dei topoi.

Num.	Inizio	Fine
1	06/03/2017 12:00:00	08/03/2017 12:00:00
2	08/12/2017 00:15:00	18/12/2017 00:00:00

Tabella 3-3 – Eventi del Calice alla Variante Pratese.

Codice stazione	Descrizione
TOS11000094	Acquerino
TOS01001263	Baggio
TOS01001151	Cantagallo
TOS01001273	Fattoria di lavello
TOS01001269	La Ferruccia
TOS10001210	Prato Galceti
TOS11000093	Santomato

Tabella 3-4 – Stazioni pluviometriche.

Le portate in transito nella stazione idrometrica sono state calcolate con la scala di deflusso ricostruita come descritto nei paragrafi precedenti.

Nella Figura 3-5 si riporta la sezione ove è posto l'idrometro.

I risultati della verifica sono riportati nella Figura 3-9 e Figura 3-10.



Figura 3-8 – Sezione in corrispondenza dell'idrometro del Calice alla Variante Pratese.

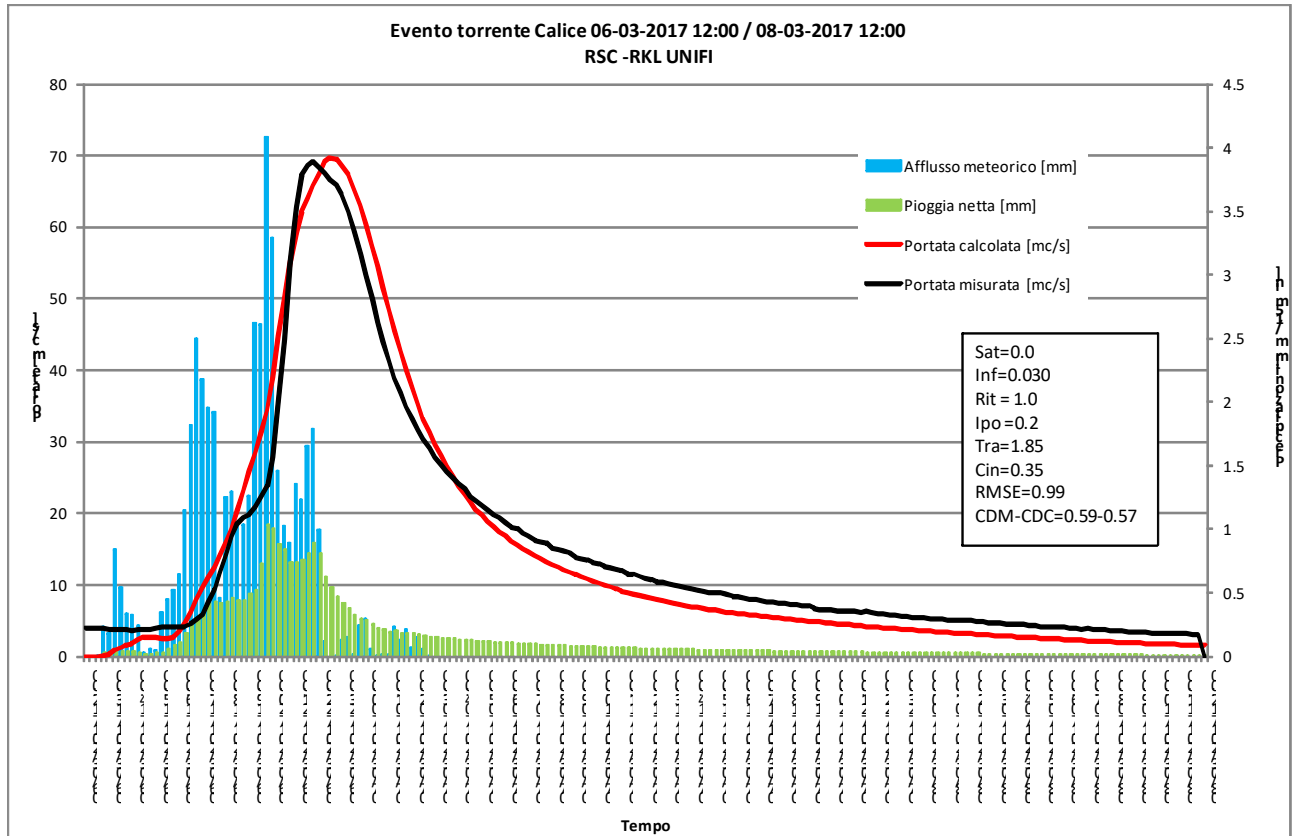


Figura 3-9 – Evento 06-03-2017.

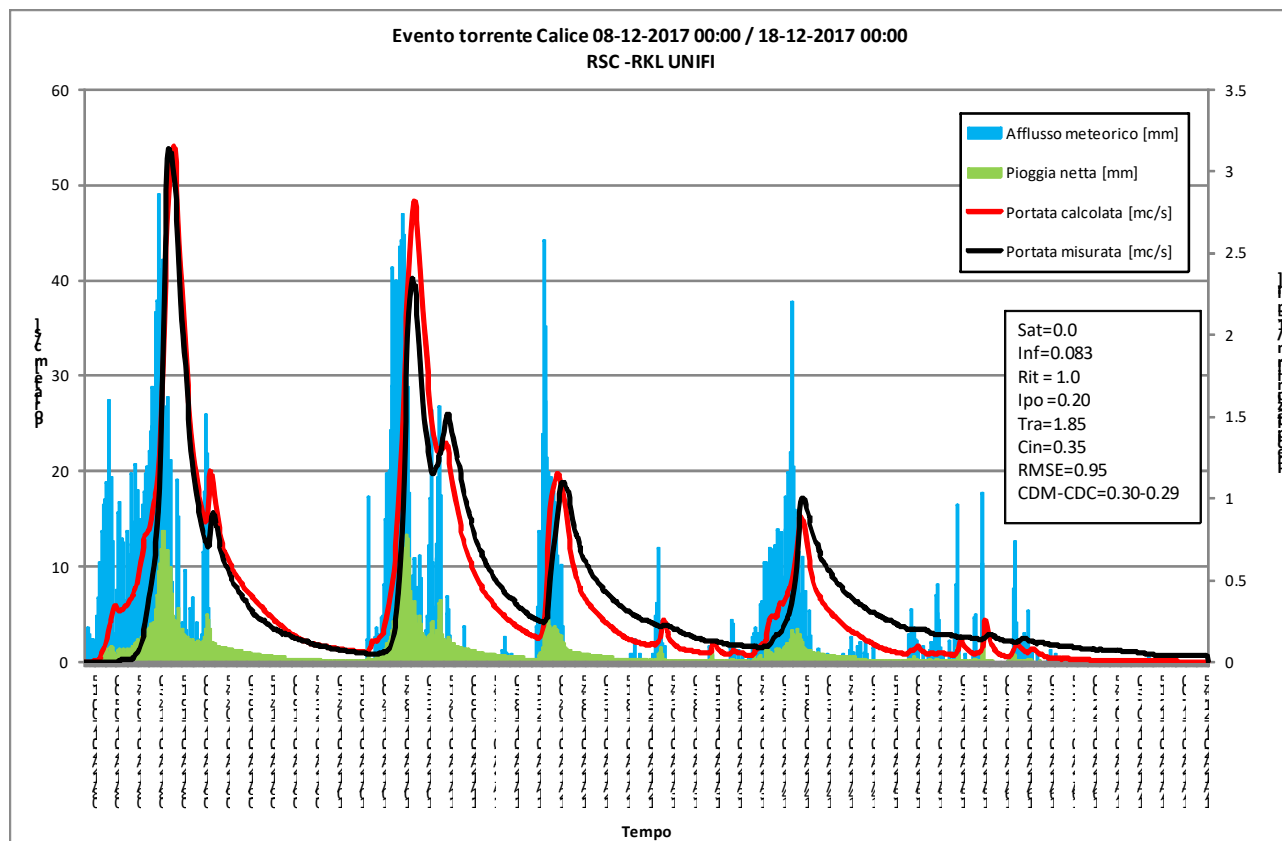


Figura 3-10 – Evento 08-12-2017.

