

COMUNE DI ASCIANO (SI)

STUDIO IDROLOGICO E IDRAULICO DEI BORRI COPRA, BESTINA, BESTININO, RABATTA E CASACCIA FINO ALLA CONFLUENZA CON IL FIUME OMBRONE

d.01 RELAZIONE STUDIO IDROLOGICO

Marzo 2014 rev. 3

Il tecnico incaricato

Ing. Claudio Lombardi

Collaboratori

Ing. Alessio Magazzini

Ing. Alberto Nastasi

Studio Tecnico Ing. CLAUDIO LOMBARDI

Strada di Busseto 18, 53100 SIENA (Italy)

T-F: +39 0577 47463

E: claudio.lombardi@sitingegneria.it

E-pec: claudio.lombardi@ingpec.eu

Indice

STUDIO IDROLOGICO	3
PREMESSA.....	3
PARAMETRI GEOMORFOLOGICI DEI BACINI IDROGRAFICI.....	7
I DATI DELLO STUDIO DI REGIONALIZZAZIONE DELLE PIENE IN TOSCANA E IL QUADRO CONOSCITIVO DEL BACINO DEL F. OMBRONE ...	10
LINEE SEGNALETRICI DI PROBABILITÀ PLUVIOMETRICA.....	16
DESCRIZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO DI HEC - HMS 3.5.....	20
STIMA DEL COEFFICIENTE DI DEFLUSSO - METODO DEL CURVE NUMBER	24
ANALISI DELLE PRECIPITAZIONI MASSIME GIORNALIERE DELLE STAZIONI INFLUENTI SUI CORSI D'ACQUA IN STUDIO	32
TEMPO DI RITARDO E TEMPO DI CORRIVAZIONE	36
PORTATE E IDROGRAMMI DI PIENA	39

Studio idrologico

Premessa

Su incarico del Comune di Asciano è stato redatto il presente studio idrologico e idraulico di supporto del nuovo Regolamento Urbanistico Comunale, in base a quanto disposto dalla DPGR 25 ottobre 2011 n. 53/R "Regolamento di attuazione dell'art. 62 della L.R. 3 gennaio 2005 n.1 (Norme per il governo del territorio) in materia di indagini geologiche.

Le verifiche idrologiche e idrauliche interessano i seguenti corsi d'acqua, ricadenti nel Bacino Regionale del Fiume Ombrone: F. Ombrone nel tratto tra la confluenza con il Borro della Casaccia e il Borro della Copra, il Borro della Copra con l'affluente Borro della Bestina oltre agli affluenti Borro Bestinino e Borro della Rabatta.

Il Borro della Copra e della Casaccia risultano tributari in sinistra idraulica del Fiume Ombrone in prossimità del centro abitato.

A seguito dell'evento meteorologico del 21 Ottobre 2013, che ha prodotto significativi allagamenti in tutta l'area oggetto dello studio, in accordo con l'ufficio Tecnico del Genio Civile di Siena, è stata effettuata una calibrazione dei parametri del modello idrologico e di quello idraulico implementati, ed una valutazione riguardante la tendenza all'aumento delle precipitazioni estreme, verificatasi in particolar modo nell'ultimo decennio ([vedi elaborato d.04](#)).

L'aggiornamento degli studi idraulici è stata supportata da una integrazione dei rilievi topografici, mirata in particolare alla verifica delle interconnessioni fra reticolo idrografico principale e quello minore, in corrispondenza degli attraversamenti ferroviari, con particolare riferimento all'area di monte della confluenza del Borro della Bestina e del Borro del Bestinino, già interessata da allagamenti nell'anno 2004.



Figura 1 - Ortofoto con indicazione dei corsi d'acqua oggetto del presente studio (da SIT Provincia di Siena)

Nel PAI del Bacino Regionale del Fiume Ombrone viene individuata una criticità a monte della confluenza fra il Borro della Copra e il Borro della Bestina, in corrispondenza dell'attraversamento della Strada Lauretana.

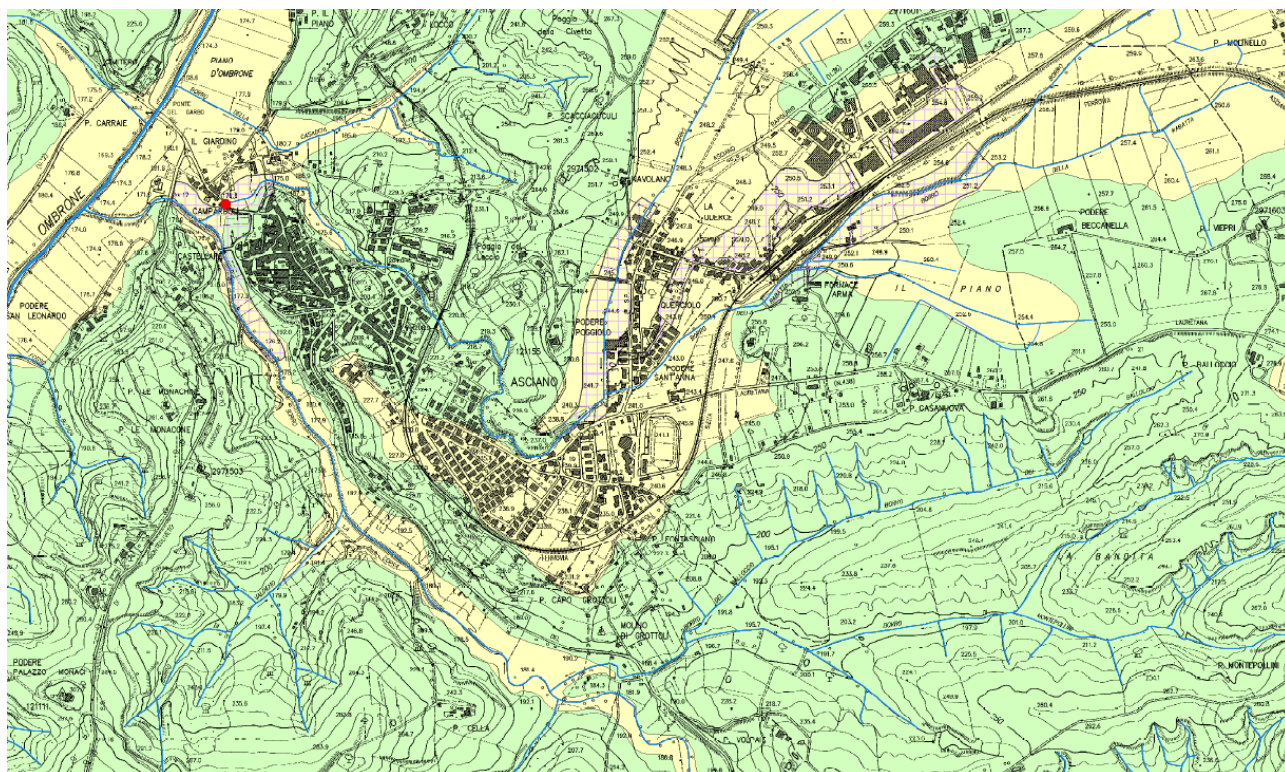
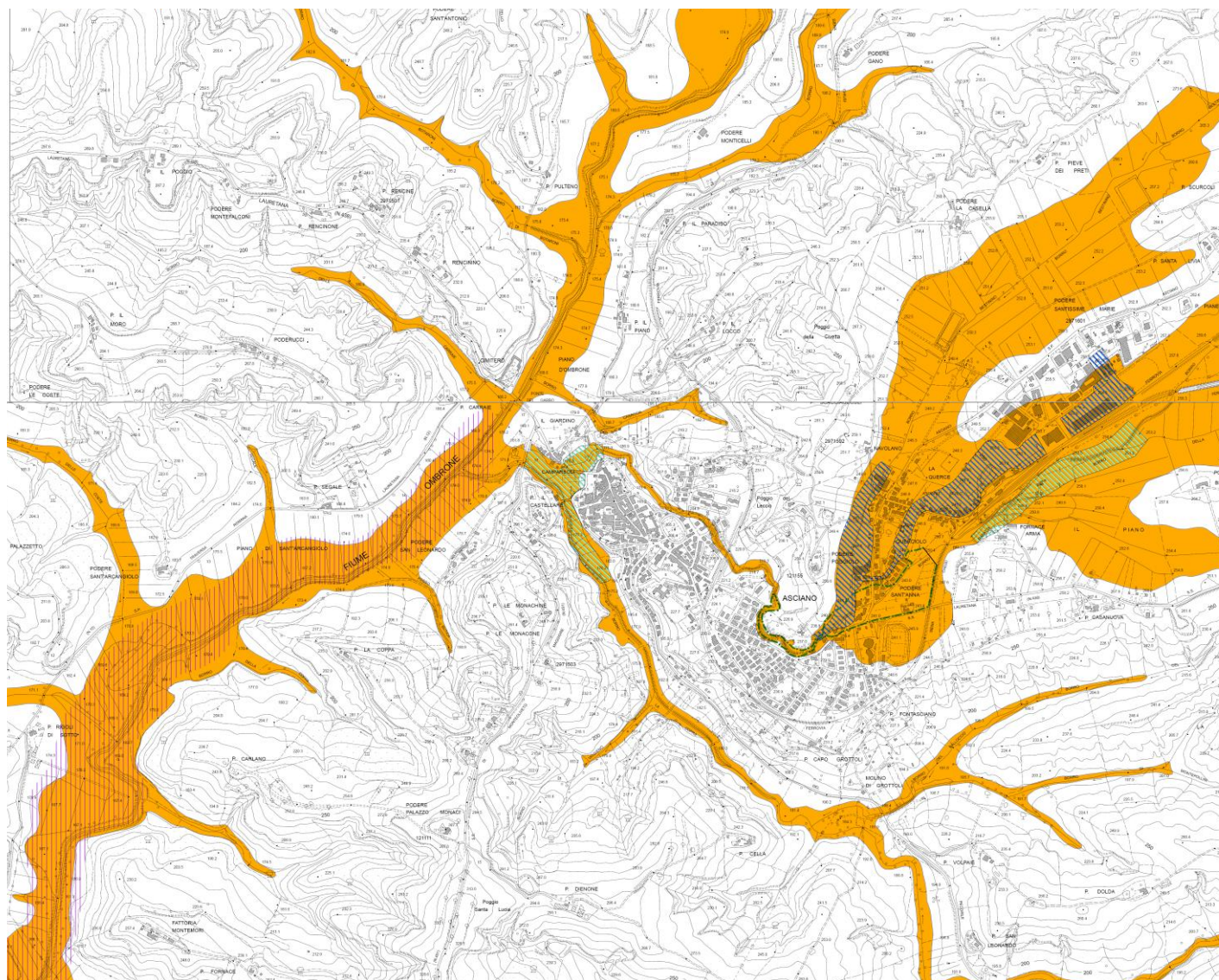


Figura 2- Estratto del PAI del Bacino Regionale del F. Ombrone








Figura 3 Legenda del PAI del Bacino Regionale del F. Ombrone

Nella tavola del Piano Strutturale del 2007 Comune di Asciano, “Caratteri fisici del territorio carta aree allagabili”, sono evidenziate come aree allagate per l’evento del 2004 le aree del Borro della Bestina, alla confluenza del Borro Copra e nei pressi di Asciano Scalo. Sono inoltre evidenziate le aree esondabili del Fiume Ombrone nei pressi della confluenza con il Borro della Copra come riportate nella carta della Regione Toscana sulle aree inondabili redatta nel 1995 mediante l’utilizzo di foto aeree.



Legenda

Notizie storiche




-  Aree allagate nel corso degli eventi alluvionali del 2004 (Fonte: PAI Ombrone)
-  Allagamenti e ristagni legati agli eventi alluvionali del 2004, causati da problemi alla rete fognaria successivamente risolti con lavori di manutenzione e potenziamento. (Fonte: PAI Ombrone e Amministrazione Comunale)
-  Aree inondabili soggette a ricorrenti e significativi fenomeni di esondazione e ristagno (Fonte: Carta delle aree inondabili della Regione Toscana, ed. 1995)
-  Aree inondate nel corso degli eventi alluvionali degli anni 1991, 1992 e 1993 (Fonte: Carta delle aree inondabili della Regione Toscana, ed. 1995)
-  Aree inondabili soggette a fenomeni di esondazione eccezionali (Fonte: Carta delle aree inondabili della Regione Toscana, ed. 1995)

Zone morfologicamente sfavorevoli


-  Ambito di fondovalle

Verifiche idrauliche

T. Arbia

-  Aree interessate da allagamenti per eventi con $Tr = 30$ anni (Fonte: Amministrazione Provinciale di Siena)
-  Aree interessate da allagamenti per eventi con $Tr = 200$ anni (Fonte: Amministrazione Provinciale di Siena)
-  Aree interessate da allagamenti per eventi con $Tr = 500$ anni (Fonte: Amministrazione Provinciale di Siena)

T. Bienta

-  Aree interessate da allagamenti per eventi con $Tr = 200$ anni (Fonte: Studio idraulico allegato al "Progetto della nuova sede del Consorzio Agrario provinciale")

Fosso Bestina


-  Aree interessate da allagamenti per eventi con $Tr = 200$ anni (Fonte: Studio idraulico allegato alla lottizzazione "Quercioni")

Figura 4 -- Estratto tavola QC02-g06 quadranti 2e 3 "Caratteri fisici del Territorio Carta aree allagabili" - Piano Strutturale Comune di Asciano

La modellazione idrologica per l'individuazione delle portate e degli idrogrammi di piena per tempi di ritorno di 30 e 200 anni è stata effettuata utilizzando il software HEC-HMS vers. 3.5.

Per determinare il coefficiente di deflusso è stato utilizzato il metodo del *Curve Number* (CN) sviluppato dal U.S. *Soil Conservation Service* (SCS); dall'analisi degli eventi meteorologici accaduti nel bacino idrografico del Fiume Ombrone, si è optato per la condizione di suolo mediamente saturo AMC II (e quindi CN II) secondo la trattazione esposta nel presente studio.

Son riportati come confronto i valori di piena individuati dallo Studio della Regionalizzazione delle Portate di Piena in Toscana (AITO), utilizzando l'applicativo AITo 2000 GIS per la generazione degli idrogrammi nelle aste secondarie, oltre ai dati del Quadro Conoscitivo del Bacino del F. Ombrone.

In sintesi lo studio idrologico risulta articolato nelle seguenti fasi:

- individuazione delle sezioni di chiusura dei bacini e dei parametri geomorfologici;
- individuazione degli idrogrammi di piena con l'applicativo AITo 2000 GIS (Regionalizzazione delle portate di piena della Regione Toscana) in corrispondenza delle principali sezioni di chiusura, da utilizzarsi per confronto con gli idrogrammi generati nel presente studio idrologico assieme ai dati disponibili dal Quadro Conoscitivo del Bacino F. Ombrone;
- ricostruzione degli idrogrammi di piena con il software HEC-HMS 3.5, per Tr 30 e 200 anni, mediante:
 - definizione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica e dello ietogramma di progetto;
 - applicazione del metodo CN del SCS (*Curve Number*) per la stima del coefficiente di deflusso, nella condizione di suolo mediamente saturo, con calibrazione dei parametri del modello di trasformazione afflussi/deflussi sulla base dell'evento del 21/10/2013;
 - generazione degli idrogrammi di piena utilizzando il metodo dell'idrogramma istantaneo unitario standard (IUH) che è funzione del solo tempo di ritardo secondo il metodo U.S. - S.C.S.

Parametri geomorfologici dei bacini idrografici

Per l'individuazione dei bacini e delle varie sezioni di chiusura sui tratti in studio si rimanda all'elaborato grafico allegato *TAV. 01 - Individuazione dei bacini idrografici*. I valori di quota media sul livello del mare (Hmed), pendenza media dei bacini (Id) e delle aste principali (Iv) sono stati ricavati in ambiente GIS utilizzando il modello digitale del terreno della Regione Toscana.