I parametri di taratura di PIENE per il Calice alla Variante Pratese sono riportati nella Tabella 3-5

Si osserva una buona corrispondenza del valore del picco di piena per l'evento del 2012 e del 2016. Per l'evento del 2013 si ha una sottostima mentre in quello del 2016 una sovrastima imputabili probabilmente allo scarso numero di stazioni pluviometriche presenti nel bacino.

Inizio evento	Fine evento	Saturazione	Filtrazione	Ritenuta	Ipodermico	Trasferimento	Cinematico / invaso
06/03/2017 12:00	08/03/2017 12:00	0.00	0.030	1.000	0.200	1.850	0.350
08/12/2017 00:10	18/12/2017 00:00	0.00	0.083	1.000	0.200	1.850	0.350
Media		0.00	0.057	1.000	0.200	1.850	0.350

Tabella 3-5 – Parametri taratura del Calice alla Variante Pratese.

3.5 Confronto con studi precedenti

Nella Tabella 3-6 si riporta il confronto tra i valori dei colmi di portata liquida stimati nel presente studio e quelli calcolati con il modello ALTO nello studio [1] del 2006.

Si osserva che per il tempo di ritorno di 30 anni le portate risultano confrontabili, mentre per il tempo di ritorno di 200 anni le portate al colmo aumentano apprezzabilmente.

Nome corso d'acqua	Q_{30}	Q_{30}	Q_{200}	Q_{200}
	Studio [1] [m ³ /s]	Piene 2018 [m ³ /s]	Studio [1] [m ³ /s]	Piene 2018 [m ³ /s]
Torrente Agna delle Conche	56.2	57.2	90.8	118.5
Torrente Agna di Acquiputtoli	63.8	60.9	101.9	128.8
Torrente Agna	119.9	107.7	191.0	235.0

Tabella 3-6 – Confronto dei colmi di portata con studi precedenti.

4 ANALISI IDRAULICA

Le verifiche idrauliche sono condotte con un modello idraulico di moto vario con modellazione bidimensionale delle aree di esondazione.

Il modello di moto vario monodimensionale consente la simulazione del fenomeno di propagazione dell'onda di piena lungo i corsi d'acqua, mentre il modello bidimensionale permette la simulazione dei fenomeni propagazione delle esondazione nelle aree circostanti.

4.1 Definizione dei corsi d'acqua oggetto di studio

Il modello numerico è implementato su di un sistema composto dai corsi d'acqua riportati nella Tabella 4-1, in cui sono indicati per ciascun del corso d'acqua il nome, il numero di sezioni e la lunghezza complessiva.

Nome corso d'acqua	Sezioni [#]	Lunghezza [m]
Torrente Agna delle Conche	42	574.4
Torrente Agna di Acquiputtoli	6	71.8
Torrente Agna	14	199.2

Tabella 4-1 – Elenco dei corsi d'acqua area torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli.

4.2 Gli elementi del modello idraulico

Il sistema idraulico dei torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli è descritto da:

- n. 3 tronchi fluviali;
- n. 1 confluenza;
- n. 58 sezioni fluviali (sono escluse dal conteggio le sezioni interpolate o duplicate);
- n. 2 ponti;
- n. 6 briglie;
- n. 3 aree bidimensionali;
- n. 22 connessioni idrauliche rappresentative dei collegamenti tra i corsi d'acqua e le aree di potenziale esondazione;
- n. 4 immissioni di portata liquida in altrettante sezioni di corsi d'acqua;
- n. 3 condizioni al contorno di valle nelle aree di potenziale esondazione espresse in termini di *normal depth* (pendenza 0.01).

La planimetria delle sezioni fluviali utilizzate, nonché del modello digitale del terreno, è riportata nell'elaborato T.01 sia per la configurazione dello stato attuale che per quella di progetto.

4.3 Aree bidimensionali

Il modello digitale del terreno, utilizzato come base per la modellazione bidimensionale e per la costruzione delle leggi di invaso delle aree a celle di accumulo, è ottenuto a partire dal modello digitale con passo 1×1 m (messo a punto nell'ambito del progetto Lidar) fornito dalla Regione Toscana.

Le maglie di calcolo per la modellazione bidimensionale sono costituite da maglie non strutturate realizzate tramite il *software* Hec-Ras 5.0.6.

Le dimensioni degli elementi della maglia sono state definite in funzione del grado di dettaglio che si desidera ottenere dalle simulazioni compatibilmente con i tempi di calcolo e in funzione della complessità della morfologia del territorio.

In particolare, è stato definito, come valore limite delle superfici che gli elementi della maglia possono avere per il dominio di calcolo, un'area di 25 m².

Particolari singolarità o discontinuità morfologiche sono state introdotte nelle aree bidimensionali tramite la creazione di opportune *break-lines*.

Il dominio di calcolo bidimensionale dei torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli è schematizzato con n. 3 aree bidimensionali per un totale di 10'314 celle disposte su un'area di 24.7 ha (Tabella 4-2).

Per ciascuna maglia di calcolo il *software* Hec-Ras 5.0.6 calcola la legge di invaso e le scale di deflusso su ciascuna faccia di bordo della cella a partire dal modello digitale del terreno.

Nella Figura 4-1 è raffigurato un particolare delle maglie di calcolo adottate per la schematizzazione del modello bidimensionale in corrispondenza dell'area di interesse.

Il coefficiente di scabrezza di *Manning* per le aree a deflusso bidimensionale è attribuito in funzione della copertura del suolo ricostruita a partire dalla cartografia tecnica regionale 2k (Figura 4-2).

Le classi con cui è suddiviso il territorio con il relativo valore di scabrezza sono riportate nella Tabella 4-3.

Area bidimensionale	Celle [#]	Area [ha]
Fognano	3'749	8.78
Scarpellino	2'013	5.06
Frantoio	4'552	10.89

Tabella 4-2 – Maglie di calcolo bidimensionale dei corsi area d'acqua torrenti Greve e Vingone.

Classe	Manning [s/m ^{1/3}]
Strade	0.030
Edificato	0.500
Altro	0.050

Tabella 4-3 – Scabrezze aree bidimensionali.

4.4 Parametri del modello idraulico

4.4.1 Condizioni al contorno di monte e contributi idrologici

La condizione al contorno di monte, in termini di idrogrammi di portate, è assegnata nella prima sezione di monte di ciascun corso d'acqua.

Gli idrogrammi di piena sono ricavati dai risultati dell'analisi idrologica per ogni tempo di ritorno e per ogni durata dell'evento di pioggia (vedere § 3).

Le immissioni idrologiche dei sottobacini sono state applicate senza tenere conto delle possibili esondazioni a monte delle immissioni stesse.