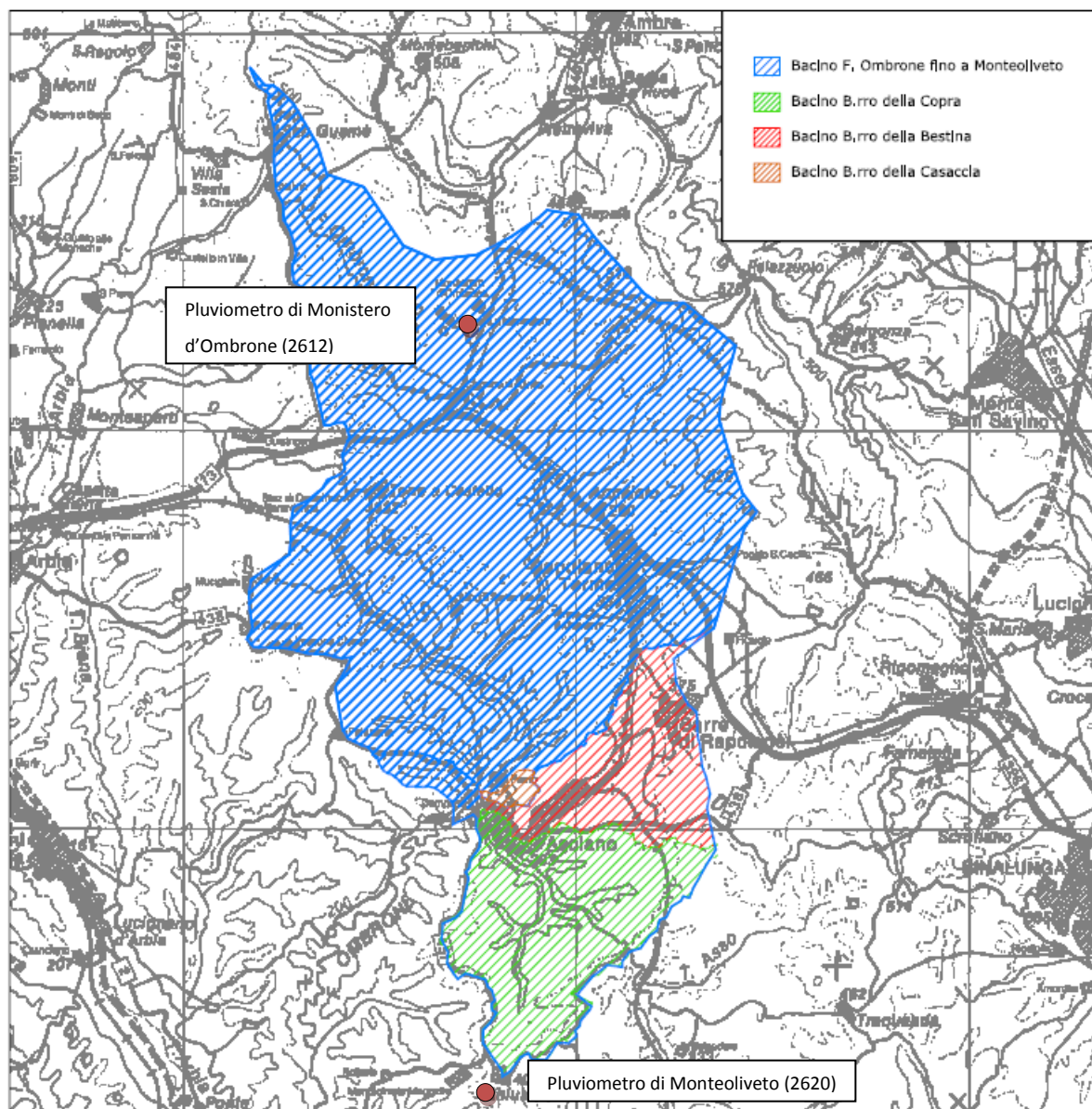


Figura 5 –Corografia con inquadramento dei bacini idrografici in studio (CTR 1:100.000)

Tabella 1 – Caratteristiche geomorfologiche dei vari bacini e sottobacini idrografici

Sezioni	Descrizione	Area	lunghezza	Hmax	Hmin	Hmed	Id	Iv
		[kmq]	[km]	[m slm]	[m slm]	[m slm]	[%]	[%]
SEZ A1	F. Ombrone a monte della Copra	133.96	24.92	565	163	298	11.4	1.6
SEZ A2	F. Ombrone a valle della Copra	172.50	24.96	565	162	290	10.5	1.6
SEZ B	Borro della Copra a monte Borro della Bestina	24.05	8.26	450	169	252	11.1	2.4
	Interbacino 1 – Borro della Copra (monte confluenza Fiume Ombrone)	0.11	0.30	216	162	183	8.0	17.8
SEZ C	Borro della Casaccia	0.74	1.75	275	164	220	11.5	6.3
	Interbacino 2 - Borro della Bestina (monte confluenza Borro della Copra)	0.65	0.62	264	169	218	7.3	15.3
	Interbacino 3 - Borro della Bestina (monte confluenza Borro del Bestinino)	1.13	1.71	287	237	255	1.9	2.9
SEZ D	Borro del Bestinino	2.24	3.22	289.6	237	259	2.4	1.6
SEZ E1	Borro della Bestina a monte Borro della Rabatta	7.62	5.03	453	250	308	5.7	3.1
SEZ E2	Borro della Rabatta	2.68	4.17	488	250	308	5.4	5.7

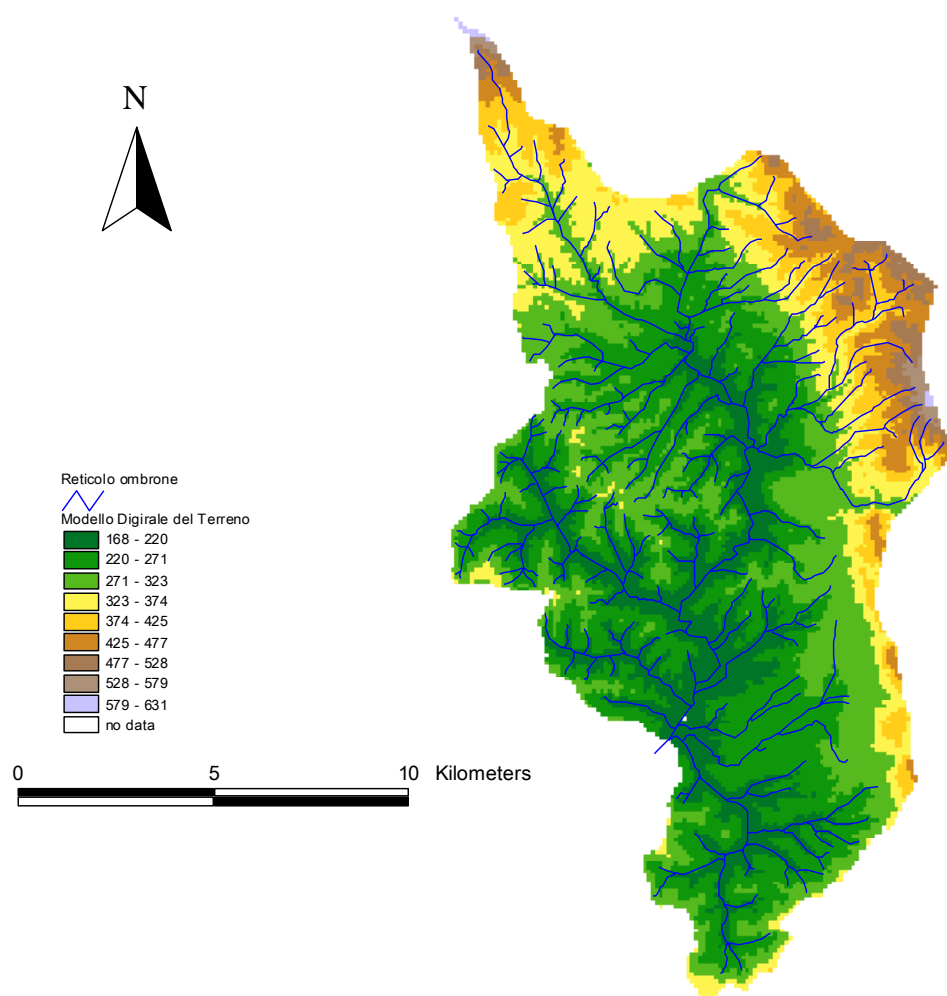


Figura 6 – DTM del bacino idrografico del Fiume Ombrone a valle della confluenza Borro della Copra (Raster 100x100)

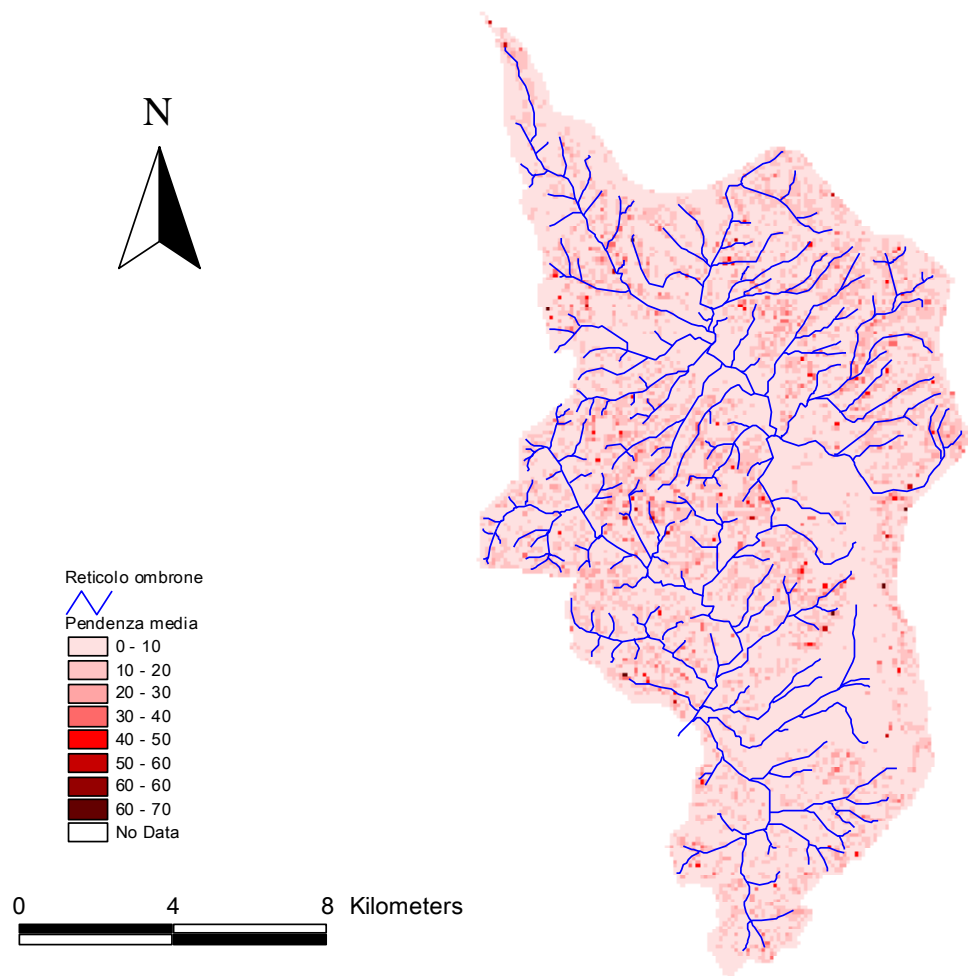


Figura 7 – Pendenze medie del bacino idrografico del Fiume Ombro a valle confluenza Borro della Copra (raster 100x100)

I dati dello studio di regionalizzazione delle piene in Toscana e il quadro conoscitivo del Bacino del F. Ombrone

L'applicativo ALTO, integrato in ambiente ESRI-ArcGIS, che ne costituisce l'interfaccia geografica, applica le procedure di cui alla "Regionalizzazione delle portate di piena in Toscana" [PIN, 1996 e s.m.i.], fondate sulle seguenti ipotesi metodologiche:

- modelli T.C.E.V. ed E.V.I. delle distribuzioni probabilistiche regionalizzate dei valori estremi di precipitazione (L.S.P.P. a 3 parametri);
- modello afflussi-deflussi lineare del tipo IUH (idrogramma di Nash);
- metodo dell'evento pluviometrico critico, cioè della determinazione della durata critica di pioggia che massimizza la portata la colmo per un assegnato tempo di ritorno;
- determinazione della pioggia efficace, ottenuta decurtando lo ietogramma della quota di perdite per assorbimento iniziale (I_a) e infiltrazione (K_s).

Si riportano di seguito le elaborazioni effettuate con l'applicativo sviluppato dalla Regione Toscana ALTO 2000 GIS di ESRI, nella sezioni principali di chiusura dei bacini in studio.

Nel caso del Borro Bestinino non è stato possibile ricavare il valore di portata, perché nella cartografia CTR 25.000 il bacino del Borro Bestinino è di ordine 1 e quindi non è possibile ricavare i parametri di Horton.

Tabella 2 - parametri dei bacini (input ALTO 2000 GIS)

ID	NOME	Area [kmq]	I_a	K_s	N	$K [h]$	a_1	n_1	m_1	a	n	m
7120	OMBRONE a monte Copra	137.68	11.977	1.44	2.288	1.227	23.568	0.398	0.18	26.307	0.238	0.181
7232	OMBRONE a valle Copra	170.96	10.94	1.314	2.434	1.169	23.475	0.388	0.18	25.49	0.243	0.186
7127	COPRA	35.552	5.696	0.74	2.272	0.773	23.081	0.345	0.18	22.034	0.264	0.206
7407	COPRA	25.344	6.05	0.274	2.173	0.729	23.078	0.345	0.18	22.009	0.264	0.206
7330	BESTINA	10.56	4.774	1.875	2.941	0.555	23.087	0.346	0.18	22.096	0.264	0.205
7168	BESTINA	6.336	5.744	1.701	2.887	0.387	23.093	0.347	0.18	22.151	0.263	0.205
7092	RABATTA	1.936	3.3	0.705	3.635	0.176	23.078	0.345	0.18	22.009	0.264	0.206
7093	BESTINA	4.4	6.82	2.139	2.314	0.485	23.099	0.348	0.18	22.213	0.263	0.205
7038	CASACCIA	1.056	6.967	0.388	1.412	0.205	23.078	0.345	0.18	22.009	0.264	0.206

La verifica mediante cartografia dei bacini idrografici dei corsi d'acqua minori ha riscontrato dei valori di area sensibilmente superiori a quelli utilizzati nello studio di Regionalizzazione delle Portate di Piena in Toscana.

Si riportano di seguito le tabelle di sintesi e gli idrogrammi di piena ricostruiti nella sezione di chiusura individuata.

Tabella 3 - risultati dell'applicazione del modello di regionalizzazione dei bacini in studio (output AITo 2000 GIS)

ID	NOME	Tr	Durata [h]	Forma leto	Picco leto	Afflusso [mm]	Intensità [mm]	Fa	Fb	Fc	Kr	Prec	Inf tot [mm]	Defl tot [mm]	Qvalle [mc/s]
7120	OMBRONE a monte della Copra	30	3.808	1	0.40	66.933	17.576	0.036	0.25	0.01	0.801	53.605	16.374	39.685	340.06
		200	3.568	1	0.40	92.905	26.038	0.036	0.25	0.01	0.797	74.006	16.099	60.361	516.64
7232	OMBRONE a valle della Copra	30	3.850	1	0.40	66.59	17.30	0.036	0.25	0.01	0.769	51.50	15.03	38.82	410.81
		200	3.610	1	0.40	93.29	25.84	0.036	0.25	0.01	0.773	71.72	14.78	59.29	627.14
7127	COPRA	30	1.932	1	0.40	52.83	27.34	0.036	0.25	0.01	0.883	46.62	6.97	40.52	147.85
		200	2.412	1	0.40	81.16	33.65	0.036	0.25	0.01	0.889	72.12	7.27	65.719	219.09
7407	COPRA	30	1.743	1	0.40	51.35	29.47	0.036	0.25	0.01	0.91	46.72	6.47	41.11	117.6
		200	2.223	1	0.40	78.89	35.49	0.036	0.25	0.01	0.915	72.18	6.58	66.45	172.29
7330	BESTINA	30	1.795	1	0.40	51.78	28.84	0.036	0.25	0.01	0.96	49.72	7.75	42.52	52.01
		200	1.795	1	0.40	73.36	40.86	0.036	0.25	0.01	0.96	70.43	7.75	63.23	76.61
7168	BESTINA	30	1.229	1	0.40	45.75	37.22	0.036	0.25	0.01	0.973	44.54	7.7	37.38	40.29
		200	1.229	1	0.40	64.37	52.38	0.036	0.25	0.01	0.973	62.67	7.75	55.51	59.07
7092	RABATTA	30	0.704	1	0.40	37.70	53.58	0.036	0.25	0.01	0.991	37.35	3.76	33.85	20.06
		200	0.704	1	0.40	53.05	75.39	0.036	0.25	0.01	0.991	52.56	3.76	49.05	28.77
7093	BESTINA	30	1.480	1	0.40	48.77	33.08	0.036	0.25	0.01	0.98	47.90	9.84	38.71	26.23
		200	1.480	1	0.40	68.62	46.54	0.036	0.25	0.01	0.98	67.40	9.84	58.21	38.75
7038	CASACCIA	30	0.32	1	0.40	28.68	90.08	0.04	0.25	0.01	0.99	28.52	7.10	21.90	13.71
		200	0.32	1	0.40	40.36	126.75	0.04	0.25	0.01	0.99	40.12	7.10	33.50	20.48

Tabella 4 - legenda dei parametri utilizzati da AITo2000 GIS

Parametri del bacino	
ID	ID asta
Codice	Codice della D.C.R.T. 230/94
Nome	Denominazione del corso d'acqua;
Area	Area sottesa [kmq];
Ia	Perdita iniziale media sul bacino [mm];
Ks	Infiltrazione a saturazione media sul bacino [mm/ora];
N	parametro di forma dell'idrogramma di Nash;
K	parametro di scala dell'idrogramma di Nash [ore];
a1	parametro a1 della curva di possibilità pluviometrica per durate inferiori all'ora [mm/y ^m *h ⁿ];
n1	parametro n1 della curva di possibilità pluviometrica per durate inferiori all'ora;
m1	parametro m1 della curva di possibilità pluviometrica per durate inferiori all'ora;
a	parametro a della curva di possibilità pluviometrica per durate superiori all'ora [mm/y ^m *h ⁿ];
n	parametro n della curva di possibilità pluviometrica per durate superiori all'ora;
m	parametro m della curva di possibilità pluviometrica per durate superiori all'ora;
Risultati elaborazione	
ID	ID asta
Codice	Codice della D.C.R.T. 230/94;
Nome	Denominazione del corso d'acqua;
Tr[anni]	Tempo di ritorno;
Durata [h]	Durata evento;
Forma ieto	Intensità costante (0), ietogramma Chicago (1);
Picco ieto	Tempo di picco dello ietogramma tipo Chicago;
Afflusso [mm]	Afflusso meteorico;
Intensità [mm/h]	Intensità media dell'evento;
Fa	Parametro a della formula di ragguaglio areale;
Fb	Parametro b della formula di ragguaglio areale;
Fc	Parametro c della formula di ragguaglio areale;
Tipo calcolo Kr	Singola sezione (0), Globale (1), Fisso (2), Area fissa (3)
Area fissa [kmq]	Area fissa su cui calcolare il Kr
Kr	Valore del coefficiente di ragguaglio areale;
Prec	precipitazione
Vol. lib.	volume libero nel suolo [mm]
Inf.tot.[mm]	Quantità di acqua che si infila nel suolo;
Defl.tot. [mm]	Deflusso, Afflusso ridotto meno Infiltrazione;
Q [mc/s]	Portata al colmo;
Max vol. [mc]	Massimo volume invasato nell'opera di laminazione [mc];
Max liv. [m]	Massimo livello nell'opera di laminazione [m];
Q valle [mc/s]	Portata al colmo a valle dall'opera di laminazione [mc/s].

Utilizzando le sezioni calcolate di AITO (presenti nella versione iniziale del progetto di Regionalizzazione delle portate di Piena noto come R19) del Fiume Ombrone fino a Buonconvento, riportate nella figura seguente, nelle sezioni 7120 e 6794 rispettivamente a valle e monte della confluenza con il Borro della Copra sono riscontrabili delle incongruenze sui valori di portata che riportano delle portate al colmo maggiori di quelle delle sezioni a valle (vedi sezioni 12936 e 13465 del F. Ombrone rispettivamente a monte e a valle del T. Vespero prima della confluenza con il T. Arbia).

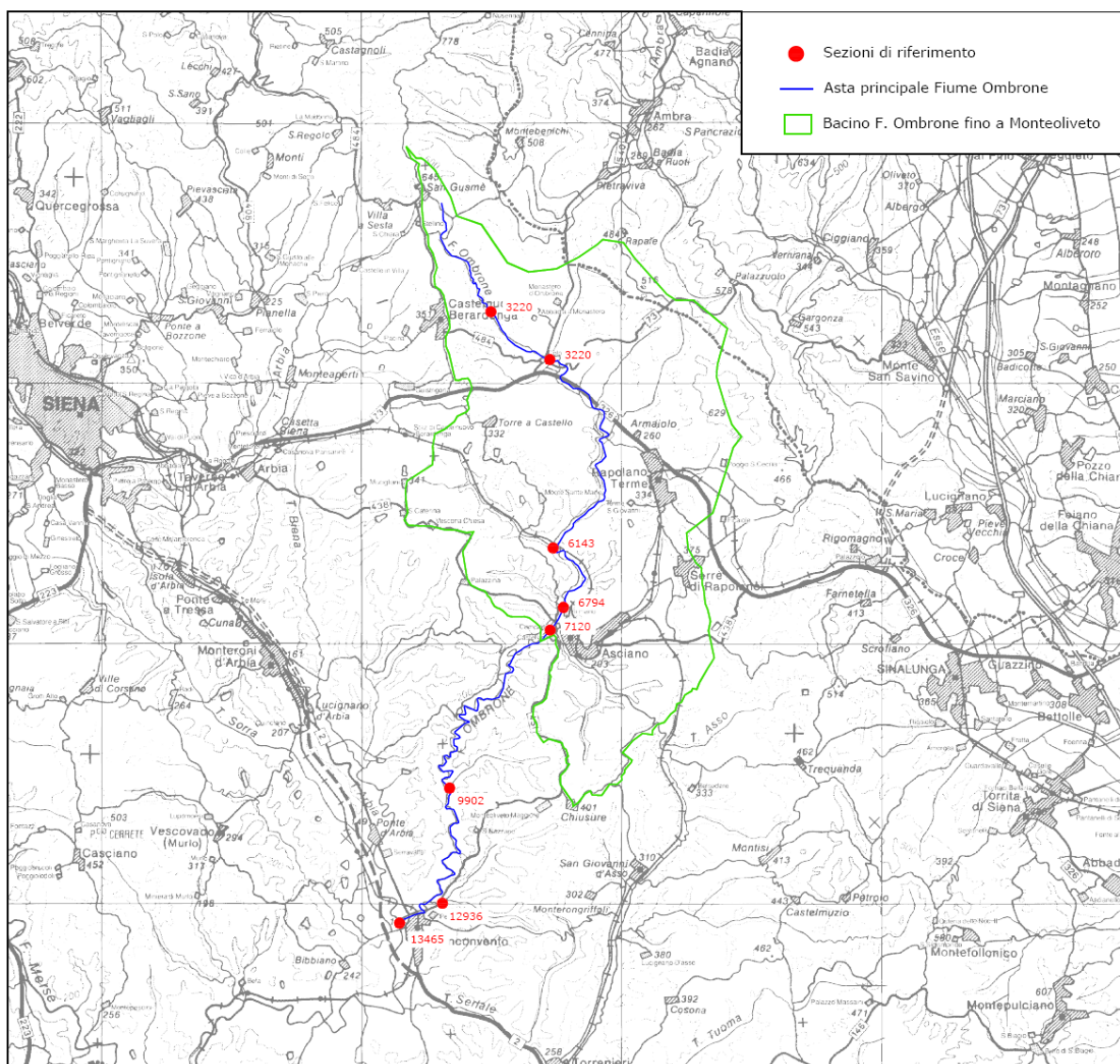


Figura 8 – Inquadramento sezioni

Tabella 5 - valori di portata al colmo da studio di regionalizzazione

Codice Sezione Alto2000	Descrizione	Area bacino sotteso [km ²]	Q30 [mc/s]	Qu30 [mc/s*km]	Q200 [mc/s]	Qu200 [mc/s*km]
2541	Ombrone monte Valle Buia	10.0	56.9	5.69	87.5	8.75
3220	Ombrone monte Coggia	17.1	78.5	4.59	121.5	7.11
6143	Ombrone a monte Camerone	98.0	229.3	2.34	353.6	3.61
6794	Ombrone a monte Gano	123.2	290.3	2.36	439.0	3.56
7120	Ombrone a monte Copra	137.7	338.2	2.46	513.5	3.73
9902	Ombrone a monte Segalino	194.5	335.5	1.72	516.1	2.65
12936	Ombrone a monte del Vespero	211.2	312.8	1.48	483.5	2.29
13465	Ombrone a monte dell'Arbia	232.2	329.5	1.42	512.5	2.21

Dall'esame dei valori di portata al colmo nella tabella precedente è possibile riscontrare che procedendo da monte verso valle, in corrispondenza delle sezioni 6794, 7120 e 9902 le portate di piena totali e unitarie in riferimento alle sezioni precedenti (6143) e successive (12936) dapprima crescono per poi decrescere fino a monte della confluenza con il T. Arbia a Buonconvento; in questo tratto non si ritengono attendibili i risultati dello Studio di Regionalizzazione (AITO).

D'altronde per l'Ombrore a Buonconvento è possibile confrontare i valori di portata al colmo dello studio di regionalizzazione con quelli del quadro conoscitivo del Bacino del F. Ombrore, costituiti da:

1. Studio "Analisi della pericolosità idraulica del T. Arbia dalla confluenza con il T. Massellone a Buonconvento e del F. Ombrore intorno alla confluenza con il T. Arbia" (Studio IIDEA T. Arbia), assunto come aggiornamento del quadro conoscitivo del PAI dal Comitato Tecnico in data 27 Ottobre 2005;
2. Studio "Verifica idrologica e idraulica del bacino del Fiume Ombrore e ricostruzione degli eventi del 29.10.2004 e 04.12.2004" redatto dal Prof. Enio Paris per conto della Regione Toscana, approvato come aggiornamento del Quadro Conoscitivo della seduta del 10/06/2009 del Comitato Tecnico di Bacino.

Si precisa che lo Studio Paris risulta coerente e conferma i risultati dello studio "Analisi della pericolosità idraulica del T. Arbia dalla confluenza con il T. Massellone a Buonconvento e del F. Ombrore intorno alla confluenza con il T. Arbia" (Studio IIDEA T. Arbia), che deve continuare ad essere preso come riferimento in quanto eseguito ad un livello di maggiore dettaglio.

Per i suddetti studi, si riportano come confronto le portate di piena al colmo per Tr 30 e 200 anni del F. Ombrore a monte della confluenza con il T. Arbia a Buonconvento (sez. 13465 AITO):

Tabella 6 – Confronto portate Fiume Ombrore a monte dell T. Arbia studi Alto, IldeA, Paris

Codice Sezione AITO	Q ₃₀ AITO [mc/s]	Q ₂₀₀ AITO [mc/s]	Q ₃₀ studio IldeA [mc/s]	Q ₂₀₀ studio IldeA [mc/s]	Q ₃₀ studio Paris [mc/s]	Q ₂₀₀ studio Paris [mc/s]
13465 ¹	330	513	300	457	214	365

Nella Tabella 1-2 – Portate di piena nelle sezioni significative della Relazione Integrativa (Maggio 2009) dello Studio Paris, della quale si riporta un estratto per Tr 30 e 200 anni, è possibile altresì confrontare i valori delle portate al colmo ricostruiti per il tratto del F. Ombrore a monte di Buonconvento comprensivo del Borro della Copra (vedi colonna "PIENE") con quelli calcolati con AITO:

Tabella 7 – Portate del fiume Ombrore - Studio Paris (Relazione Integrativa maggio 2009)

Corso d'acqua	CODICE AITO	AREA		Tr=30		Tr=200	
		ALTO	PIENE	ALTO	PIENE	ALTO	PIENE
Ombrore a monte Valle Buia	2541	10.0	8.3	57.0	15.7	85.8	27.3
Ombrore a monte Coggia	3220	17.1	13.9	80.6	21.4	124.1	38.1
Ombrore a monte Camerone	6143	98.0	91.9	232.0	123.0	355.9	213.5

¹ sez. 15825.5 HEC studio IldeA.

Corso d'acqua	CODICE AITO	AREA		Tr=30		Tr=200	
		ALTO	PIENE	ALTO	PIENE	ALTO	PIENE
Ombrone a monte Gano	6794	123.2	113.1	292.4	137.0	440.4	235.6
Ombrone a monte Copra	7120	137.7	128.6	338.1	147.4	512.8	251.6
Copra	7127	35.6	38.1	147.9	71.4	219.2	124.5
Ombrone a monte Segalino	9902	194.5	186.9	336.0	206.3	516.4	350.7
Ombrone a monte Vespero	12936	211.2	205.0	314.2	207.4	484.8	353.5
Ombrone a monte Arbia	13465	232.2	223.1	330.8	213.8	513.9	364.8

Linee segnalatrici di probabilità pluviometrica

Applicativo ALTO 2000

Le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica, inerenti le piogge di progetto (afflussi), utilizzate nell'applicativo ALTO 2000 sono basate sull'analisi delle serie storiche disponibili (coefficienti LSPP aggiornati al 2007), secondo la forma:

$$h = a t^n T_r^m$$

con

h = altezza di precipitazione [mm]

t = durata [ore]

T_r = tempo di ritorno [anni]

Nel caso del Borro della Copra la sezione di riferimento è quella a monte della confluenza con il Fiume Ombrone (n.7127); nel caso del Fiume Ombrone la sezione di riferimento è quella a valle della confluenza del Borro della Copra (n.7232).

Tabella 8- parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica dell'applicativo ALTO2000

	Codice	$t > 1 \text{ ora}$			$t < 1 \text{ ora}$		
		a	n	m	a	n	m
ALTO	7127	24,462	0,307	0,223	28,747	0,499	0,18
ALTO	7232	23,972	0,300	0,209	28,747	0,499	0,178

Ufficio Idrografico e Maregrafico di Pisa e PIN - Centro Studi Ingegneria (2006)

Si riporta di seguito un estratto della pubblicazione, a cura della Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali e del SIMN (Servizio Idrografico e Maregrafico Nazionale), aggiornamento 2006 sulle Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica LSPP delle stazioni pluviometriche del Compartimento di Pisa:

Nell'ambito del lavoro di Regionalizzazione delle Portate di Piena promosso e finanziato dalla Regione Toscana (Dip. PTA) e svolto dal PIN - Centro Studi Ingegneria (UNIFI), sono state calcolate le LSPP per le stazioni di rilevamento con serie storiche almeno trentennali, mediamente di 30-50 anni. Successivamente tali serie storiche sono state integrate con i dati aggiornati al 2002. Tali LSPP si riferiscono principalmente a stazioni di monitoraggio di tipo meccanico².

Di seguito si riportano i parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica LSPP pubblicate nel suddetto studio, dei pluviometri influenti sui bacini idrografici del Borro delle Copra e del Fiume Ombrone (a monte della confluenza con il Borro della Copra), riportati anche in figura 5:

² Fonte: <http://www.sir.toscana.it/supports/download/lsp2006.pdf>

Tabella 9- parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica dell'applicativo ALTO2000

	Codice	t>1 ora			t< 1 ora		
		a	n	m	a	n	m
Monistero d'Ombrone	TOS10002612	26,823	0,243	0,168	23,602	0,409	0,184
Monteoliveto	TOS10002620	23,004	0,258	0,198	23,078	0,345	0,178

SIR - Servizio idrologico della regione Toscana

Si riporta di seguito la premessa alla sezione "LSPP stimate per le stazioni di monitoraggio automatiche (durata $d \geq 1$ ora)" a cura del Servizio Idrologico Regionale della Toscana³

Al fine di disporre di una stima dei valori di LSPP anche in corrispondenza delle stazioni di monitoraggio automatiche, dove le serie storiche di dati acquisiti sono di minor entità, è stata sviluppata internamente una metodologia di spazializzazione dei parametri eseguita tramite interpolazione geostatistica (Kriging ordinario) che, oltre a stimare il valore del parametro nei punti dove esso non è stato direttamente misurato (osservato), permette di controllare l'errore dell'interpolazione stessa. Nel dettaglio, sono state create in totale 6 superfici interpolate relative ai 3 parametri a, n ed m, delle quali 3 calcolate con i parametri delle piogge di durata inferiore all'ora e 3 determinate con parametri riferiti a piogge di durata maggiore di un'ora. Successivamente, per mezzo di operatori di analisi spaziale di Map Algebra, i valori dei vari parametri stimati tramite interpolazione sono stati assegnati alle stazioni automatiche dove, come detto in precedenza, la loro breve serie storica non ha permesso un calcolo diretto dei suddetti parametri.

Pur trattandosi quindi di LSPP non calcolate, ma stimate con coerenza, si è ritenuto opportuno considerare quelle influenti per il bacino idrografico di studio, e che avessero variazioni significative nell'ultimo decennio rispetto a quelle pubblicate.