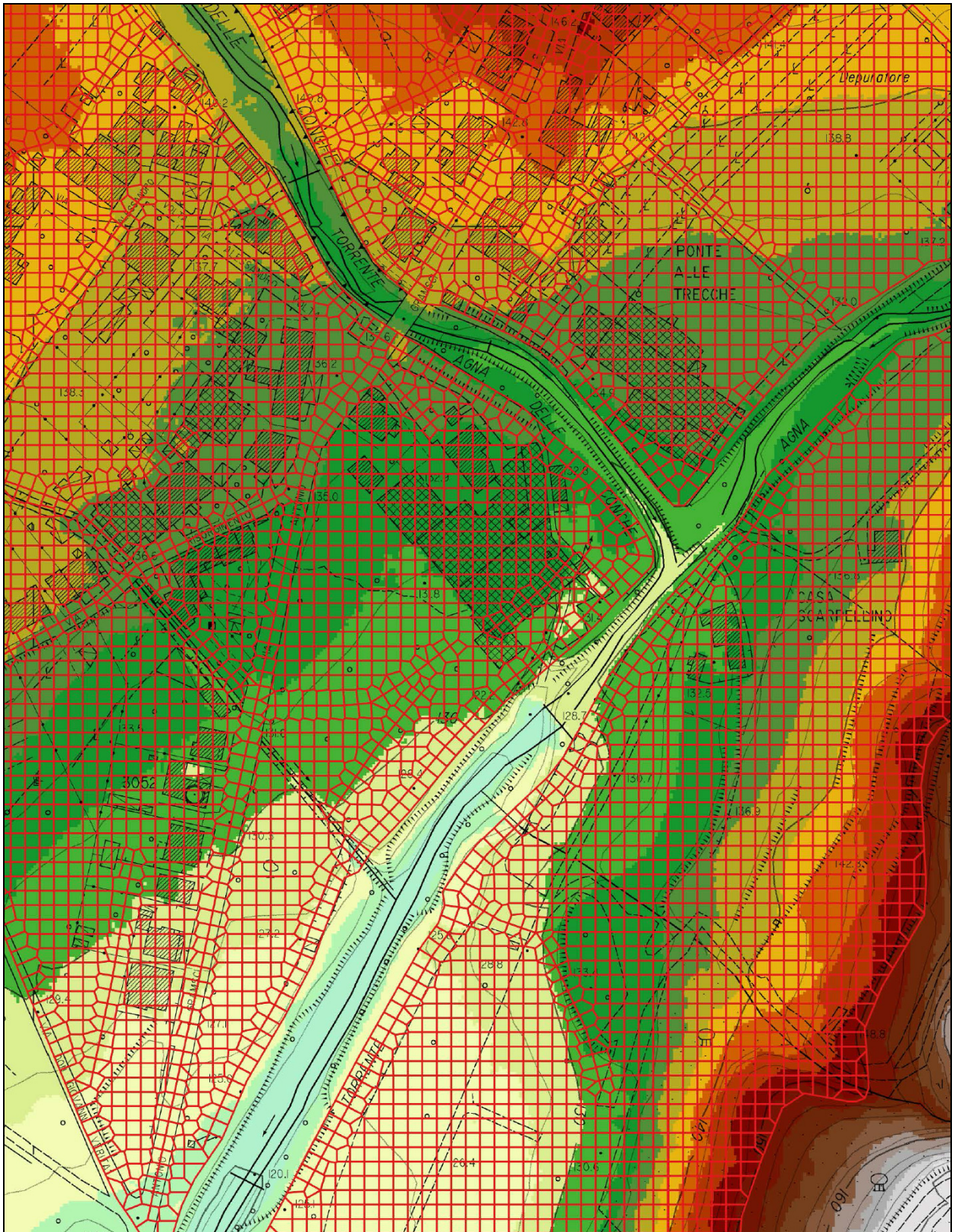


Figura 4-1 – Particolare delle maglie di calcolo adottate per la schematizzazione del modello bidimensionale (scala 1:2.000).



Figura 4-2 – Planimetria della copertura del suolo del modello bidimensionale (scala 1:5.000).

4.4.2 Condizioni al contorno di valle

Le condizioni al contorno di valle per il torrente Agna sono espresse in termini di *normal depth*, avendo assunto una pendenza di 0.01 pari a quella del fondo alveo.

4.4.3 Perdite per espansione e contrazione

I coefficienti delle perdite per espansione e contrazione per le verifiche in moto vario sono assunti pari a 0.1 (contrazione) e 0.2 (espansione).

4.4.4 Connessioni idrauliche

Le quote degli sfioratori d'alveo sono ricavate dalle sezioni, la larghezza del fronte di sfioro è posta pari alla distanza tra le sezioni.

In taluni casi è stato necessario sopraelevare localmente le quote degli sfioratori collegati ad aree bidimensionali al fine di rispettare la congruità con la quota della cella di arrivo.

Il coefficiente di stramazzo degli sfioratori laterali sono stati assunti pari a 1 nel caso di rilevati arginali e 0.5 nel caso di strutture non sopraelevate rispetto al terreno.

4.4.5 Scabrezze dei corsi d'acqua

Il valore del parametro di scabrezza (espressa come coefficiente di *Manning*) è assunto pari a 0.04 s/m^{1/3} per tutti i corsi d'acqua analizzati.

4.4.6 Passo temporale e durata della modellazione

La durata complessiva degli eventi simulati per il sistema dei torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli è assunta pari a 10 ore per entrambi i tempi di ritorno indagati.

Il passo temporale adottato nelle simulazioni degli eventi di piena è generalmente di 1 secondo.

5 VERIFICA DELLO STATO ATTUALE

Le verifiche idrauliche dello stato attuale sono condotte utilizzando la modellistica descritta nei paragrafi precedenti ed applicata ai tempi di ritorno di 30 e 200 anni e per la durata di 1.5 ore.

Le verifiche idrauliche hanno fornito, per ogni tempo di ritorno e durata considerati, i valori temporali e quelli massimi (iniluppi) di:

- portate e livelli idrometrici per ogni sezione del reticolo idrografico (modello mono-dimensionale);
- volumi e livelli idrometrici nelle aree di potenziale esondazione (modello quasi-bidimensionale);
- battenti di esondazione e velocità di propagazione nelle maglie di calcolo (modello bidimensionale);
- portate transitate attraverso gli elementi di connessione tra l'alveo e le aree e tra le aree stesse.

Obiettivo delle suddette verifiche è quello di valutare i battenti massimi (iniluppo) di piena raggiunti nell'area di studio in occasione di eventi di piena con tempo di ritorno pari a 30 e 200 anni e la conseguente inondabilità del territorio.

Nell'elaborato A.01 sono riportati i tabulati delle verifiche idrauliche dei corsi d'acqua studiati.

Nell'elaborato A.02 sono riportate le sezioni fluviali e i profili longitudinali dell'alveo, delle quote arginali e delle altezze idrometriche dei corsi d'acqua studiati con i massimi livelli idrici valutati per lo stato attuale per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni per il sistema idraulico dei torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli.

Nell'elaborato T.02 sono riprodotti i battenti di esondazione massimi e le velocità massime di propagazione delle esondazioni rispettivamente per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni per lo stato attuale del sistema idraulico dei torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli.

5.1 Individuazione dei tratti critici e delle aree inondabili dello stato attuale

Sulla base dei risultati ottenuti dalle verifiche idrauliche sono stati individuati i tratti critici dei corsi d'acqua considerati in relazione alla insufficienza di contenimento, nelle diverse sezioni fluviali disponibili, delle portate di piena relative ai diversi tempi di ritorno e alle differenti durate.

Le aree così definite sono imputabili alla esondazioni dalle aste principali considerate, rimangono pertanto escluse le aree inondate per effetto di altri corsi d'acqua o per fenomeni di rigurgito e/o di ristagno dovuti alla insufficienza di altre reti di drenaggio naturali e/o artificiali, ai livelli di falda e quanto altro non imputabile alle acque convogliate nel sistema fluviale considerato.

Inoltre, non sono state considerate le aree allagabili per ostruzione delle sezioni fluviali o per effetti conseguenti alla dinamica d'alveo.

Le verifiche idrauliche evidenziano per lo stato attuale quanto segue:

- la passerella posta in corrispondenza della sezione A_23 del torrente Agna delle Conche viene sormontata a partire dalle portate caratterizzate da tempi di ritorno trentennali. Le esondazioni indotte dal profilo di rigonfiamento determinato dalla presenza della passerella non si propagano comunque a valle data la morfologia dell'area;
- il ponte di via Gramsci non viene sormontato per nessun tempo di ritorno analizzato;
- il torrente Agna delle Conche inonda parzialmente l'area oggetto di interesse per il tempo di ritorno duecentennale, mentre per il tempo di ritorno di 30 anni le esondazioni interessano marginalmente le aree più depresse adiacenti l'alveo;
- a valle della confluenza tra i torrenti Agna delle Conche e Agna degli Acquiputtoli le esondazioni avvengono sia in sponda sinistra (tra le sezioni _5 e _10) che in sponda destra (tra le sezioni _6 e _8).

Le aree inondabili (elaborato T.03) sono tracciate a partire dalle mappe dei battenti per tempi di ritorno 30 e 200 anni.

5.2 Perimetrazione della pericolosità idraulica dello stato attuale

A partire dalla mappa delle aree allagabili sono state predisposte le mappe della pericolosità idraulica come definita dal D.P.G.R. n.53/R/2011 (elaborato T.03):

- 14 eventi con tempo di ritorno inferiore a 30 anni;
- 13 eventi con tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni;
- 12 eventi con tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni.

Analogamente sono state create le mappe della pericolosità idraulica come definita dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale ai sensi del P.G.R.A. (elaborato T.03):

- P3 aree con elevata probabilità di accadimento;
- P2 aree con media probabilità di accadimento;
- P1 aree con bassa probabilità di accadimento.

5.3 Perimetrazione della magnitudo idraulica dello stato attuale

Nell'elaborato T.03 è rappresentata la magnitudo idraulica definita ai sensi della L.R. 41/2018 come il risultato della combinazione tra i valori dei battenti idrometrici e delle velocità di propagazione delle alluvioni poco frequenti.

Le aree inondate sono suddivise in tre classi di magnitudo:

- *moderata*: in cui i battenti idrici sono inferiori o uguali a 0.5 m e le velocità sono inferiori o uguali a 1.0 m/s. Nel caso in cui la velocità non sia determinata, area inondata in cui i battenti sono uguali o inferiori a 0.3 m;
- *severa*: area con battenti inferiori o uguali a 0.5 m e velocità superiori a 1.0 m/s, oppure area con battenti compresi tra 0.5 m e 1.0 m e velocità inferiori o uguali a 1.0 m/s. Nel caso in cui la velocità non sia determinata, area inondata in cui i battenti sono compresi tra 0.3 m e 0.5 m;
- *molto severa*: dove i battenti sono compresi tra 0.5 m e 1.0 m e velocità superiori a 1.0 m/s, oppure area con battenti superiori a 1.0 m. Nel caso in cui la velocità non sia determinata, area inondata in cui i battenti superiori a 0.5 m;

6 DEFINIZIONE E VERIFICA DELLO STATO DI PROGETTO

La planimetria dell'intervento di progetto è riportata nell'elaborato T.05, mentre nell'elaborato T.08 sono riprodotte le sezioni di progetto sovrapposte a quelle attuali, assieme ai profili longitudinali sovrapposti nei tratti di intervento.

Le verifiche idrauliche hanno fornito, per ogni tempo di ritorno e durata considerati, i valori temporali e quelli massimi (involuppi) di:

- portate e livelli idrometrici per ogni sezione del reticolo idrografico (modello mono-dimensionale);
- volumi e livelli idrometrici nelle aree di potenziale esondazione (modello quasi-bidimensionale);
- battenti di esondazione e velocità di propagazione nelle maglie di calcolo (modello bidimensionale);
- portate transitate attraverso gli elementi di connessione tra l'alveo e le aree e tra le aree stesse.

6.1 Definizione degli interventi di riassetto idraulico

Gli interventi previsti sul torrente Agna delle Conche e sul torrente Agna a valle della confluenza possono essere così riassunti:

- riprofilatura dell'area golenale in sponda destra del torrente Agna delle Conche nelle sezioni A_4 / A_3 / A_2 / A_1;
- riprofilatura dell'area golenale in sponda destra del torrente Agna nelle sezioni _4 / _5 / _6 / _7 / _8 / _9;
- realizzazione di un muro di confine tra l'area di trasformazione e la golenale posto ad una distanza maggiore di 10.0 m dal ciglio di sponda, la cui posizione rimane invariata tra lo stato attuale e quello di progetto. Il nuovo muro di confine viene realizzato nelle sezioni A_4 / A_3 / A_2 / A_1 del torrente Agna delle Conche e nelle sezioni _4 / _5 / _6 / _7 / _8 del torrente Agna;
- tra le sezioni _8 e _9 del torrente Agna viene consolidato il muro esistente che si trova ad una distanza inferiore di 10.0 m dal ciglio di sponda. La distanza minima si registra in corrispondenza della briglia e risulta pari al valore di circa 5.0 m;
- a monte della sezione A_4 del torrente Agna delle Conche il limite dell'area di trasformazione è definito con una recinzione in rete a maglia sciolta fissata a pali infissi direttamente nel terreno posta ad una distanza minore di 10.0 m dal ciglio di sponda;
- tra la sezione A_4 e A_5 del torrente Agna delle Conche è prevista la realizzazione di una rampa di raccordo tra il piano campagna interno all'area di trasformazione, ipotizzato alla quota di 132.90 m s.l.m., e quello prospiciente il torrente. La rampa potrà essere confinata a campagna da un muro che dovrà essere realizzato ad una distanza maggiore di 10.0 m dal ciglio di sponda;
- lo spazio compreso tra il muro di confine e la sponda destra prospiciente l'alveo viene restituito al corso d'acqua con funzione di area alluvionale. Inoltre, la quota di tale area viene abbassata rispetto a quella attuale, anche a seguito della bonifica ambientale prevista in tale area.

6.2 Verifica dello stato di progetto

I tabulati delle verifiche idrauliche di progetto sono riportati nell'elaborato A.02.

Nell'elaborato A.03 sono riportate le sezioni fluviali e i profili longitudinali dell'alveo, delle quote arginali e delle altezze idrometriche dei corsi d'acqua studiati con i massimi livelli idrici valutati per lo stato attuale per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni per il sistema idraulico dei torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli.

Nell'elaborato T.06 sono riprodotti i battenti di esondazione massimi e le velocità massime di propagazione delle esondazioni rispettivamente per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni per lo stato attuale del sistema idraulico dei torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli.

La verifica dello stato di progetto indica che le quote dei nuovi contenimenti previsti sulla sponda destra sono in grado di far defluire la piena duecentennale con un franco idraulico minimo superiore a 100 cm.

L'aumento della sezione bagnata conseguente alla riprofilatura della golenia in sponda destra consente di ottenere una riduzione dei livelli idrometrici per entrambi i tempi di ritorno studiati. Tale riduzione è maggiore nel tratto di intervento del torrente Agna delle Conche, tra il salto di fondo e la confluenza, e minore in quello lungo il torrente Agna posto tra la confluenza e la briglia.

La diminuzione dei battenti idrometrici comporta un notevole beneficio in termini di riduzione dell'estensione e dell'intensità delle esondazioni stimate per il tempo di ritorno di 200 anni in sponda sinistra dei torrenti Agna di Acquiputtoli e Agna.

Gli interventi di progetto, inoltre, non determinano alcun aggravio a valle né in termini di incrementi dei colmi di portata né in termini di maggiori volumi trasferiti a valle.

Nell'ultima sezione fluviale del modello idraulico (codice sezione _1) nello stato attuale e in quello di progetto transita un colmo di portata di circa 255 m³/s e un volume dell'idrogramma di 1'800'000 m³ (vedere Figura 6-1).

Nell'elaborato T.07 sono riportate per lo stato di progetto le aree inondabili, le pericolosità idrauliche definite ai sensi D.P.G.R. n.53/R/2011 e del P.G.R.A., nonché la magnitudo idraulica definita ai sensi della L.R. 41/2018.