Di seguito si riportano i parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica LSPP stimate, dei pluviometri influenti sui bacini idrografici del Borro delle Copra e del Fiume Ombrone (a monte della confluenza con il Borro della Copra), segnalando che la stazione pluviometrica di Monteoliveto non è più attiva, e che i parametri sono stati stimati solo per durate maggiori ad 1 ora:

Tabella 10- parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica dell'applicativo ALTO2000

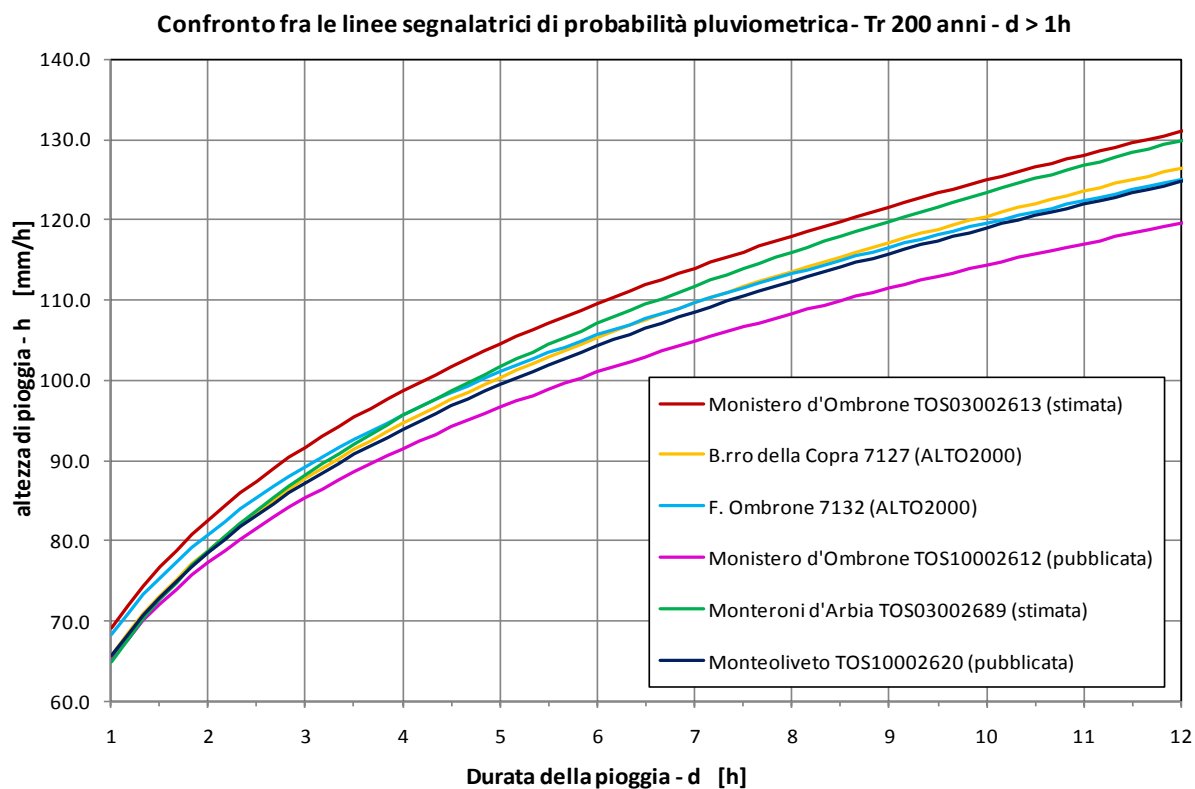
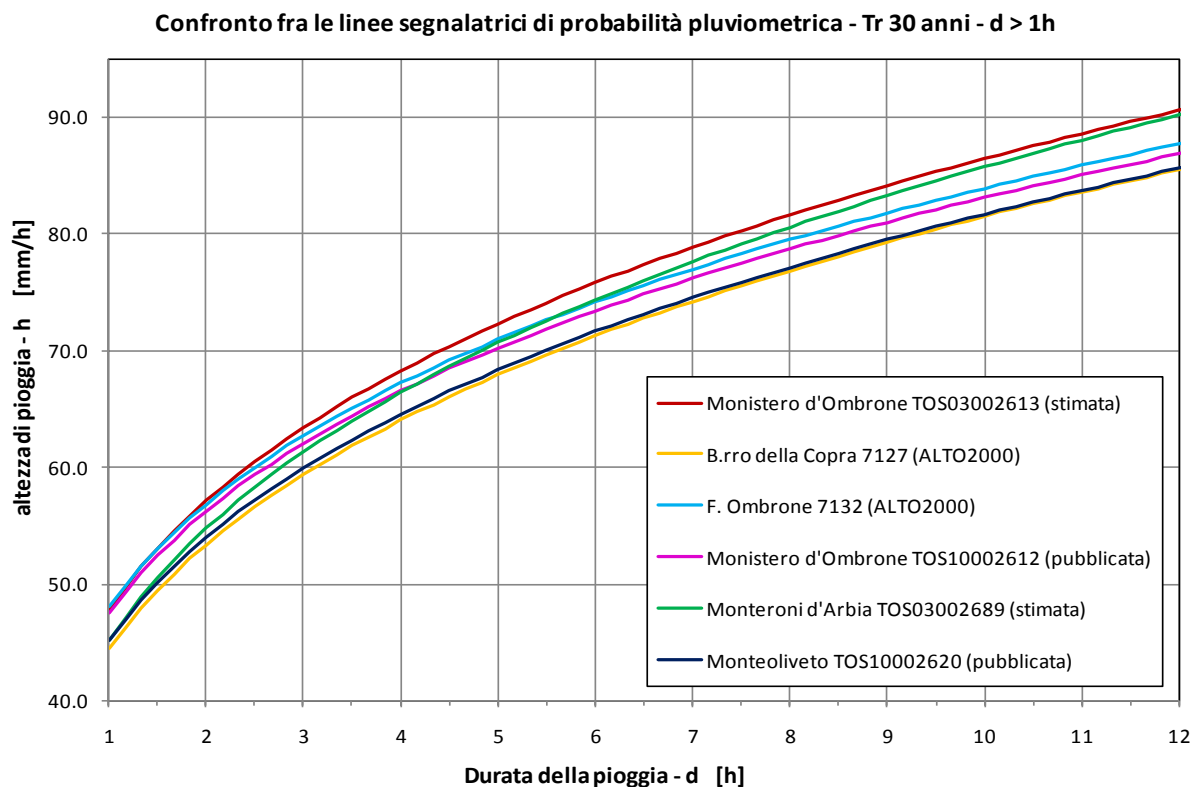
	Codice	t>1 ora		
		a	n	m
Monistero d'Ombrone	TOS03002613	24,698	0,258	0,194
Monteroni d'Arbia	TOS03002689	23,483	0,279	0,192

³ <http://www.sir.toscana.it/index.php?IDS=4&IDSS=19>

Confronto fra le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica

I grafici seguenti riportano il confronto tra le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica con tempi di ritorno pari a 30 e 200 anni:

Figure 9 – Confronto fra le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica - Tr 30 e 200 anni



Dal confronto di pagina precedente, si evidenzia come la Linea segnalatrice di probabilità pluviometrica della stazione automatica di Monistero d'Ombrone TOS03002613 restituisca valori di intensità di pioggia superiori a quelli delle altre, in particolar modo alle linee di ALTO2000.

Sebbene quindi di tipo stimato dal SIR della Toscana, e non calcolato e pubblicato, si ritiene più opportuno utilizzare la linea segnalatrice di probabilità pluviometrica della stazione di Monistero d'Ombrone TOS03002613, sia per il bacino idrografico del F. Ombrone a valle della confluenza con il Borro della Copra, che per quello del Borro della Copra stesso.

Descrizione del modello idrologico di HEC - HMS 3.5

Il programma HEC – HMS 3.5 dell’US Corps of Engineers è stato sviluppato per simulare i processi di trasformazione afflussi - deflussi (precipitazioni – runoff) di bacini di drenaggio naturali e/o artificiali.

L’applicativo consente la creazione di un modello afflussi – deflussi che è in grado di simulare gli idrogrammi di piena con assegnato tempo di ritorno, sulla base della definizione della pioggia di progetto e dalle caratteristiche idrogeomorfologiche del bacino, suddivisi in:

- modello meteorologico (*meteorological model*);
- modello del bacino (*basin model*).

Il *meteorological model* definisce l’evento pluviometrico di progetto (*rainfall simulation*).

L’evento pluviometrico assegnato, attraverso i punti della curva di probabilità pluviometrica prescelta, può essere inserito o utilizzando il metodo *frequency – based hypothetical storm* basato su una data frequenza di superamento con ietogramma di tipo “Chicago”⁴, o utilizzando il metodo dello *specified hyetograph* inserendo uno ietogramma di pioggia costante per tutta la durata dell’evento. Il primo risulta più cautelativo per corsi d’acqua con tempo di corrivazione minore dell’ora, fissando al valore di un’ora il tempo di durata dell’evento piovoso; il secondo risulta più adatto per i bacini più estesi, individuando la durata critica dell’evento che massimizza gli idrogrammi di progetto.

Date le dimensioni dei bacini che caratterizzano il presente studio è stato utilizzato il primo metodo per il Borro della Casaccia, ed il secondo per gli altri bacini più estesi.

Il *Basin model* contiene le caratteristiche del bacino e i metodi con i quali effettuare la simulazione dei meccanismi di deflusso (*runoff simulation*), in riferimento:

- al *calcolo dei volumi di runoff* (individuazione della pioggia netta che origina il deflusso), per il quale è stato scelto il metodo SCS Curve Number;
- alla *trasformazione dell’eccesso di precipitazione in deflusso* (generazione dell’idrogramma di piena), basandosi sul metodo dell’idrogramma unitario (IUH), per il quale è stato utilizzato l’idrogramma unitario del Soil Conservation Service (SCS UH Model)⁵.

⁴ Il metodo *Chicago* risulta più cautelativo per bacini con tempo di corrivazione minore dell’ora perché considera i picchi caratteristici degli scrosci di massima intensità che si verificano all’inizio dell’evento piovoso.

⁵ Trattandosi di piccoli corsi d’acqua a carattere torrentizio il deflusso di base (*baseflow*) è trascurato nella stima della portata di piena

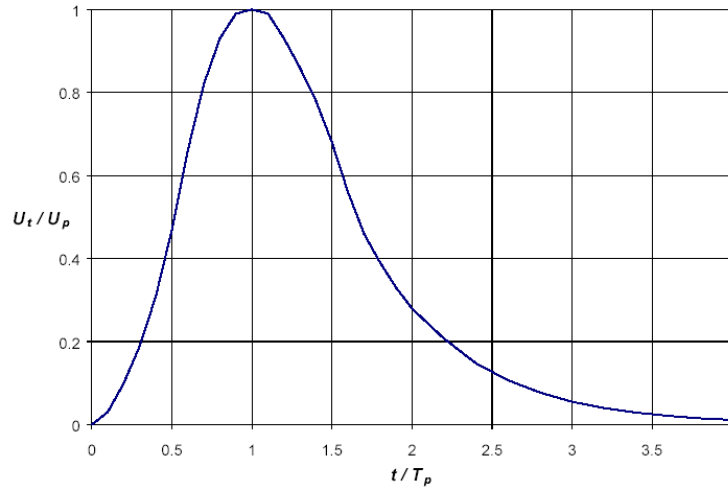


Figura 10 – SCS- esempio di IUH idrogramma istantaneo unitario

Il fattore di riduzione areale delle piogge si basa sulla formula di Moisello e Papiri (1986):

$$r = 1 - e^{\left(-2.472 A_b^{-0.242} d^{0.6} - e^{\left(-0.643 A_b^{0.235} \right)} \right)}$$

con:

- A_b Area del Bacino idrografico
- d Durata dell'evento

Sviluppo del modello dei bacini per il Fiume Ombrone e affluenti in studio

Il *basin model* è costituito dal Fiume Ombrone a monte della confluenza del Borro della Copra, dal Borro della Copra e dal Borro della Bestina con relativi affluenti (Borro Bestinino e Borro della Rabatta).

Per la simulazione idrologica sono state implementate le seguenti confluenze:

- Conf. E → Borro della Bestina e Borro della Rabatta
- Conf. D → Borro della Bestina e Borro del Bestinino
- Conf. B → Borro della Bestina e Borro della Copra
- Conf. A → Borro della Copra e Fiume Ombrone

Nel sistema idrologico, per modellizzare il trasferimento degli idrogrammi dalle confluenze E, D, B e A, è stato utilizzato il modello Cinematico; ai tratti di collegamento è assegnata la lunghezza (L), la pendenza media (I) e la scabrezza media (n) e la forma della sezione equivalente schematizzata di tipo trapezio (media larghezza media al fondo e pendenza delle sponde).

In funzione delle verifiche idrauliche, operando a favore di sicurezza, i contributi degli interbacini "1", "2" e "3" situati rispettivamente fra le confluenze A-B, B-D e D-E sono stati inseriti nelle confluenze di monte in modo da massimizzare le portate nei tratti di trasferimento.

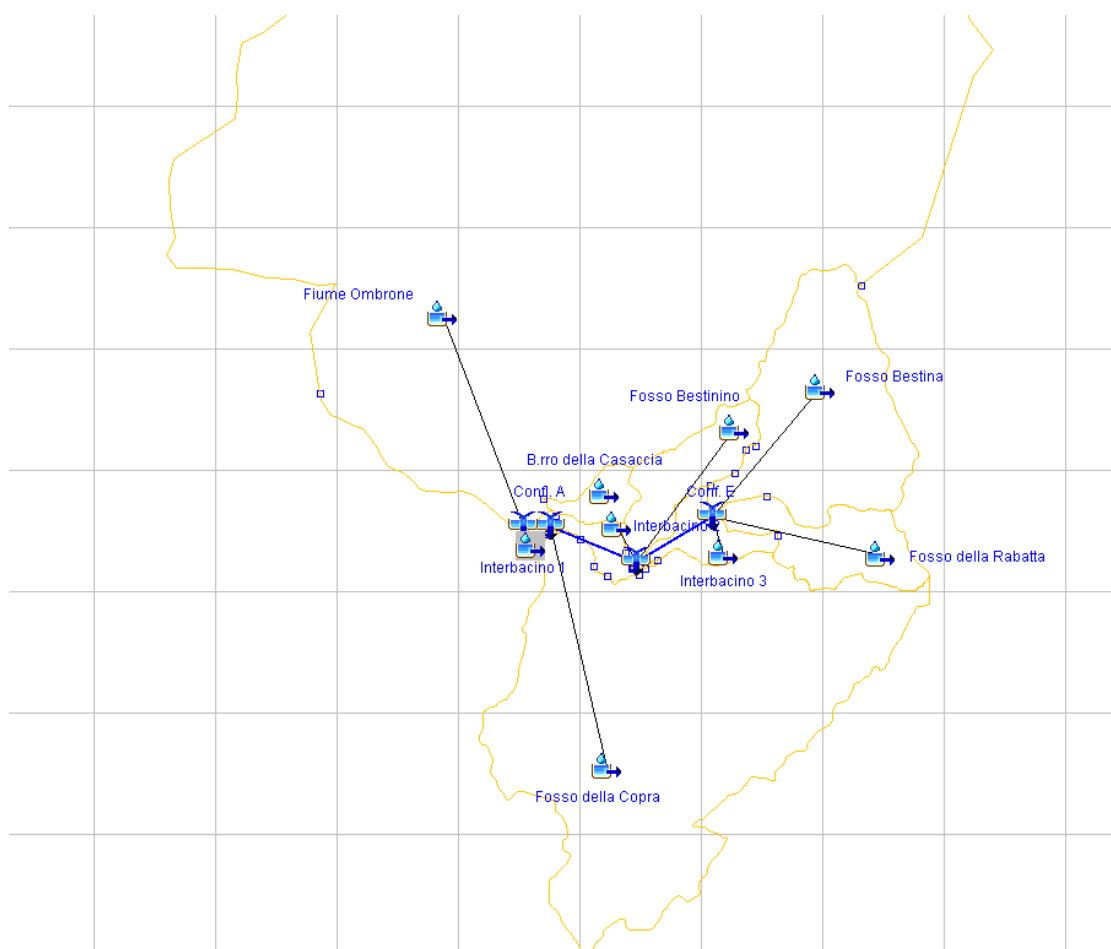


figura 11 – Basin Model del Fiume Ombrone e affluenti (Hec HMS 3.5)

Tabella 11 – legenda dei parametri del moto cinematico

	Tratto A-B	Tratto C-D	Tratto D-E
Lunghezza asta L [m]	440	2100	1500
Pendenza media fondo i [m/m]	0.014	0.032	0.008
Coefficiente di Manning n [s/m ^{1/3}]	0.05	0.05	0.05
Larghezza del fondo B [m]	5.5	4	2.5
Pendenza media delle sponde SS [m/m]	0.75	0.75	0.75

Ietogrammi delle piogge

Nelle figure seguenti si riportano a titolo esemplificativo e di confronto lo ietogramma di tipo “Chicago” (50% *discharge peak*) per durata della pioggia di progetto pari ad un'ora e lo ietogramma costante per durata della pioggia di progetto pari sei ore; in entrambi i casi il tempo di ritorno assunto risulta pari a 200 anni.

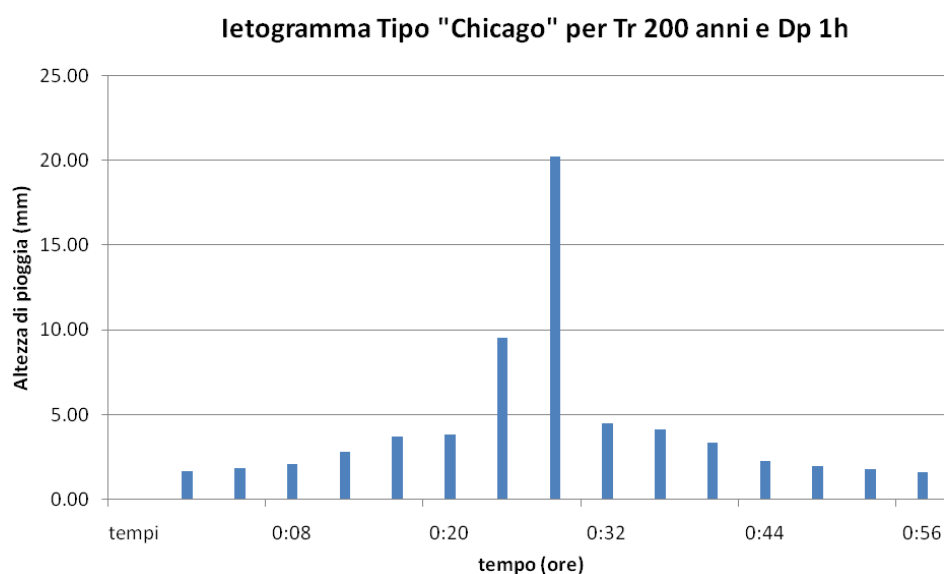


figura 12 – esempio di ietogramma di tipo Chicago

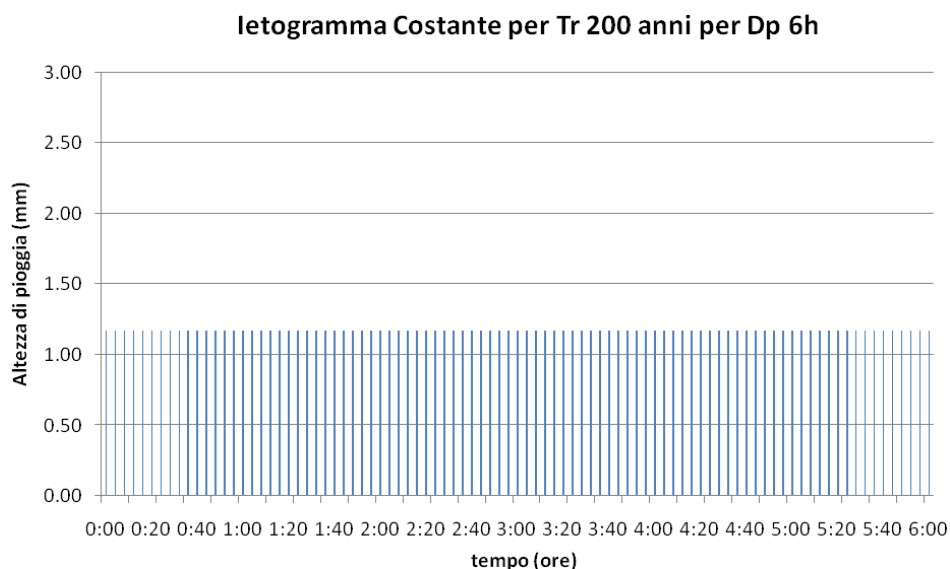


figura 13 – esempio di ietogramma di tipo costante nella durata dell'evento

Stima del coefficiente di deflusso - Metodo del Curve Number

Il coefficiente di deflusso è stato individuato utilizzando il metodo del Curve Number (CN), sviluppato dal *Soil Conservation Service* americano (SCS).

Tale metodo si colloca a metà strada fra i modelli basati sul calcolo delle perdite per infiltrazione in un punto, quindi coerentemente utilizzabili in approcci distribuiti e semidistribuiti, ed i modelli formulati in maniera da essere specificatamente utilizzati in approcci integrati, secondo la teoria esposta di seguito.

Il metodo CN si basa su una semplice equazione di bilancio fra i valori cumulati nel tempo, a partire dall'inizio dell'evento di precipitazione, della pioggia $P(t)$, del deflusso superficiale $Q(t)$, delle perdite iniziali $I_a(t)$ prima della produzione di deflusso e di quelle successive $I(t)$:

$$P(t) = I_a(t) + I(t) + Q(t)$$

esprese in termini di volume per un'unità di area, ovvero di un'altezza (mm).

L'ipotesi di base del metodo è che il rapporto fra il volume di deflusso ed il volume di pioggia depurato delle perdite iniziali rimanga, ad ogni istante, uguale al rapporto tra il volume delle perdite successive ed il volume massimo teorico delle perdite (a saturazione), indicato con il simbolo S :

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{I}{S}$$

Viene inoltre supposto che le perdite iniziali siano proporzionali alle perdite massime possibili S (a saturazione):

$$I_a = \beta S$$

con valori tipici di β compresi tra 0,1 e 0,3.

In caso di presenza di eventi meteorologici registrati, con la contemporanea perimetrazione delle aree allagate, è possibile calibrare i suddetti parametri del modello di trasformazione afflussi-deflussi. In particolar modo viene lasciato libero il parametro β , percentuale dell'infiltrazione che avviene inizialmente, sull'infiltrazione totale ipotizzata.

Il procedimento di calibrazione, con la descrizione dell'evento del 21 ottobre 2013, nonché il relativo , è illustrato nell'elaborato d.04.

Il parametro β viene quindi calibrato e assunto pari a 0.1.

Il nucleo fondamentale di tutto il metodo è costituito dal parametro S , che a sua volta viene espresso in funzione di un indice dimensionale CN, detto appunto *curve number*, che a sua volta viene tabulato in funzione del tipo di suolo, per tenere conto delle capacità di infiltrazione, e dell'uso del suolo, che influenzerà sia l'ammontare della quota delle perdite iniziali dovute a intercettazione che la capacità di infiltrazione stessa del suolo.

I valori CN hanno come limite inferiore 0 (superficie totalmente permeabile, con nessuna produzione di deflusso) e come limite superiore 100 (superficie totalmente impermeabile, con nessuna perdita e deflusso uguale alla precipitazione). Il termine *curve number* deriva dal fatto che a ciascun valore di CN corrisponde una diversa curva che rappresenta il rapporto tra i volumi di deflusso e di precipitazione (*coefficiente di deflusso cumulato*) in funzione del volume della precipitazione.

Definendo il coefficiente di deflusso come:

$$C = Q / P$$

Dove:

Q (mm) è il deflusso di piena

P (mm) è l'afflusso meteorico

Il coefficiente di afflusso viene fatto dipendere dall'afflusso meteorico P, secondo l'espressione:

$$C = \frac{(1 - 0.2 K)^2}{(1 + 0.8 K)}$$

dove

$$K = S / P$$

dipende dalla grandezza S (mm), definita *ritenzione potenziale* del bacino, che risulta funzione, attraverso "runoff curve number" (CN), della tessitura e dell'umidità iniziale del suolo, della sua copertura vegetale, ecc., secondo l'espressione:

$$S = 254 \left[\frac{100}{CN} - 1 \right]$$

I valori dell'indice CN sono tabulati in letteratura per differenti tipi di copertura del suolo, diverse caratteristiche del terreno e per condizioni medie di umidità iniziale del suolo (condizione II), secondo 4 gruppi principali di terreno⁶:

- *gruppo A*: terreni sabbiosi molto permeabili
- *gruppo B*: terreni franchi moderatamente permeabili, depositi sabbiosi superficiali;
- *gruppo C*: terreni franco – limosi poco permeabili: argille di medio impasto, ad elevato tenore di argilla;
- *gruppo D*: terreni argillosi quasi impermeabili.

Le condizioni di umidità iniziale del suolo risultano 3:

- *condizione I*: il terreno è secco pur senza raggiungere il punto di appassimento e le colture o la vegetazione sono ben sviluppate;
- *condizione II*: il terreno è mediamente umido;
- *condizione III*: il terreno è saturo di umidità a causa di intense precipitazioni con almeno 53 mm di altezza di pioggia nei 5 giorni precedenti l'evento considerato; nella stagione fredda si considera raggiunta la saturazione dopo 28 mm di pioggia in 5 giorni.

Le relazioni tra le condizioni medie CN II e la condizione I e III sono basate sulle seguenti relazioni semplificate:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.3 - 0.013 CN_{II}}$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.43 + 0.0057 CN_{II}}$$

Per la determinazione del CN2 dei bacini idrografici in studio sono stati utilizzati i dati provenienti dalla carta di uso del suolo⁷ e della carta di permeabilità del suolo di derivazione dalla Carta Geologica della Regione Toscana

⁶ Vedi Manuale di Ingegneria Civile, Ed.ni ESA C- Zanichelli, Vol. I - Sezione Idraulica – Idrologia Tecnica.

⁷ vedi *Corine Land Cover*

(in scala 1:10.000, che si riporta a corredo), per l'individuazione del gruppo del terreno previsto dal metodo (classi A, B, C, D).