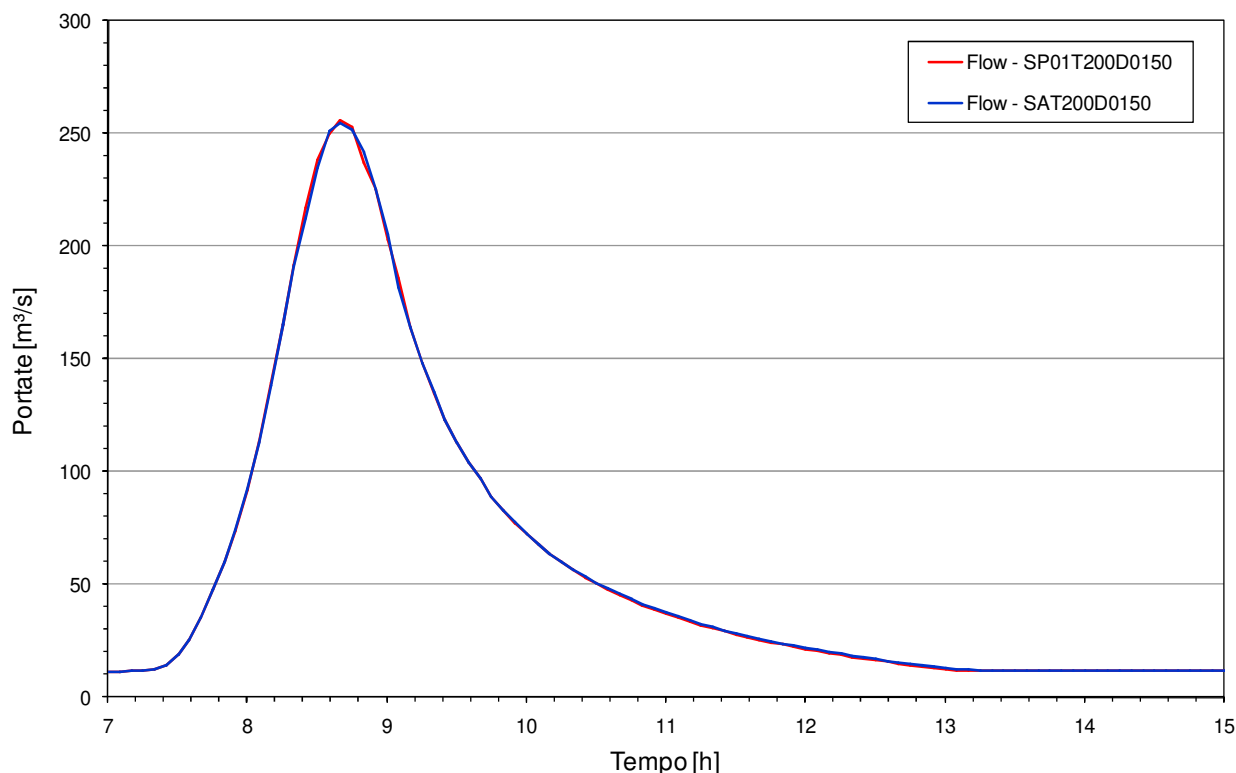


Figura 6-1 – Confronto tra gli idrogrammi della portata duecentennale in transito nella sezione _1 nello stato attuale e in quello di progetto.

7 CONCLUSIONI

Dai risultati ottenuti dalla verifica idraulica dei corsi d'acqua Agna delle Conche e Agna degli Acquiputtoli, in un'area posta in corrispondenza della loro confluenza in località Fognano nel Comune di Montale, emerge che l'area interessata dalla previsione di trasformazione è inondata per eventi di piena con tempi di ritorno pari a 200 anni e marginalmente interessata dalle acque in transito per l'evento trentennale.

Gli interventi di riassetto idraulico sono definiti in modo da migliorare l'ambiente fluviale nel tratto di intervento.

In questo senso gli interventi di progetto previsti vanno a recuperare un'ampia area golenale in sponda destra nell'area della confluenza. Le opere previste costituiscono un efficace raccordo tra l'area di intervento e la pertinenza fluviale.

Le verifiche idrauliche mostrano che non vi sono aggravii nelle aree a valle in termini di portate ma una riduzione delle aree inondabili in modo particolare in sponda sinistra.

A. APPENDICE
Il modello idrologico a parametri distribuiti PIENE

IL MODELLO IDROLOGICO A PARAMETRI DISTRIBUITI PIENE

Il programma PIENE è finalizzato alla stima degli idrogrammi di piena su base idrologico-statistica attraverso l'applicazione di un modello a parametri distribuiti che trasforma la precipitazione (definita dalle curve di possibilità pluviometriche CPP) in deflusso in una data sezione idrografica.

Le curve di possibilità pluviometrica devono essere calcolate per tutte le stazioni ricadenti nel bacino di interesse. Le CPP devono essere espresse nella seguente forma:

$$h = aT^m t^n$$

dove a , m e n sono i parametri, T il tempo di ritorno e t la durata della precipitazione.

Il modello a parametri distribuiti è composto da un modello di infiltrazione che determina l'ammontare della pioggia netta e da un modello di trasferimento che determina la formazione dell'onda di piena in una data sezione di chiusura.

Il modello di infiltrazione utilizza come parametri la velocità di filtrazione a saturazione e la capacità di ritenuta gravitazionale. Le due componenti sono state stimate a partire dalla geolitologia del bacino e dall'uso del suolo.

Il processo di calcolo della pioggia netta è, inoltre, vincolato alla definizione del grado di saturazione all'inizio dell'evento che viene definito per tutto il bacino di interesse.

Il modello di trasferimento utilizza due parametri per ciascuna cella: il primo determina il tempo di ritardo cinematico mentre il secondo determina il ritardo dovuto alla componente di invaso.

Viene definito un tempo di ritardo complessivo calcolato in base ad una distribuzione di velocità di trasferimento all'interno del bacino. La velocità di trasferimento può essere definita in funzione dell'area del bacino sotteso, della lunghezza del reticolo a monte e della pendenza locale.

Il tempo di ritardo complessivo viene quindi ripartito nelle due componenti cinematica e di invaso in funzione di un parametro unico per tutto il bacino.

I parametri che regolano la trasformazione afflussi-deflussi e che possono essere variati dall'utente sono in definitiva i seguenti:

- grado di saturazione all'inizio dell'evento;
- grado di ripartizione fra la componente cinematica e quella di invaso;
- moltiplicatore della velocità di trasferimento che definisce il tempo di ritardo;
- moltiplicatore della capacità di ritenuta;
- moltiplicatore della velocità di filtrazione a saturazione.

I parametri del modello sono stimati sulla base di tarature condotte in genere su una serie di sottobacini per i quali siano noti gli afflussi e i deflussi per un certo numero di eventi.

Le caratteristiche geografiche e idrologiche

Il modello necessita di una serie di mappe relative alle grandezze idrologiche e geografiche.

Le mappe tematiche

- *Mappa delle quote*: la mappa delle quote riporta le quote sul livello del mare per tutto il bacino da analizzare. In genere è necessario procedere ad una correzione della mappa delle quote in fase di preparazione dei dati in quanto molti dei modelli digitali disponibili presentano delle celle depresse che non consentono la corretta identificazione delle linee di impluvio nel bacino.

- *Mappa dei puntatori idrologici*: i puntatori idrologici indicano per ciascuna cella ove questa versi il proprio contributo al deflusso superficiale. I valori vanno da 1 a 8 e sono relativi alle 8 celle che circoscrivono la cella in questione. La numerazione è assegnata in senso antiorario a partire dalla cella in basso a sinistra. Per ciascuna cella si assume che questa versi nella cella di quota minore tra quelle che la circondano.
- *Mappa degli ordini idrologici*: la mappa degli ordini riporta per ciascuna cella il massimo numero di celle che stanno a monte su un dato percorso di trasferimento. Le celle di sorgente hanno ordine pari a 1. Procedendo verso valle a ogni confluenza si assegna alla cella di valle il massimo ordine di monte più 1.
- *Mappa dei tempi di trasferimento*: la mappa dei tempi di trasferimento riporta invece il tempo complessivo in ore, [h], perché l'acqua si trasferisca da ciascuna cella fino alla foce. I tempi di trasferimento possono essere calcolati secondo una distribuzione di velocità funzione dell'area del bacino sotteso, della lunghezza del reticolo a monte e della pendenza locale.
- *Mappa della velocità di filtrazione a saturazione*: la mappa di infiltrazione a saturazione è espressa in [mm/h]. Tale mappa viene di norma calcolata in funzione della geolitologia del bacino e dell'uso del suolo sulla base di opportune tabelle di correlazione.
- *Mappa della capacità di ritenuta*: la mappa della capacità di ritenuta è espressa in [mm]. Tale mappa viene di norma calcolata in funzione della geolitologia del bacino e dell'uso del suolo sulla base di opportune tabelle di correlazione.
- *Mappa del Curve Number*: la mappa contiene i valori del numero di curva per il calcolo della precipitazione netta secondo il metodo del *Curve Number*. Se è presente questa mappa non sono necessarie le due mappe precedenti.
- *Mappa dei topoieti*: la mappa dei topoieti attribuisce a ciascuna cella il puntatore alla stazione pluviometrica a questa più vicina. Le stazioni sono quelle riportate nel file delle curve di possibilità pluviometrica. Il puntatore indica il numero di ordine corrispondente nel file delle curve di possibilità pluviometrica pertanto a ogni modifica del file delle curve di possibilità pluviometrica deve corrispondere la modifica della mappa dei topoieti.