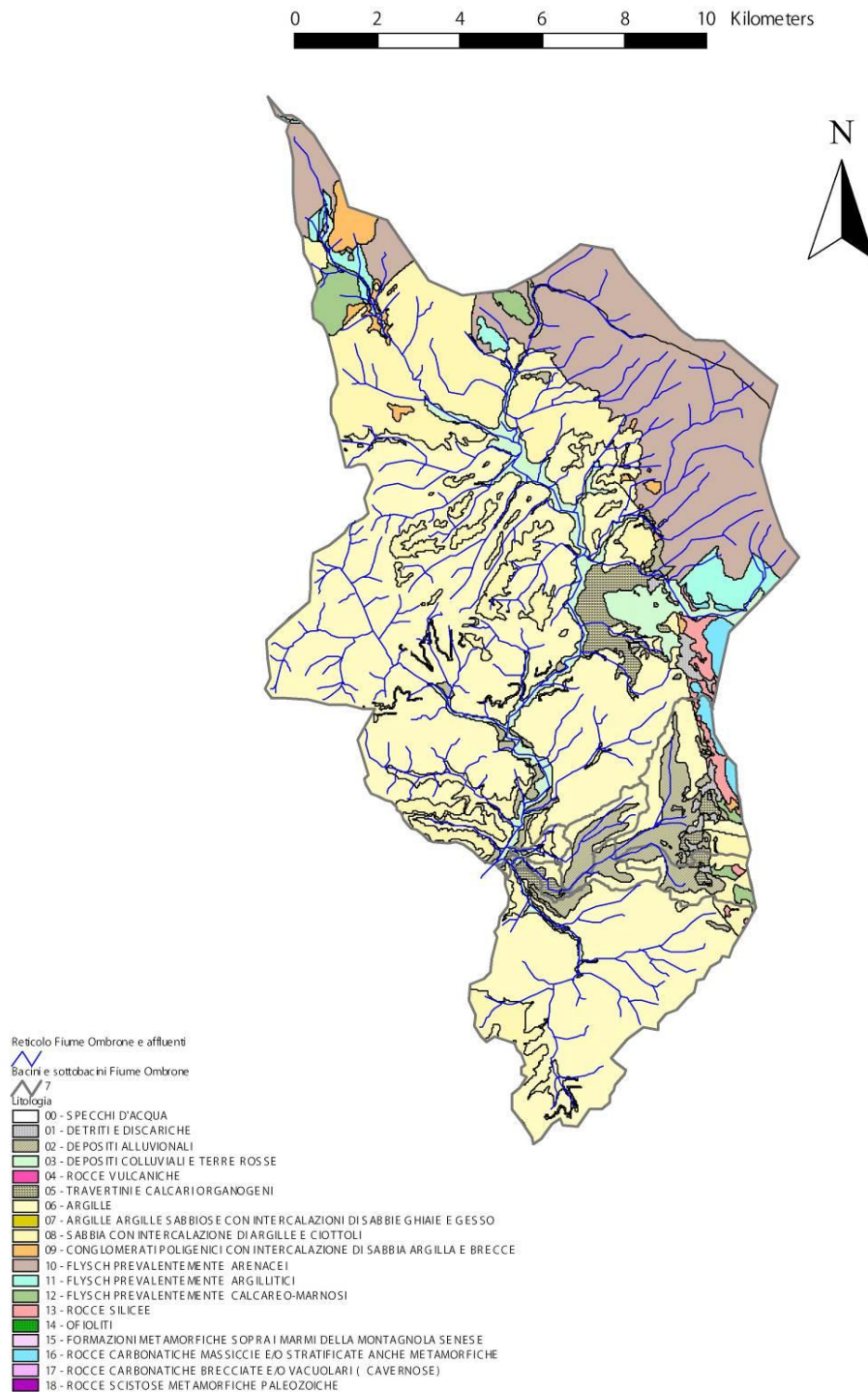


Figura 14 - litologia del bacino in studio

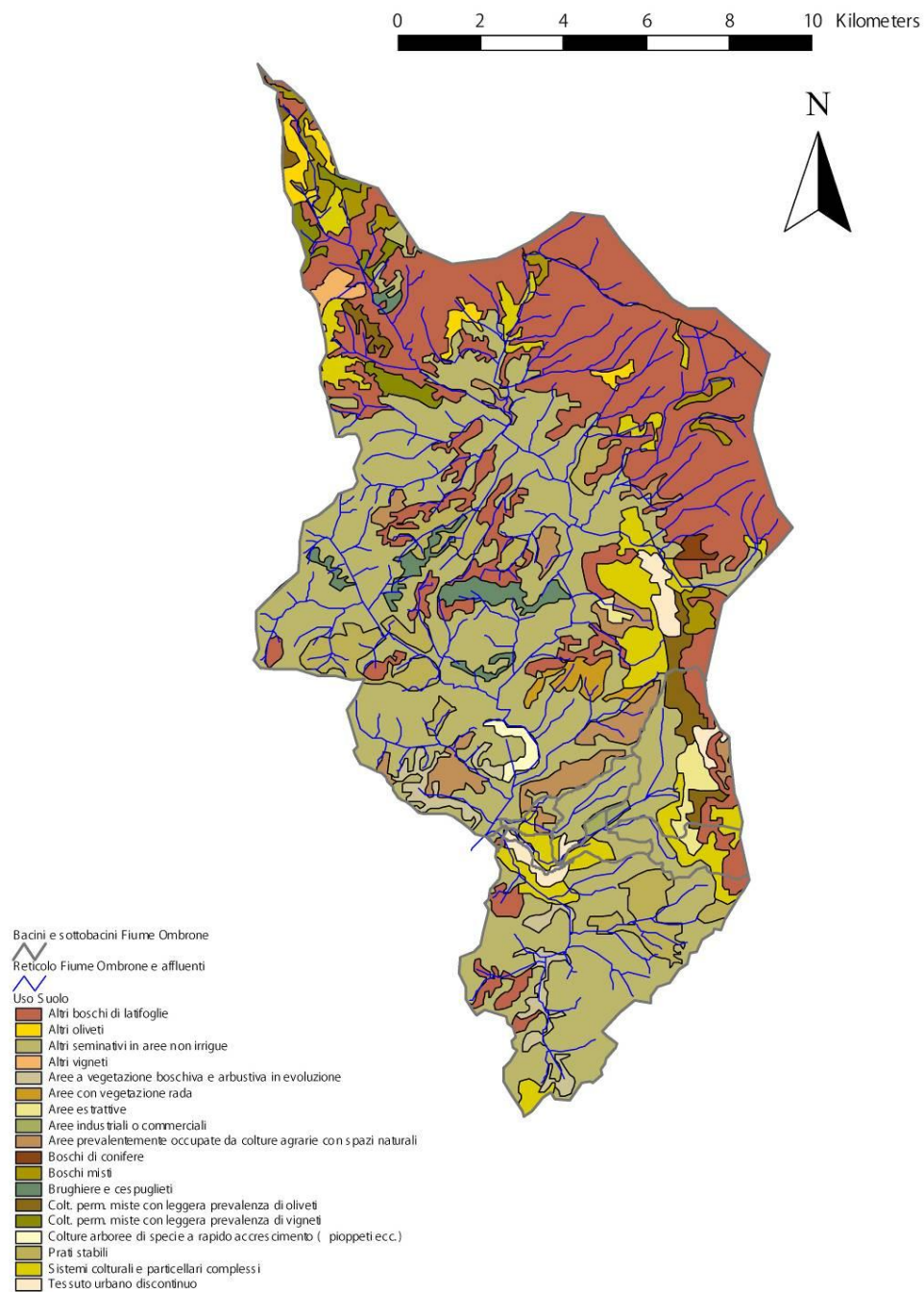


Figura 15 - uso del suolo del bacino in studio

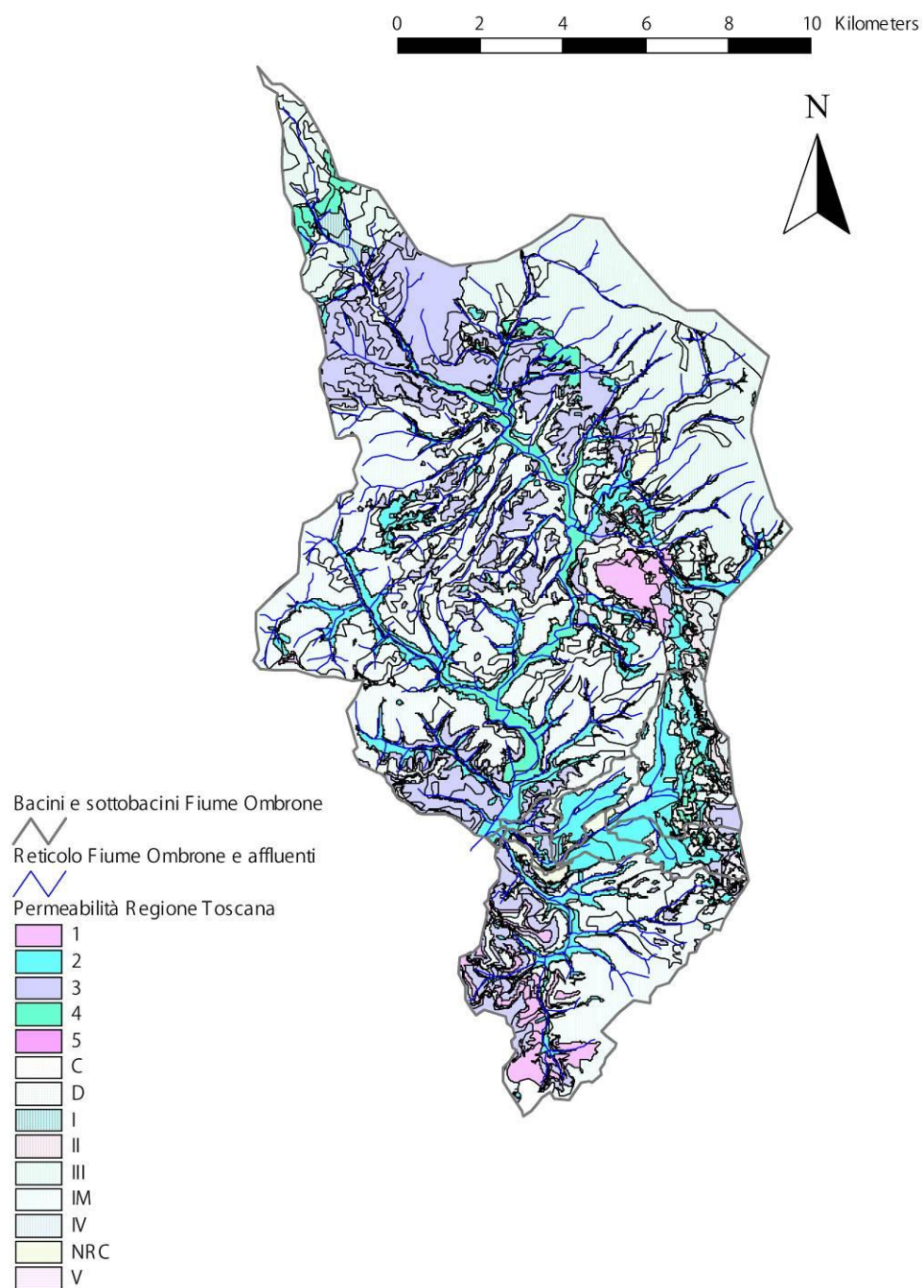


Figura 16 – permeabilità della Regione Toscana del Bacino in studio

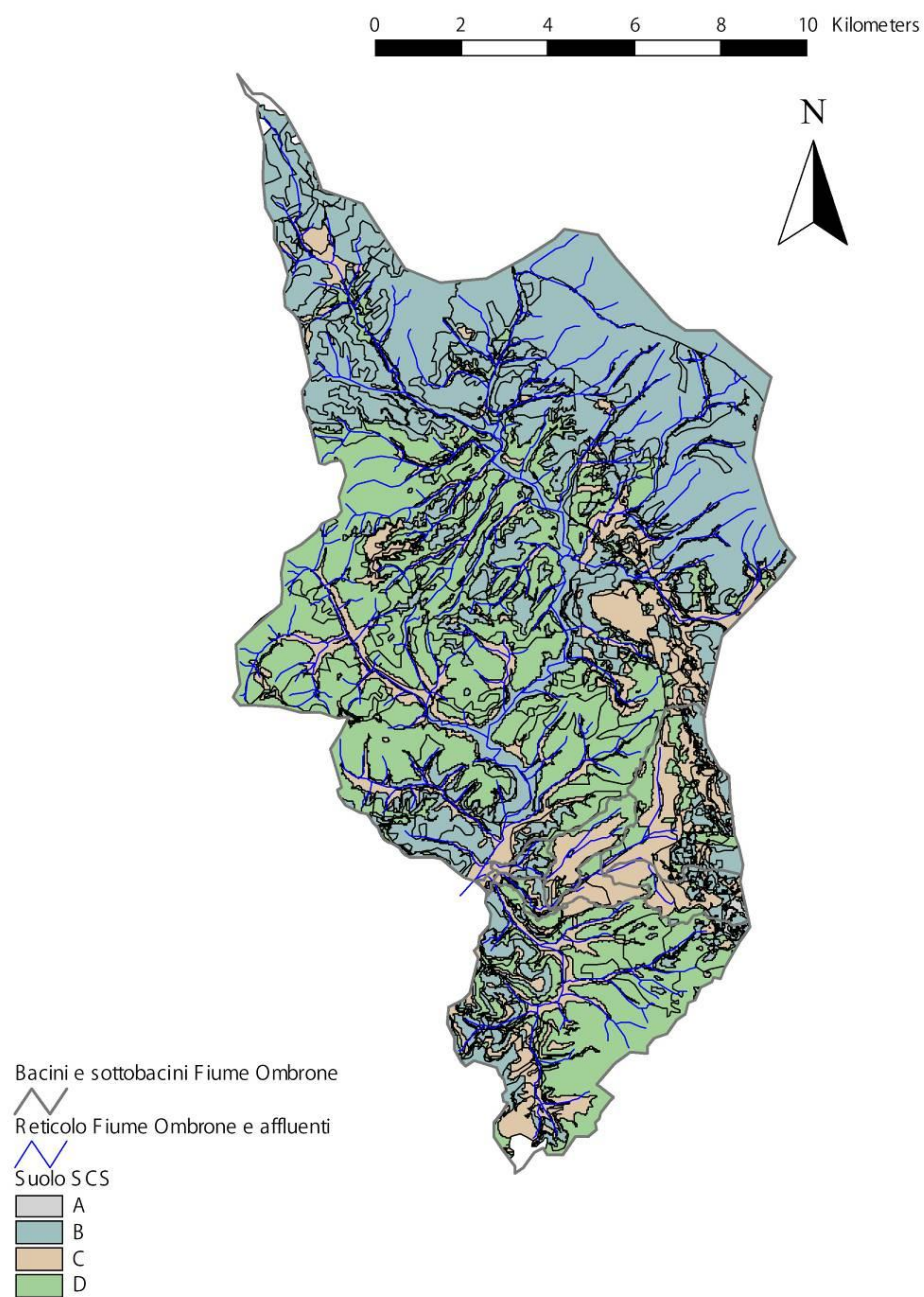


Figura 17 – Catalogazione suolo secondo SCS del bacino in studio

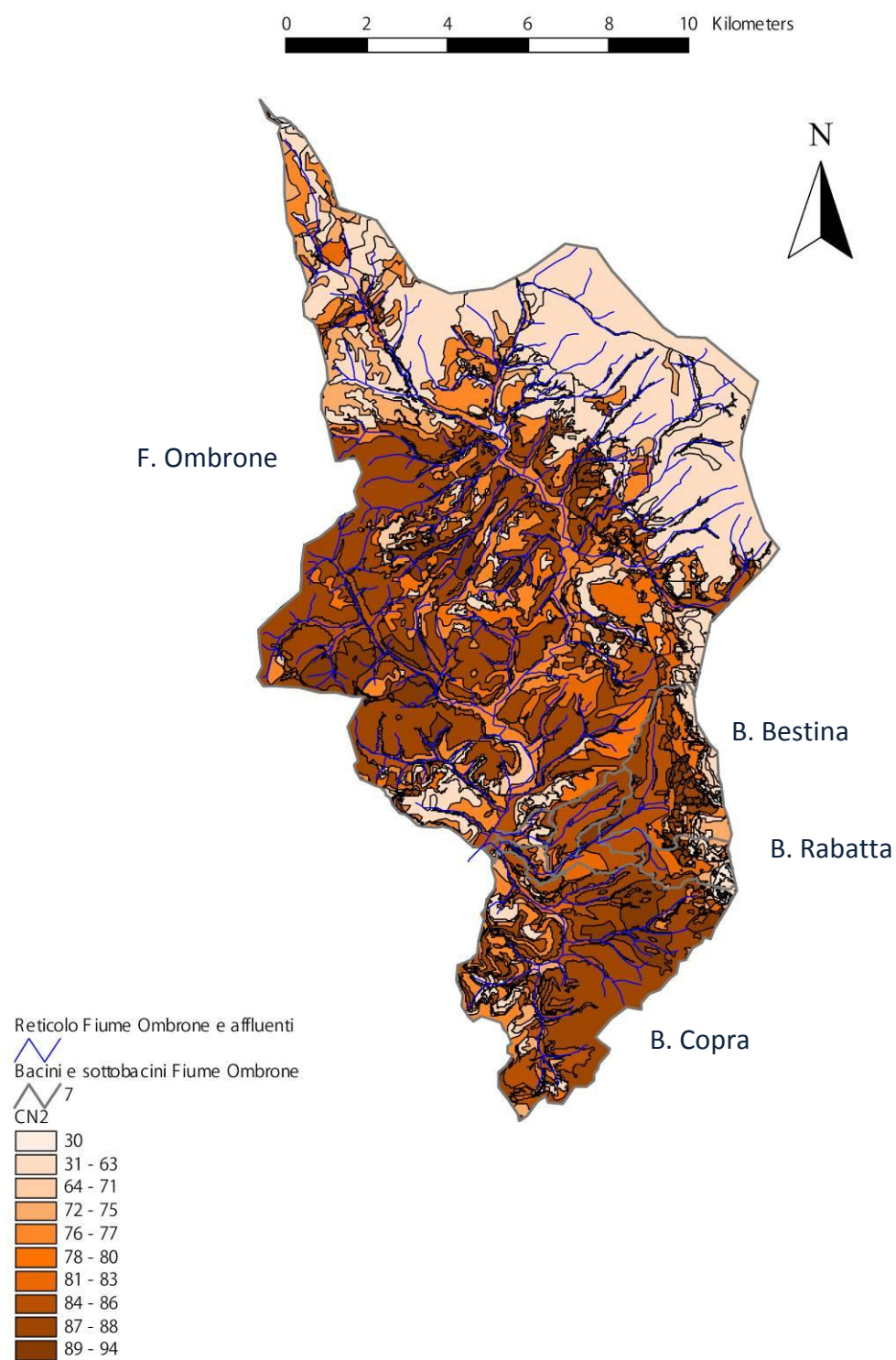


Figura 18 - CN2 del bacino in studio

Tabella 12 – Associazione permeabilità - tipologia dei suoli secondo la classificazione S.C.S. (Figura 13- Figura 14)

	Cod	Permeabilità	Classe di suolo S.C.S.
PERMEABILITA' PRIMARIA - PER POROSITA' -	5	Alta	A
	4	Medio-Alta	B
	3	Media	B
	2	Medio Bassa	C
	1	Da bassa a molto bassa	C
PERMEABILITA' SECONDARIA - PER FRATTURAZIONE E/O CARISMO	V	Alta	A
	IV	Medio-Alta	B
	III	Media	B
	II	Medio Bassa	C
	I	Da bassa a molto bassa	C
PERMEABILITA' MISTA	E	Alta	A
	D	Medio-Alta	B
	C	Media	B
	B	Medio Bassa	C
	A	Da bassa a molto bassa	C
	IM	Impermeabile	D
	NRC	Aree non rilevate o non classificate	D

In riferimento al bacino in studio si riportano nella tabella seguente i valori del *curve number* relativi alle condizioni di suolo secco, mediamente umido e saturo (CN1, CN2 e CN3).

Tabella 13 - Curve number dei bacini in studio

Bacino	Area [Km ²]	CN1	CN2	CN3
F. Ombrone a monte della Copra	133.96	51.18	71.18	85.17
F. Ombrone a valle della Copra	172.5	55.37	73.20	86.39
Borro della Copra a monte Borro della Bestina	24.05	66.27	81.88	91.31
Interbacino 1 – Borro della Copra	0.11	50.96	70.50	84.75
Borro della Casaccia	0.74	60.20	77.67	88.89
Borro della Bestina a monte Borro della Rabatta	7.62	54.67	73.55	86.57
Interbacino 2 - Borro della Bestina	0.65	59.55	77.21	88.73
Interbacino 3 - Borro della Bestina	1.13	62.34	79.23	89.85
Borro del Bestinino	2.24	64.07	80.46	90.51
Borro della Rabatta	2.68	50.36	70.10	84.43

Analisi delle precipitazioni massime giornaliere delle stazioni influenti sui corsi d'acqua in studio

Al fine di valutare la condizione di saturazione dei terreni dei bacini idrografici dei corsi d'acqua sono stati individuati con approccio unitario gli eventi pluviometrici di maggiore intensità verificatisi nel corso degli anni, utilizzando i dati delle stazioni pluviometriche con maggiori serie storiche che interessano la zona del bacino idrografico del fiume Ombrone fino a Buonconvento, utilizzando le serie storiche dei dati disponibili aggiornati fino all'anno 2012.

Nel grafico successivo sono riportate su base cartografica 1:100.000 le stazioni utilizzate e i bacini idrografici, suddividendo le aree di influenza di ogni singola stazione mediante l'applicazione del metodo dei topoieti (poligoni di Thiessen).

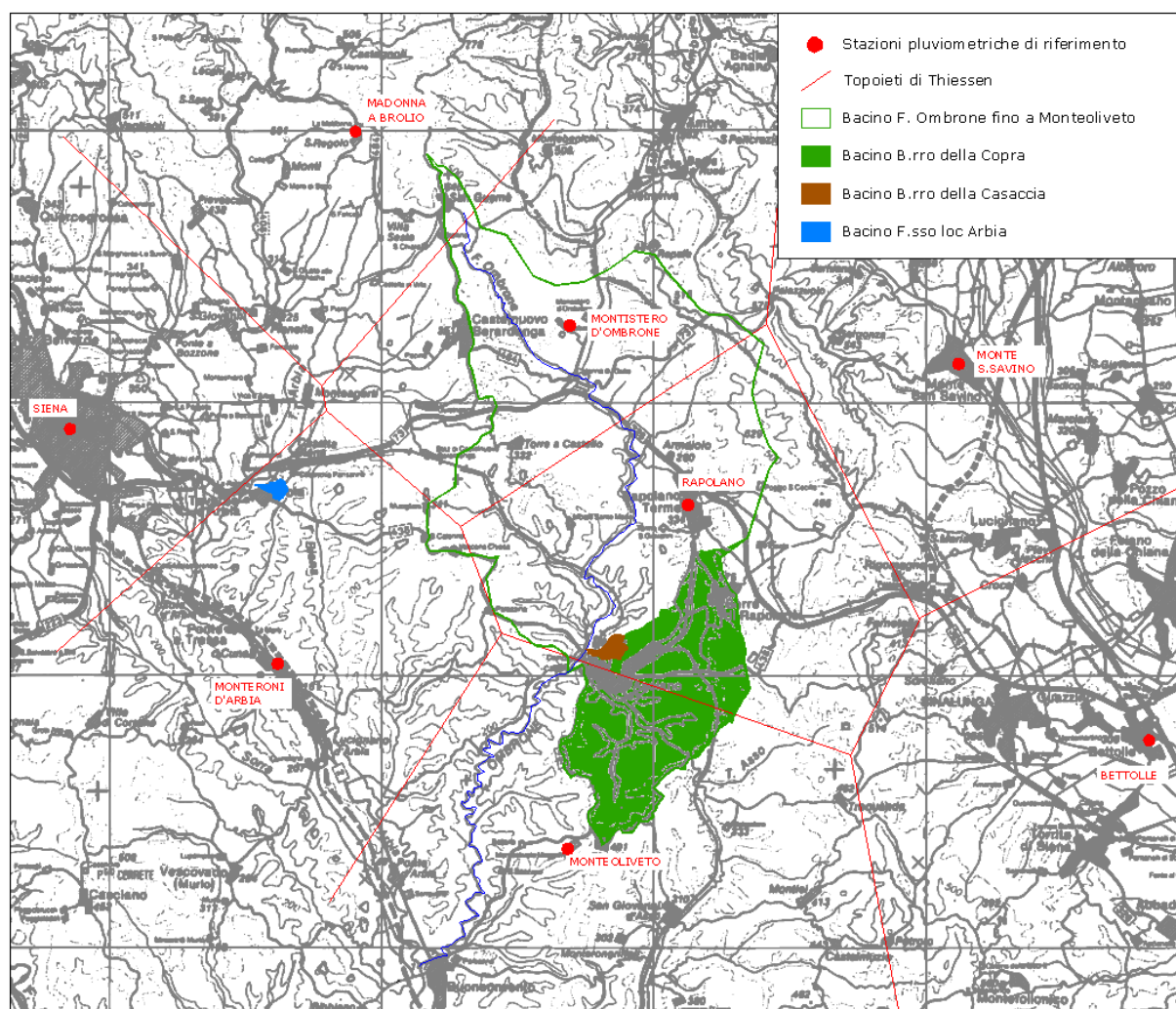


Figura 19 –stazioni pluviometriche di riferimento e individuazione dei topoieti di Thiessen

Tabella 14 – Stazioni pluviometriche per le analisi di precipitazioni massime

Stazione Pluviometrica	Codice	Coordinate Gauss-Boaga		Periodo di funzionamento	
		Nord	Est	Data Inizio	Data Fine
Madonna a Brolio	TOS10002634/42	4809820	1698827	1916	1972
Madonna a Brolio	TOS03002643	4809762	1703707	2002	2014
Monistero d'Ombrone	TOS10002612	4802620	1706797	1924	1966
Monistero d'Ombrone	TOS03002613	4800455	1707370	2002	2014
Monte San Savino	TOS01000740	4801951	1722245	1916	2002
Monte San Savino	TOS03000741	4801948	1722243	1991	2014
Siena Poggio al Vento	TOS10002660	4798818	1687463	1916	2003
Rapolano	TOS10002616	4796020	1711147	1934	1969
Monteroni d'Arbia	TOS03002690	4790200	1696092	1934	1997
Monteroni d'Arbia	TOS03002689	4792265	1696787	2002	2014
Bettolle	TOS10000720	4787390	1728082	1932	1993
Monteoliveto	TOS10002620	4783405	1706722	1934	2004

E' stata effettuata una valutazione della condizione di saturazione del terreno per gli eventi pluviometrici di maggiore intensità, verificatisi nell'area circoscritta dai topoi, al fine di individuare la pioggia efficace a partire dall'infiltrazione.

Tale condizione, chiamata anche Classe AMC (*Antecedent Moisture Condition*), è funzione del valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei 5 giorni precedenti l'evento meteorico (API_5), secondo la metodologia sviluppata dall'US SCS.

Le 3 classi della condizione di saturazione del terreno sono descritte di seguito:

1. AMC I → condizione di terreno asciutto;
2. AMC II → condizione di terreno mediamente saturo;
3. AMC III → condizione di terreno saturo.

L'attribuzione della Classe AMC, viene effettuata mediante la tabella seguente, a partire dall' API_5 e dalla presenza o meno di vegetazione in fase di crescita (vedi periodo 1 aprile – 15 ottobre):

Tabella 15 – Tabella classe AMC

Classe AMC ⁸	API_5 (Altezza di precipitazione nei 5 giorni antecedenti [mm])	
	Stagione di riposo	Stagione vegetativa
AMC I	< 13	<36
AMC II	13 – 28	36 - 53
AMC III	> 28	> 53

Nella tabella successiva si riportano i valori di API_5 registrati dalle stazioni pluviometriche oggetto dell'indagine.

⁸ Rainfall Groups for Antecedent Soil Moisture Conditions during Growing and Dormant Seasons developed by the U.S. Department of Agriculture and Natural Resources Conservation Service (NRCS), formerly known as the Soil Conservation Service (SCS).

Tabella 16 – Eventi storici nell'area oggetto di studio

Data Evento	Stazioni pluviometriche significative per l'evento	Precipitazione [mm]	Precipitazione 5 giorni precedenti [mm]	Condizioni di saturazione dei suoli AMC
6 settembre 1961 (stagione vegetativa)	Madonna a Brolio	100,8	0,0	AMC I
	Monistero d'Ombro	159,2	0,0	AMC I
	Monte San Savino	70,0	0,0	AMC I
	Monteroni d'Arbia	212,4	0,0	AMC I
	Rapolano	55,4	0,0	AMC I
	Siena Poggio al Vento	50,8	0,0	AMC I
31 agosto / 1 settembre 1965 ⁹ (stagione vegetativa)	Siena Poggio al Vento	115,0	5,0	AMC I
	Rapolano	113,5	19,4	AMC I
	Monteroni d'Arbia	193,5	16,6	AMC I
	Monteoliveto	227,0	32,0	AMC I
	Bettolle	170,6	2,4	AMC I
	Monte San Savino	112,7	7,4	AMC I
3 / 4 novembre 1966 ¹⁰ (stagione di riposo)	Monistero d'Ombro	146,0	7,2	AMC I
	Madonna a Brolio	217,2	12,1	AMC I
	Monte San Savino	107,6	6,1	AMC I
	Monteoliveto	144,2	19,4	AMC II
	Monteroni d'Arbia	251,6	18,0	AMC II
	Siena	242,1	20,0	AMC II
	Rapolano	97,6	14,4	AMC II
2 giugno 1997 (stagione vegetativa)	Siena	90,2	0,0	AMC I
	Monteroni d'Arbia	133,0	0,0	AMC I
	Monte San Savino	115,4	13,0	AMC I
	Bettolle	95,2	0,0	AMC I
	Monteoliveto	118,8	0,0	AMC I
30 ottobre 2004 (stagione di riposo)	Madonna a Brolio	127,6	13,2	AMC II
	Monte S. Savino	123,2	19,8	AMC II
	Monteroni d'Arbia	164,8	12,0	AMC I
	Monistero d'Ombro	44,8	15,6	AMC II

Si aggiunge l'evento del 21/10/2013:

Data Evento	Stazioni pluviometriche significative per l'evento	Precipitazione [mm]	Precipitazione 5 giorni precedenti [mm]	Condizioni di saturazione dei suoli AMC
21 Ottobre 2013 ¹¹ (stagione di riposo)	Monte S. Savino	114,2	11,4	AMC I
	Monteroni d'Arbia	248,2	12,0	AMC I
	Monistero d'Ombro	144,0	11,8	AMC I

⁹ L'evento ha avuto inizio il 1 settembre 1965 (come indicato negli annali idrologici Tab III), per la stazione pluviometrica di Siena, e il 31 agosto 1965 per le stazioni pluviometriche di Monteoliveto e Bettolle. L'evento si è protratto poi anche il 2 settembre 1965.

¹⁰ L'evento ha avuto inizio il 3 novembre 1966 (come indicato negli annali idrologici Tab III), per la stazione pluviometrica di Siena e Monteoliveto. L'evento si è protratto poi anche il 4 novembre 1966.

¹¹ L'evento ha avuto inizio e termine il 21 ottobre 2013; i dati del SIR riportano la pioggia suddivisa per il 21 e 22 Ottobre in quanto il dato di pioggia indicato non è relativo al giorno, ma dalle 09:00 del giorno precedente e le 09:00 del giorno medesimo.

Come si evince nella figura 10, l'area del bacino del Fiume Ombrone in studio ricade in zone di influenza di più stazioni pluviometriche, Madonna a Brolio (1%), Monistero d'Ombrone (35%), Rapolano (51%), Monteroni d'Arbia (1%) e Monteoliveto (12%). L'evento più significativo che ha coinvolto contemporaneamente le tre stazioni principali maggiormente influenti è del 4 novembre 1966.

Per valutare la significatività di una stazione pluviometrica per un dato bacino idrografico, è possibile fare riferimento anche all'associazione fra fenomeni alluvionali e relative piogge registrate. Ad esempio sia per l'evento del 2004, che per quello del 2013, la stazione di Monteroni d'Arbia ha registrato valori massimi cumulati significativi, poiché in entrambi i casi le correnti atmosferiche provenivano da Sud-Ovest (fonti SIR).

Tabella 17- Evento pluviometrico estremo di riferimento

Anno	Stazione	Pioggia giornaliera registrata nel giorno dell'evento [mm]	Pioggia registrata nei giorni precedenti l'evento API ₅ [mm]	Condizioni di saturazione dei suoli AMC
4 nov. 1966	Rapolano	97,6	14,4	AMC II
	Monistero d'Ombrone	146,0	7,2	AMC I
	Monteoliveto	144,2	19,4	AMC II

Inoltre per le stazioni pluviometriche con maggior influenza nelle zone di studio, Monistero d'Ombrone, Rapolano e Monteroni d'Arbia si registrano i seguenti eventi singoli rilevanti:

Tabella 18 – Eventi storici rilevanti nell'area oggetto di studio

Anno	Stazione	Pioggia giornaliera registrata nel giorno dell'evento [mm]	Pioggia registrata nei giorni precedenti l'evento API ₅ [mm]	Condizioni di saturazione dei suoli AMC
1 set. 1965	Rapolano	113,5	19,4	AMC I
6 set. 1961	Monistero d'Ombrone	159,2	0,0	AMC I
15 set. 2006	Monistero d'Ombrone	141,1	11,2	AMC I
21 ott. 2013	Monistero d'Ombrone	144	11,8	AMC I
6 set. 1961	Monteroni d'Arbia	212,4	0,0	AMC I
3/4 nov. 1966	Monteroni d'Arbia	251,6	18,0	AMC II
30 ott. 2004	Monteroni d'Arbia	164,8	12,0	AMC I
21 ott. 2013	Monteroni d'Arbia	248,2	12,0	AMC I

In considerazione del fatto che gli altri tre eventi riportati rilevano una condizione di saturazione del suolo pari AMC I o AMC II, si assume a seguito delle valutazioni effettuate la condizione di suolo mediamente saturo (CN2) per la generazione degli idrogrammi di piena di verifica.

Tempo di ritardo e tempo di corrivazione

L'idrogramma unitario di piena (IUH) del SCS può essere interpretato formalmente come l'idrogramma della piena provocata da una precipitazione di durata infinitesima e di volume unitario.

Per definire l'IUH è necessario stimare per ciascun bacino il tempo di ritardo (*time lag*, t_{lag}), legato al tempo di corrivazione (funzione della velocità di scorrimento) dalla relazione:

$$t_{lag} = 0,6 T_c$$

Data la differenza di estensione fra il bacino del Fiume Ombrone a valle della Copra e gli altri bacini oggetto del presente studio, il tempo di ritardo t_{lag} , pari al ritardo del baricentro dell'idrogramma rispetto a quello dello ietogramma, è stato calcolato mediante due metodologie:

- direttamente, utilizzando la formula di Bocchiola Rosso (2003) che rappresenta l'adattamento ai bacini italiani del metodo SCS (*Soil Conservation Service*) ;
- indirettamente, sfruttando la relazione fra T_c e T_{lag} , ricavando per i bacini idrografici il tempo di corrivazione con il metodo di Kirpich e di Giandotti.

Si descrivono di seguito le metodologie richiamate per il calcolo del t_{lag} .

Tempo di ritardo (Bocchiola e Rosso, 2003) t_{lag}

Bocchiola e Rosso (2003)¹² stimano il tempo di ritardo mediante la formula:

$$t_{lag} = 0.026 \cdot L^{0.82} \frac{(S'+1)^{0.13}}{i_v^{0.2}} \quad [\text{h}]$$

dove:

L [km] → lunghezza dell'asta principale (considerando l'impluvio di lunghezza massima + l'asta cartografata)

I_d [%] → pendenza media della rete di drenaggio (in termini percentuali, tabella 1)

S' [mm] → ritenzione potenziale

Tabella 19 – Tempi di corrivazione dei bacini secondo Bocchiola-Rosso (2003)

Bacino	L(km)	I_d (%)	S'	T_{lag} (min)
F. Ombrone a monte della Copra	24.92	11.4	102.8	245.8
Borro della Copra a monte Borro della Bestina	8.26	11.1	56.2	92.30
Interbacino 1	0.30	8.0	106.3	7.0
Borro della Casaccia	1.75	11.5	73.3	27.6
Borro della Bestina a monte Borro della Rabatta	5.03	5.7	91.6	74.6
Interbacino 2	0.62	7.3	75.0	12.4
Interbacino 3	1.71	1.9	66.7	36.5
Borro del Bestinino	3.22	2.4	61.9	58.8
Borro della Rabatta	4.17	5.4	108.8	66.38

¹² Pubblicato sulla rivista l'Acqua, "Sul tempo di risposta dei bacini idrografici italiani" (2003).

L'intervallo di calcolo (*computational interval*, Δt), per una corretta definizione dell'IUH, deve essere inferiore al 29% del tempo di ritardo (t_{lag}), e viene fissato pari a 4 min in considerazione dei piccoli bacini che costituiscono il sistema Fiume Ombrone e affluenti.

Tempo di corrivazione (Kirpich e Giandotti) t_c

Il tempo di corrivazione con il metodo di Kirpich si adatta a bacini di piccole dimensioni e si calcola secondo la seguente espressione:

$$t_c = 0.00325 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{i_v}} \right)^{0.77}$$

Dove:

L [km] → lunghezza dell'asta principale (considerando l'impluvio di lunghezza massima + l'asta cartografata)

Iv [%] → pendenza media dell'asta (in termini percentuali, tabella 1)

Il tempo di corrivazione secondo il metodo di Giandotti si adatta invece a bacini più estesi e si calcola secondo la seguente espressione:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_m}}$$

dove:

L [km] → lunghezza dell'asta principale in Km (considerando l'impluvio di lunghezza massima + l'asta cartografata)

H_m → altitudine media in m del bacino riferita alla sezione di chiusura (tabella 1)

A [%] → area del bacino idrografico in Km

Tabella 20 – Tempi di corrivazione dei bacini secondo Kirpich e Giandotti

Bacino	L (km)	Area (kmq)	Iv (%)	Hm (m)	tc Kirpich (ore)	tc Giandotti (ore)
F. Ombrone a monte della Copra	24.92	133.56	11.4	135.5	6.37	8.96
Borro della Copra a monte Borro della Bestina	8.26	24.05	11.1	82.9	2.33	4.39
Interbacino 1	0.30	0.11	8.0	20	0.08	0.49
Borro della Casaccia	1.75	0.74	11.5	56	0.49	1.01
Borro della Bestina a monte Borro della Rabatta	5.03	7.62	5.7	58.5	1.45	3.44
Interbacino 2	0.62	0.65	7.3	49	0.15	0.74
Interbacino 3	1.71	1.13	1.9	20	0.64	2
Borro del Bestinino	3.22	2.24	2.4	10	1.32	3.04
Borro della Rabatta	4.17	2.68	5.4	58.4	0.99	2.09

Nella tabella successiva si riporta il confronto dei valori fra il tempo di corrivazione (t_c) ed il tempo di ritardo (t_{lag}) ottenuti con i tre metodi.

Tabella 21 – Confronto tempi di corrivazione e ritardo bacini idrografici

Bacino	t_c Kirpich (ore)	t_c Giandotti (ore)	t_c Bocchiola (ore)	t_{lag} Kirpich (minuti)	t_{lag} Giandotti (minuti)	t_{lag} Bocchiola (minuti)
F. Ombrone a monte della Copra	6.37	8.96	6.83	229.32	322.56	245.8
Borro della Copra a monte Borro della Bestina	2.33	4.39	2.56	83.88	158.04	92.3
Interbacino 1	0.08	0.49	0.19	2.88	17.64	7.0
Borro della Casaccia	0.49	1.01	0.77	17.64	36.36	27.6
Borro della Bestina a monte Borro della Rabatta	1.45	3.44	2.07	52.2	123.84	74.6
Interbacino 2	0.15	0.74	0.34	5.4	26.64	12.4
Interbacino 3	0.64	2	1.01	23.04	72	36.5
Borro del Bestinino	1.32	3.04	1.63	47.52	109.44	58.8
Borro della Rabatta	0.99	2.09	1.84	35.64	75.24	66.38

Dal confronto dei risultati ottenuti si evince come il metodo di Bocchiola-Rosso (2003), utilizzato nel presente studio, riesce ad adattarsi alle dimensioni dei bacini in analisi, come riscontrabile dai valori ottenuti che risultano compresi all'interno dei valori calcolati applicando gli altri due metodi citati.

Portate e idrogrammi di piena

Di seguito si riportano i valori di portata al colmo ottenuti con l'applicativo Hec Hms 3.5 per il bacino del Fiume Ombrone ed affluenti in studio, generati per tempi di ritorno 30 e 200 anni con ietrogramma costante e tempi di pioggia assunti pari a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 e 12 ore.