Le curve di possibilità pluviometrica

Il modello necessita, inoltre, dei dati di precipitazione per ciascuna cella del bacino. Poiché le precipitazioni sono note come valori puntuali in una serie di stazioni di misura ricadenti nel bacino o limitrofe ad esso, è necessario procedere alla definizione di una distribuzione spaziale della precipitazione. Il criterio adottato è rappresentato dal metodo dei topoieti o di *Thiessen*.

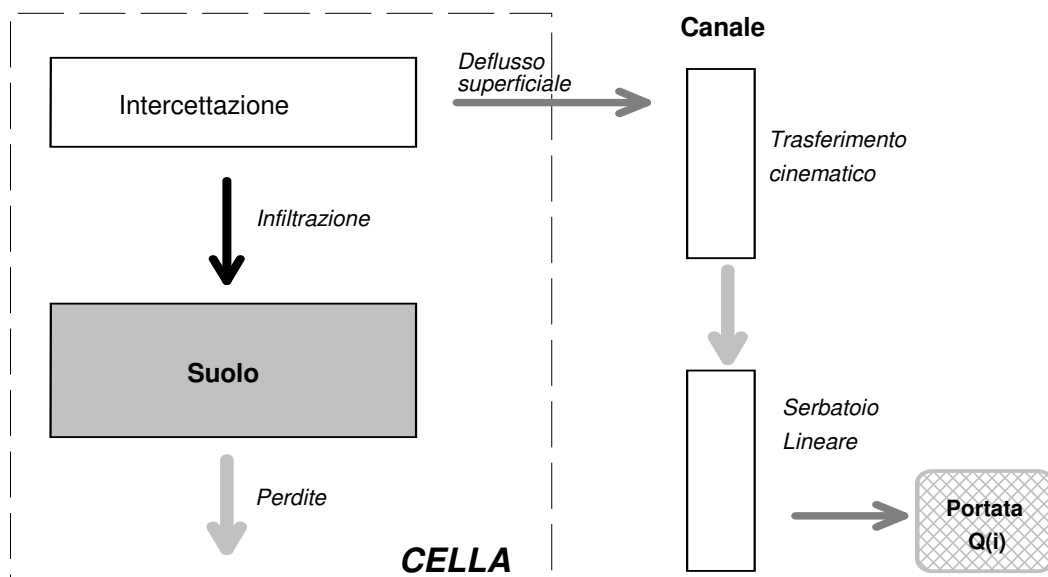
Le curve di possibilità pluviometrica sono archiviate nel file relativo che contiene le seguenti informazioni:

- CODICE della stazione;
- parametri a , n e m per durate superiori ad un ora;
- parametri a' , n' e m' per durate inferiori ad un ora.

Algoritmi di calcolo

Il calcolo viene condotto per ciascuna cella e per tutti i passi temporali secondo le seguenti fasi:

- *intercettazione*: in questa fase si effettua una stima della quantità di acqua che viene comunque sottratta al deflusso superficiale. La stima è riferita ad una componente iniziale che comprende le varie perdite per intercettazione (vegetazione, assorbimento del suolo) e ad una componente a regime riferita alla capacità di infiltrazione a saturazione;
- *suolo*: in questa fase si ricostruisce il bilancio idrologico del suolo, valutando la quantità d'acqua che va ad alimentare il volume profondo e la componente del deflusso ipodermico,
- *canale*: in questa fase si simula il trasferimento del deflusso superficiale e di quello ipodermico dalla singola cella alla sezione di chiusura.



All'inizio dell'evento di precipitazione una parte della pioggia si infiltra nel suolo, fino a saturare la capacità di ritenuta del suolo. Saturato tale volume, l'acqua continua a infiltrare nel suolo con un tasso definito dalla velocità di infiltrazione. Se l'afflusso eccede la velocità di infiltrazione si ha deflusso superficiale verso il canale. Tale deflusso contribuisce alla portata con un ritardo dettato dal modello di trasferimento.

Il bilancio del serbatoio "suolo" tiene pertanto conto da una parte dell'afflusso per infiltrazione, dall'altra delle perdite. Le perdite sono tali che per suolo saturo la quantità di acqua che si infiltra nel suolo sia pari alla velocità di infiltrazione.

Sulla base di quanto esposto, il modello necessita della definizione dei seguenti parametri validi su tutto il bacino:

- 1) *Grado di saturazione iniziale*: rappresenta la percentuale di acqua presente nel volume gravitazionale di suolo;
- 2) *Coefficiente di ripartizione cinematico – serbatoio lineare*: esprime il peso relativo del tempo di ritardo attribuibile alla componente cinematica e alla componente di serbatoio lineare;
- 3) *Parametro di scala per il calcolo della velocità di trasferimento*: rappresenta la velocità con cui il deflusso superficiale generato nella singola cella si trasferisce alla sezione di chiusura:

La capacità di ritenuta in [mm], ovvero la quantità di acqua che può essere immagazzinata nella parte gravitazionale del suolo (corrisponde al grado di saturazione uguale a 1) e la velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h] che rappresenta la velocità di infiltrazione nel suolo in condizioni di saturazione (grado di saturazione uguale a 1) sono definite dalle mappe *raster* relative.

Il modello prevede comunque parametri moltiplicativi per calibrare il valore medio di tali grandezze su tutto il bacino nella sola fase di taratura.

A questi si aggiungono i coefficienti della formula per il ragguaglio all'area che sono definiti in seguito.

Le fasi computazionali

Con riferimento alle variabili elencate nella seguente Tabella si riportano di seguito i principali calcoli effettuati dal programma per ciascuna cella costituente il bacino:

Simbolo	Significato	unità misura
Pi_k	valore dell'afflusso (precipitazione) per la singola cella al passo k-esimo	[mm/h]
Δt	passo temporale	[h]
Dx	passo spaziale	[m]
SC	valore della capacità di ritenuta del suolo (<i>storage capacity</i>)	[mm]
KL	valore della velocità di infiltrazione a saturazione	[mm/h]
RI	coefficiente moltiplicativo della capacità di ritenuta del suolo	[/]
IN	<i>coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione</i>	[/]
IP	coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica	[/]
T	valore dei tempi di trasferimento	[h]
$T_c = CI T$	valore dei tempi di trasferimento o di risposta secondo lo schema cinematico	[h]
$T_{i=(1-CI) T/MT}$	valore dei tempi di trasferimento secondo lo schema di trasferimento di invaso	[h]
MT	coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento	[/]
CI	coefficiente ripartizione cinematico-invaso	[/]
$\theta_{max} = RI SC$	valore distribuito della capacità di ritenuta massima del suolo (volume utile del suolo)	[mm]
$K_s = IN KL$	valore distribuito della velocità di infiltrazione a saturazione (o permeabilità)	[mm/h]
$\tau_c = T_c/MT$	valore distribuito dei tempi di trasferimento secondo il metodo cinematico	[h]
$\tau_i = T_i/MT$	valore distribuito dei tempi di trasferimento secondo il metodo dell'invaso	[h]
$C_{s=1/\tau_i}$	valore distribuito della costante di esaurimento del serbatoio lineare	[1/h]
α_o	frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale)	[/]
θ_o	contenuto di acqua nel suolo nello stato iniziale	[mm]
$K = IP(KL/SC)$	coefficiente di deflusso ipodermico	[1/h]
θ_k	contenuto di acqua nel suolo al passo k-esimo	[mm]
I_{eff}	Infiltrazione effettiva	[mm/h]
Q_{1k}	contributo verso il reticolo al passo k-esimo	[mm/h]
φ_k	volume d'acqua invasata nel reticolo	[mm]
Q_k	contributo alla foce passo k-esimo	[mm/h]

- 1) L'afflusso sulla singola cella, Pi_k [mm/h] è determinato con il metodo dei topoiati.
- 2) Il suolo è assimilato a un serbatoio lineare che si riempie in ragione della precipitazione (di intensità costante sul passo di bilancio) e si svuota in ragione della percolazione, K_s [mm/h], e del deflusso ipodermico regolato dal parametro K [1/h].
- 3) L'equazione di continuità, da cui si ricava il contenuto di acqua nel suolo da un passo a quello successivo, è esprimibile in forma differenziale nel seguente modo:

$$\Delta\theta = \theta_{k+1} - \theta_k = \left(P_i - K_s - K \times \frac{\theta_{k+1} + \theta_k}{2} \right) \times dt$$

$$\Rightarrow \frac{\theta_{k+1}}{dt} + \frac{K}{2} \times \theta_{k+1} = \frac{\theta_k}{dt} - \frac{K}{2} \times \theta_k + P_i - K_s$$

$$\theta_{k+1} = \left(\frac{\left(\frac{1}{dt} - \frac{K}{2} \right) \times \theta_k + P_i - K_s}{\frac{1}{dt} + \frac{K}{2}} \right)$$

- 4) Il contenuto di acqua nel suolo all'inizio θ_0 [mm] è uguale a $\alpha_0 \theta_{max}$ dove α_0 è il grado di saturazione iniziale. Il valore del contenuto di acqua nel suolo è limitato tra 0 e θ_{max} , pertanto si possono distinguere tre casi:

a) *essiccamento del suolo:*

se $\theta_k / dt + Pi_k > K_s$ allora

$$\theta_{k+1} = 0$$

$$Q_{1k} = \theta_k / dt + Pi_k - K_s$$

$$I_{eff} = K_s$$

Altrimenti

$$\theta_{k+1} = 0$$

$$Q_{1k} = 0$$

$$I_{eff} = \theta_k / dt + Pi_k$$

b) *saturazione del suolo:*

$$\theta_{k+1} = \theta_{max}$$

$$Q_{1k} = (\theta_k - \theta_{max}) / dt + Pi_k - K_s$$

$$I_{eff} = K_s$$

c) *caso intermedio:*

$$0 < \theta_{k+1} < \theta_{max}$$

$$Q_{1k} = (\theta_k - \theta_{k+1}) / dt + Pi_k - K_s$$

$$I_{eff} = K_s$$

Il modello di trasferimento nel reticolo è costituito da una componente di invaso e da una componente cinematica poste in serie. La componente di invaso è caratterizzata dalla seguente espressione:

$$\varphi_{k+1} = \left(\frac{\left(\frac{1}{dt} - \frac{C_s}{2} \right) \varphi_k + Q_{1k}}{\frac{1}{dt} + \frac{C_s}{2}} \right)$$

dove C_s , [1/h] è il parametro del serbatoio calcolato come $1/\tau$ e φ_k il volume d'acqua nel reticolo (assunto inizialmente nullo). Il contributo verso la componente cinematica risulta

$$Q_k = C_s \otimes \frac{\varphi_{k+1} + \varphi_k}{2}$$

- 5) La componente cinematica trasla nel tempo il contributo Q_k di un fattore pari a τ_c .

Il contributo complessivo alla sezione di chiusura avviene attraverso la convoluzione dei contributi delle singole celle.

Sulla base di quanto esposto, il modello necessita della definizione dei seguenti parametri validi su tutto il bacino:

α_0 frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale) [/]

Rl coefficiente moltiplicativo del raster della capacità di ritenuta del suolo [/]

IN coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione [/]

IP coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica [/]

MT coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento [/]

Cl coefficiente ripartizione cinematico-invaso [/]

Opere di laminazione

Le seguenti opere di laminazione possono essere considerate nel modello idrologico:

- Invasi in linea con fessura;
- Invasi in linea con luce a battente;
- Invasi in derivazione.

L'invaso in linea con fessura è caratterizzato da una legge di riempimento che lega i volumi e i livelli del tipo:

$$V = a H^b$$

dove a e b sono parametri stimati dalla cartografia e H è l'altezza d'acqua dal fondo dell'invaso.

Gli invasi in linea con fessura sono caratterizzate dai seguenti parametri:

- b larghezza della fessura;
- μ coefficiente di efflusso fessura;
- h altezza della soglia sfiorante;
- b_2 larghezza della soglia sfiorante;
- μ_2 coefficiente di efflusso della soglia sfiorante.

La portata scaricata per H minore dell'altezza della soglia sfiorante h :

$$Q_s = \mu b H \sqrt{2gH}$$

Per H maggiore della quota della soglia sfiorante

$$Q_s = \mu b H \sqrt{2gH} + \mu_2 (b_2 - b)(H - h) \sqrt{2g(H - h)}$$

Gli invasi in linea con luce a battente sono caratterizzate dai seguenti parametri:

- b larghezza della luce a battente
- μ coefficiente di efflusso luce
- b_1 altezza della luce a battente
- μ_1 coefficiente di efflusso luce a battente
- h altezza della soglia sfiorante
- b_2 larghezza della soglia sfiorante
- μ_2 coefficiente di efflusso della soglia sfiorante

La portata scaricata per H minore dell'altezza della luce a battente b_1 :

$$Q_s = \mu b H \sqrt{2gH}$$

Per H compreso tra b_1 e $1.5 b_1$ si applica una formula di raccordo con la seguente espressione:

$$Q_s = \left(\mu - 2(\mu - \mu_1) \frac{H - b_1}{b_1} \right) b b_1 \sqrt{2g b_1}$$

Per H compreso tra $1.5 b_1$ e la quota della soglia sfiorante h :

$$Q_s = \mu_1 b b_1 \sqrt{2g(H - 0.5b_1)}$$

Per H maggiore dell'altezza della soglia sfiorante h ;

$$Q_s = \mu_2 b_2 (H - h) \sqrt{2g(H - h)} + \mu_1 b b_1 \sqrt{2g(H - 0.5b_1)}$$

Gli invasi in derivazione sono caratterizzate dai seguenti parametri:

- b larghezza della soglia sfiorante
- μ coefficiente di efflusso soglia sfiorante
- h altezza della soglia sfiorante
- μ_1 coefficiente di efflusso soglia rigurgitata
- a, b, c parametri della scala di deflusso in prossimità della soglia sfiorante, rappresentata dalla seguente espressione: $Q = a (H_a - b)^c$ dove H_a è l'altezza d'acqua in alveo dal fondo della cassa.

La portata sfiorata nella cassa è funzione del livello in alveo calcolato con la scala di deflusso e quello nella cassa calcolato con la legge di riempimento. Nel caso di livello in alveo superiore a quello nella cassa e assumendo che il livello nella cassa sia superiore alla soglia sfiorante si applica la seguente formula per stramazzi rigurgitati:

$$Q_s = b(\mu_1(H - h) + \mu(H_a - H))\sqrt{2g(H_a - H)}$$

Il modello idrologico calcola gli apporti alle opere di laminazione derivanti sia dai bacini principali che intermedi. Quindi calcola l'effetto di laminazione di ciascun intervento da monte verso valle provvedendo al trasferimento dei contributi in base al modello misto cinematico-invaso utilizzato per i calcoli idrologici. Un tale approccio consente di verificare in una unica soluzione gli effetti di complessi sistemi in cascata di opere di laminazione fornendo lo strumento per valutare la riduzione di portata non solo a valle dell'opera singola ma anche in prossimità di un obiettivo posto a valle della stessa.

Definizione dell'input pluviometrico

- *Intensità costante*: il programma di default utilizza un ietogramma a intensità costante. L'intensità viene valutata in funzione della durata e della curva di possibilità pluviometrica.
- *Lo ietogramma Chicago*: l'input di precipitazione, in termini di ietogramma, può essere definito sulla base delle curve di possibilità pluviometrica (CPP) adottando un particolare ietogramma di intensità variabile, noto in letteratura scientifica come *ietogramma Chicago*.

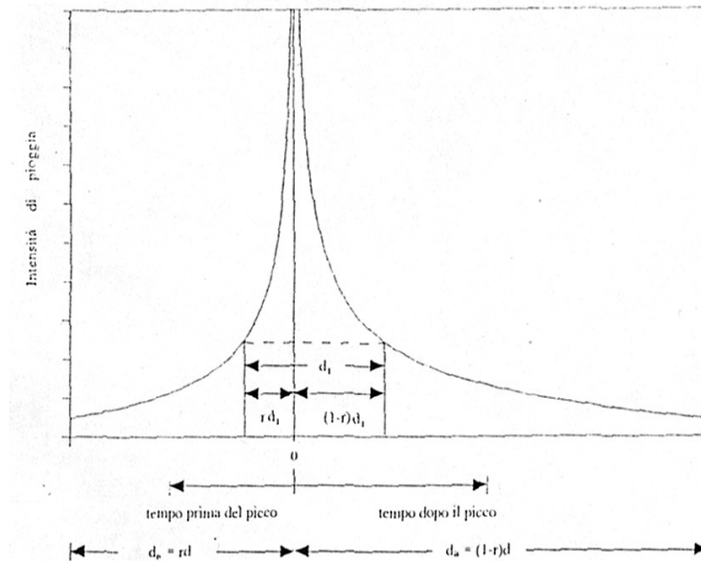
Lo ietogramma Chicago prevede la seguente formulazione per la parte antecedente e successiva al picco di intensità della precipitazione:

$$i(t) = n \times (aT^m) \times \left(\frac{t_b}{r}\right)^{n-1} \quad \text{per } t \leq t_p$$

$$i(t) = n \times (aT^m) \times \left(\frac{t_a}{(1-r)}\right)^{n-1} \quad \text{per } t > t_p$$

dove:

- a, n, m parametri della CPP ($h = a d^n T^m$);
- T tempo di ritorno (anni) prescelto per l'evento
- t tempo dall'inizio dell'evento;
- t_p tempo di picco;
- t_b tempo mancante al verificarsi del picco;
- t_a tempo trascorso dal verificarsi del picco;
- d durata dell'evento;
- r fattore di fase (determina la posizione temporale del picco)



La particolarità di questo ietogramma (che è anche la sua comodità), è quello di racchiudere al suo interno, per tutte le durate minori di quella complessiva t_b , eventi congruenti con la CPP, e quindi di sollecitare sicuramente in modo critico il bacino di volta in volta considerato.

Il ragguglio areale

La variabilità spazio-temporale della precipitazione è messa in conto attraverso un *coefficiente di ragguglio areale*, K_r , del tipo:

$$K_r = h_A(A, t)/h(t)$$

dove $h_A(A, t)$ è l'altezza di pioggia di durata t raggugliata all'area A e $h(t)$ l'altezza di pioggia di durata t nel centro di scroscio.

Il valore di K_r dipende da tre fattori:

- l'estensione dell'area investita dalla precipitazione;
- la durata considerata;
- l'altezza di pioggia.

Per la quantificazione di K_r si è fatto riferimento alla formula dell'USWB ove alcuni parametri sono modificati per tenere in conto delle caratteristiche del territorio italiano:

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

dove α , β e γ sono i parametri della formula, t [h] la durata della precipitazione e A [km²] l'area del bacino.

Nel presente caso i parametri della formula adottata sono i seguenti:

- $\alpha = 0.036$;
- $\beta = 0.25$;
- $\gamma = 0.01$.

La applicazione del coefficiente di ragguglio areale allo ietogramma di tipo *Chicago* è stata condotta applicando la formula separatamente a ciascun intervallo di tempo a cavallo del picco di pioggia in modo da modificare la forma dello ietogramma di progetto in funzione dell'area del bacino a cui questo viene applicato.

Una tale applicazione consente di modificare automaticamente la forma dello ietogramma in considerazione del fatto che le piogge ragguagliate per bacini piccoli mantengono alti valori di intensità che poi diminuiscono all'aumentare della dimensione del bacino fino a divenire assimilabili a precipitazioni di intensità costante per grandi bacini.

È possibile anche impostare il valore del K_r costante prescindendo dal calcolo con la formula suddetta.

Il coefficiente di ragguaglio areale K_r dipende come abbiamo visto dalla durata dell'evento e dall'area del bacino. Nel caso sia necessario conoscere i contributi di una serie di interbacini in serie in modo da mantenere, da monte verso valle, il volume affluito uguale a quello che si avrebbe per ciascuna sezione di chiusura, tali contributi possono essere calcolati con l'opzione globale.

Per il calcolo di K_r dell'interbacino K_a si procede pertanto al calcolo separatamente per la sezione di monte K_m e per la sezione di valle K_v procedendo pertanto al calcolo con la seguente formula:

$$K_a = \frac{K_v A_v - K_m A_m}{(A_v - A_m)}$$

dove:

- K_v = coefficiente di ragguaglio areale per il bacino di valle;
- A_v = area del bacino di valle;
- K_m = coefficiente di ragguaglio areale per il bacino di monte;
- A_m = area del bacino di monte.

È possibile imporre l'area da utilizzare per il calcolo del coefficiente di ragguaglio. Ciò può essere utile se si intende produrre degli idrogrammi di piena che non siano critici per ciascun sottobacino ma per il bacino complessivo.

B. APPENDICE

Tabulati analisi idrologica con il modello PIENE (portate al colmo bacini totali)

Corso d'acqua	Codice	Area [km ²]	T ritardo [h]	Portata [m ³ /s]	Precipit. [mm]	Deflusso [mm]	D critica [h]	Coeff. ragguaglio	Defl. unit. [m ³ /s km ²]	CPP a<1h	CPP n<1h	CPP m<1h	CPP a>1h	CPP n>1h	CPP m>1h
IMI001	_1_A	11.88	0.76	60.9	60.85	47.06	1.81	0.958	5.123	23.713	0.370	0.212	23.713	0.370	0.212
IMI002	A_24	10.95	0.78	57.2	61.28	49.10	1.81	0.962	5.226	23.935	0.369	0.212	23.935	0.369	0.212
IMI003	A_13	11.10	0.89	55.2	62.12	49.92	1.88	0.962	4.974	23.940	0.369	0.212	23.940	0.369	0.212
IMI004	_11	23.97	0.83	107.7	62.19	46.78	1.91	0.922	4.494	23.818	0.369	0.212	23.818	0.369	0.212

Tabella B-1 – Tabulati analisi idrologica per Tr = 30 anni sistema torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli.

Corso d'acqua	Codice	Area [km ²]	T ritardo [h]	Portata [m ³ /s]	Precipit. [mm]	Deflusso [mm]	D critica [h]	Coeff. ragguaglio	Defl. unit. [m ³ /s km ²]	CPP a<1h	CPP n<1h	CPP m<1h	CPP a>1h	CPP n>1h	CPP m>1h
IMI001	_1_A	11.88	0.76	128.8	83.35	68.20	1.44	0.956	10.842	23.713	0.370	0.212	23.713	0.370	0.212
IMI002	A_24	10.95	0.78	118.5	82.41	69.48	1.36	0.959	10.823	23.935	0.369	0.212	23.935	0.369	0.212
IMI003	A_13	11.10	0.89	114.1	84.07	71.06	1.43	0.959	10.280	23.940	0.369	0.212	23.940	0.369	0.212
IMI004	_11	23.97	0.83	235.0	86.36	68.53	1.56	0.918	9.805	23.818	0.369	0.212	23.818	0.369	0.212

Tabella B-2 – Tabulati analisi idrologica per Tr = 200 anni sistema torrenti Agna delle Conche e Agna di Acquiputtoli.