Tabella 22 - Portate di progetto per tempo di pioggia di 1 ora

TR=30 anni, Dp=1h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)	TR=200 anni, Dp=1h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)
Borro Bestina	13.65	02:00	87.33	Borro Bestina	28	01:56	180.4
Fiume Ombrone	117.75	04:40	2354.67	Fiume Ombrone	207.08	04:40	4139.77
Borro della Copra	55.67	02:12	434.9	Borro della Copra	103.14	02:12	808.91
Borro della Rabatta	4.36	01:52	25.04	Borro della Rabatta	9.35	01:48	54.26
Interbacino 3	4.8	01:20	17.71	Interbacino 3	9.02	01:20	34.05
Conf. E	20.16	01:48	130.08	Conf. E	41.46	01:48	268.7
Tratto E-D	20.13	01:56	129.63	Tratto E-D	41.36	01:52	268.1
Tratto D-B	26.72	02:00	175.9	Tratto D-B	53.94	01:56	356.62
Borro Bestinino	7.11	01:40	37.43	Borro Bestinino	13.35	01:40	70.9
Interbacino 2	4.02	01:04	9.23	Interbacino 2	7.37	01:04	18.19
Conf. D	26.8	01:52	176.29	Conf. D	54	01:48	357.19
Interbacino 1	0.57	01:00	1.08	Interbacino 1	1.11	01:00	2.32
Confl. B	81.33	02:08	611.87	Confl. B	154.31	02:04	1167.85
Tratto B-A	81.26	02:08	611.86	Tratto B-A	154.13	02:08	1167.91
Confl. A	129.18	04:08	2966.53	Confl. A	227.77	04:08	5307.68
Borro della Casaccia	2.78	01:16	8.42	Borro della Casaccia	5.53	01:12	17.45

Tabella 23 – Portate di progetto per tempo di pioggia di 2 ore

TR=30 anni, Dp=2h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)	TR=200 anni, Dp=2h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)
Borro Bestina	17.27	02:44	125.74	Borro Bestina	33.31	02:44	248.89
Fiume Ombrone	151.84	05:20	3103.79	Fiume Ombrone	264.97	05:20	5410.7
Borro della Copra	68.27	02:56	592.97	Borro della Copra	121.35	02:56	1069.86
Borro della Rabatta	5.56	02:40	36.97	Borro della Rabatta	11.11	02:36	76.27
Interbacino 3	4.64	02:12	24.56	Interbacino 3	8.2	02:12	45.64
Conf. E	25.75	02:36	187.28	Conf. E	49.78	02:36	370.8
Tratto E-D	25.72	02:44	186.85	Tratto E-D	49.78	02:40	370.24
Tratto D-B	33.28	02:44	250.94	Tratto D-B	63.52	02:40	488.89
Borro Bestinino	7.9	02:28	51.52	Borro Bestinino	14.05	02:28	94.47
Interbacino 2	3.05	02:00	12.97	Interbacino 2	5.31	02:00	24.64
Conf. D	33.33	02:40	251.34	Conf. D	63.52	02:36	489.35
Interbacino 1	0.43	02:00	1.58	Interbacino 1	0.79	02:00	3.25
Confl. B	100.81	02:52	845.49	Confl. B	182.86	02:48	1561.99
Tratto B-A	100.66	02:56	845.5	Tratto B-A	182.8	02:52	1562.05
Confl. A	171.32	03:40	3949.28	Confl. A	299.37	03:32	6972.74
Borro della Casaccia	2.64	02:08	12.15	Borro della Casaccia	4.89	02:08	24.11

Tabella 24 – Portate di progetto per tempo di pioggia di 3 ore

TR=30 anni, Dp=3h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)	TR=200 anni, Dp=3h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)
Borro Bestina	17.74	03:36	153.88	Borro Bestina	32.92	03:32	297.93
Fiume Ombrone	172.02	06:00	3640.38	Fiume Ombrone	298.57	06:00	6309.28
Borro della Copra	69.6	03:48	705.21	Borro della Copra	120.16	03:44	1252.06
Borro della Rabatta	5.71	03:32	45.84	Borro della Rabatta	10.92	03:28	92.20
Interbacino 3	4.06	03:08	29.48	Interbacino 3	6.94	03:08	53.80
Conf. E	26.59	03:28	228.83	Conf. E	49.48	03:24	443.93
Tratto E-D	26.56	03:36	229.19	Tratto E-D	49.43	03:32	443.47
Tratto D-B	34	03:36	305.7	Tratto D-B	62.47	03:32	583.25
Borro Bestinino	7.43	03:24	61.57	Borro Bestinino	12.8	03:20	111.00
Interbacino 2	2.46	03:00	15.67	Interbacino 2	4.19	03:00	29.2
Conf. D	34.01	03:28	306.07	Conf. D	62.51	03:24	583.67
Interbacino 1	0.35	03:00	1.96	Interbacino 1	0.63	03:00	3.92
Confl. B	103.12	03:44	1012.87	Confl. B	181.59	03:40	1839.23
Tratto B-A	103.11	03:44	1012.87	Tratto B-A	181.57	03:40	1839.27
Confl. A	201.81	04:28	4653.25	Confl. A	348.8	04:24	8148.55
Borro della Casaccia	2.29	03:04	14.88	Borro della Casaccia	4.11	03:04	28.87

Tabella 25 – Tempo Portate di progetto per tempo di pioggia di 4 ore

TR=30 anni, Dp=4h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)	TR=200 anni, Dp=4h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)
Borro Bestina	17.1	04:28	176.97	Borro Bestina	30.92	04:28	337.48
Fiume Ombrone	183.71	06:44	4075.6	Fiume Ombrone	317.37	06:44	7029.17
Borro della Copra	66.77	04:40	795.62	Borro della Copra	112.83	04:36	1396.84
Borro della Rabatta	5.5	04:24	53.17	Borro della Rabatta	10.22	04:24	105.13
Interbacino 3	3.55	04:08	33.46	Interbacino 3	5.96	04:04	60.31
Conf. E	25.7	04:20	263.6	Conf. E	46.5	04:20	502.92
Tratto E-D	25.68	04:28	263.27	Tratto E-D	46.47	04:24	502.49
Tratto D-B	32.76	04:20	350.48	Tratto D-B	59.08	04:16	659.11
Borro Bestinino	6.77	04:16	69.7	Borro Bestinino	11.39	04:16	124.17
Interbacino 2	2.09	04:00	17.87	Interbacino 2	3.5	04:00	32.85
Conf. D	32.76	04:12	350.84	Conf. D	59.09	04:12	659.51
Interbacino 1	0.3	04:00	2.27	Interbacino 1	0.53	04:00	4.47
Confl. B	99.2	04:36	1148.38	Confl. B	170.87	04:28	2060.41
Tratto B-A	99.19	04:36	1148.37	Tratto B-A	170.82	04:32	2060.44
Confl. A	223.3	05:16	5223.96	Confl. A	383.49	05:16	9089.61
Borro della Casaccia	2.02	04:04	17.12	Borro della Casaccia	3.53	04:04	32.72

Tabella 26 – Portate di progetto per tempo di pioggia di 5 ore

TR=30 anni, Dp=5h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)	TR=200 anni, Dp=5h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)
Borro Bestina	16.13	05:24	196.64	Borro Bestina	28.6	05:20	370.9
Fiume Ombrone	189.06	07:28	4443.4	Fiume Ombrone	325.22	07:28	7635.08
Borro della Copra	62.66	05:32	871.63	Borro della Copra	104.19	05:28	1517.96
Borro della Rabatta	5.19	05:20	59.45	Borro della Rabatta	9.45	05:20	116.11
Interbacino 3	3.16	05:04	36.82	Interbacino 3	5.22	05:04	65.78
Conf. E	24.24	05:16	292.92	Conf. E	42.99	05:16	552.79
Tratto E-D	24.23	05:24	292.61	Tratto E-D	42.96	05:20	552.37
Tratto D-B	31.12	05:16	388.57	Tratto D-B	54.92	05:12	723.12
Borro Bestinino	6.14	05:12	76.55	Borro Bestinino	10.18	05:12	135.21
Interbacino 2	1.83	05:00	19.73	Interbacino 2	3.04	05:00	35.93
Conf. D	31.15	05:08	388.89	Conf. D	54.96	05:08	723.51
Interbacino 1	0.26	05:00	2.54	Interbacino 1	0.46	05:00	4.93
Confl. B	93.33	05:28	1262.74	Confl. B	158.35	05:20	2246.01
Tratto B-A	93.32	05:28	1262.72	Tratto B-A	158.34	05:20	2246.02
Confl. A	237.06	06:08	5706.12	Confl. A	405.31	06:08	9881.1
Borro della Casaccia	1.8	05:04	19.03	Borro della Casaccia	3.11	05:04	35.97

Tabella 27 - Portate di progetto per tempo di pioggia di 6 ore

TR=30 anni, Dp=6h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)	TR=200 anni, Dp=6h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)
Borro Bestina	15.14	06:20	214.13	Borro Bestina	26.45	06:16	400.51
Fiume Ombrone	190.57	08:16	4768.57	Fiume Ombrone	326.23	08:16	8170.22
Borro della Copra	58.44	06:28	938.53	Borro della Copra	95.98	06:20	1624.42
Borro della Rabatta	4.88	06:20	65.06	Borro della Rabatta	8.74	06:16	125.86
Interbacino 3	2.85	06:04	39.79	Interbacino 3	4.67	06:04	70.59
Conf. E	22.73	06:16	318.98	Conf. E	39.71	06:12	596.97
Tratto E-D	22.71	06:24	318.69	Tratto E-D	39.69	06:20	596.59
Tratto D-B	29.27	06:12	422.37	Tratto D-B	50.8	06:12	779.77
Borro Bestinino	5.61	06:12	82.59	Borro Bestinino	9.19	06:08	144.92
Interbacino 2	1.64	06:00	21.38	Interbacino 2	2.7	06:00	38.64
Conf. D	29.29	06:08	422.66	Conf. D	50.83	06:04	780.15
Interbacino 1	0.24	06:00	2.78	Interbacino 1	0.41	06:00	5.34
Confl. B	87.44	06:20	1363.67	Confl. B	146.5	06:12	2409.53
Tratto B-A	87.43	06:20	1363.65	Tratto B-A	146.48	06:16	2409.52
Confl. A	244.16	07:00	6132.22	Confl. A	416.05	07:00	10579.74
Borro della Casaccia	1.64	06:04	20.73	Borro della Casaccia	2.8	06:00	38.85

Tabella 28 – Portate di progetto per tempo di pioggia di 7 ore

TR=30 anni, Dp=7h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)	TR=200 anni, Dp=7h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)
Borro Bestina	14.22	07:16	230.1	Borro Bestina	24.52	07:16	426.65
Fiume Ombrone	189.62	09:08	5064.19	Fiume Ombrone	322.52	09:04	8641.45
Borro della Copra	54.55	07:20	999.11	Borro della Copra	88.59	07:16	1717.79
Borro della Rabatta	4.59	07:16	70.2	Borro della Rabatta	8.11	07:12	134.5
Interbacino 3	2.61	07:04	42.48	Interbacino 3	4.23	07:04	74.83
Conf. E	21.33	07:12	342.79	Conf. E	36.77	07:12	635.97
Tratto E-D	21.33	07:20	342.5	Tratto E-D	36.76	07:16	635.61
Tratto D-B	27.5	07:12	453.16	Tratto D-B	47.05	07:08	829.73
Borro Bestinino	5.16	07:08	88.07	Borro Bestinino	8.37	07:08	153.45
Interbacino 2	1.49	07:00	22.88	Interbacino 2	2.44	07:00	41.03
Conf. D	27.51	07:04	453.45	Conf. D	47.1	07:04	830.1
Interbacino 1	0.22	07:00	2.99	Interbacino 1	0.37	07:00	5.71
Confl. B	81.94	07:16	1455.27	Confl. B	135.62	07:12	2553.23
Tratto B-A	81.93	07:16	1455.24	Tratto B-A	135.6	07:12	2553.22
Confl. A	246.34	07:56	6519.42	Confl. A	417.43	07:52	11194.67
Borro della Casaccia	1.5	07:00	22.28	Borro della Casaccia	2.54	07:00	41.39

Tabella 29 - Portate di progetto per tempo di pioggia di 8 ore

TR=30 anni, Dp=8h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)	TR=200 anni, Dp=8h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)
Borro Bestina	13.37	08:16	244.26	Borro Bestina	22.86	08:12	450.94
Fiume Ombrone	186.67	10:00	5325.48	Fiume Ombrone	316.44	09:52	9078.63
Borro della Copra	50.98	08:20	1052.48	Borro della Copra	82.23	08:16	1804.13
Borro della Rabatta	4.32	08:12	74.78	Borro della Rabatta	7.57	08:12	142.55
Interbacino 3	2.4	08:04	44.86	Interbacino 3	3.88	08:00	78.74
Conf. E	20.03	08:12	363.9	Conf. E	34.26	08:08	672.23
Tratto E-D	20.03	08:20	363.64	Tratto E-D	34.25	08:16	671.89
Tratto D-B	25.83	08:12	480.47	Tratto D-B	43.83	08:08	876.13
Borro Bestinino	4.78	08:08	92.9	Borro Bestinino	7.71	08:04	161.34
Interbacino 2	1.37	08:00	24.2	Interbacino 2	2.23	08:00	43.25
Conf. D	25.85	08:04	480.74	Conf. D	43.86	08:04	876.48
Interbacino 1	0.2	08:00	3.19	Interbacino 1	0.34	08:00	6.05
Confl. B	76.79	08:12	1536.14	Confl. B	126.12	08:08	2686.31
Tratto B-A	76.76	08:16	1536.12	Tratto B-A	126.09	08:12	2686.3
Confl. A	244.69	08:48	6861.6	Confl. A	413.17	08:48	11764.93
Borro della Casaccia	1.39	08:00	23.66	Borro della Casaccia	2.34	08:00	43.76

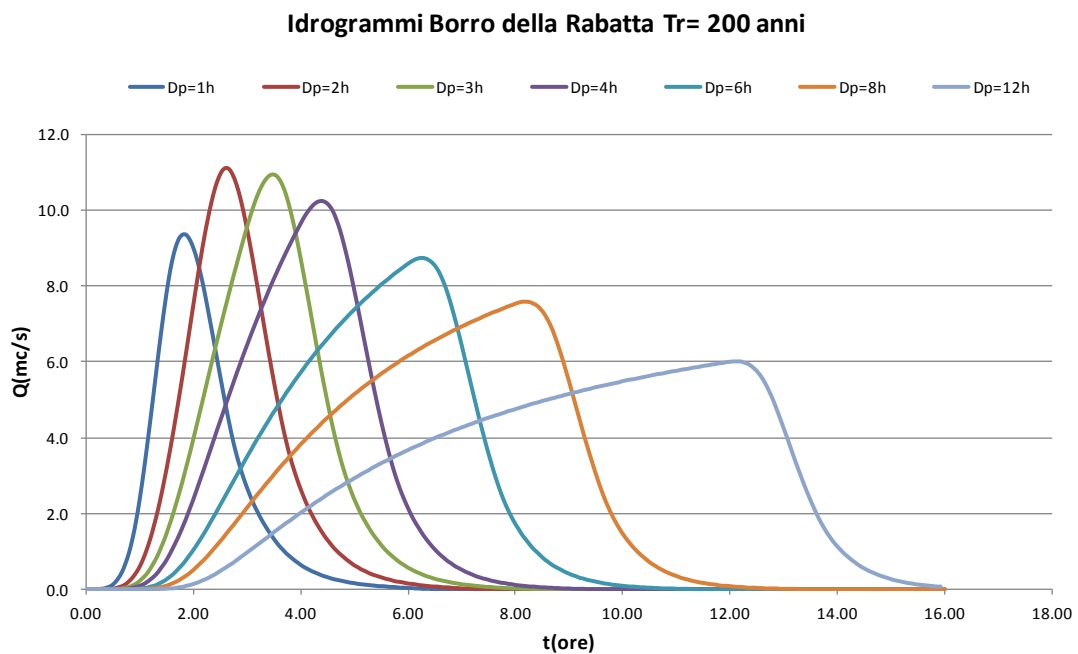
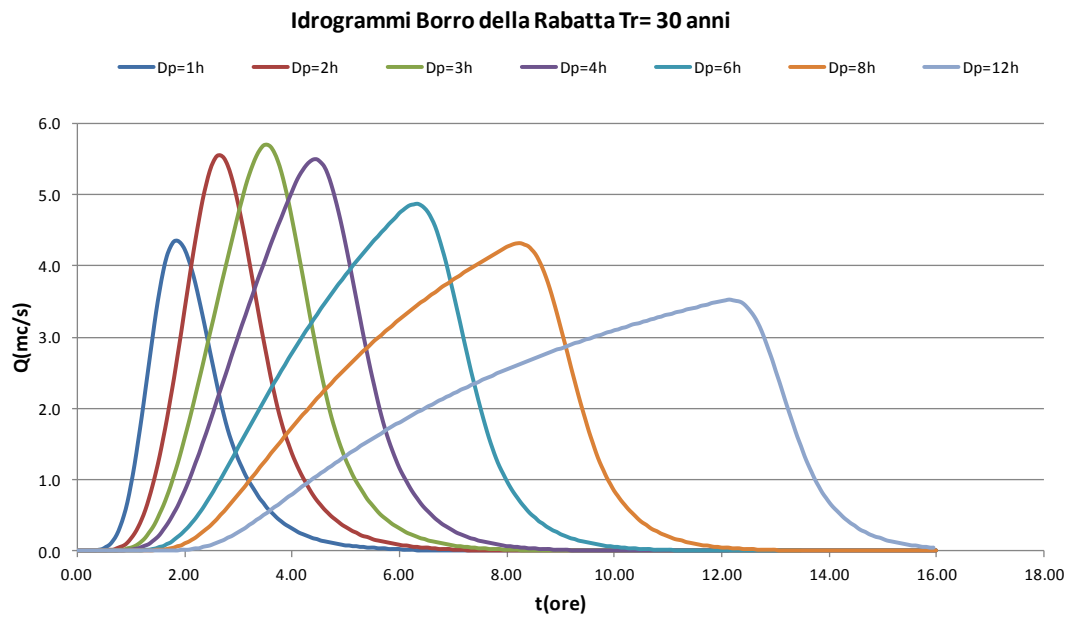
Tabella 30 - Portate di progetto per tempo di pioggia di 10 ore

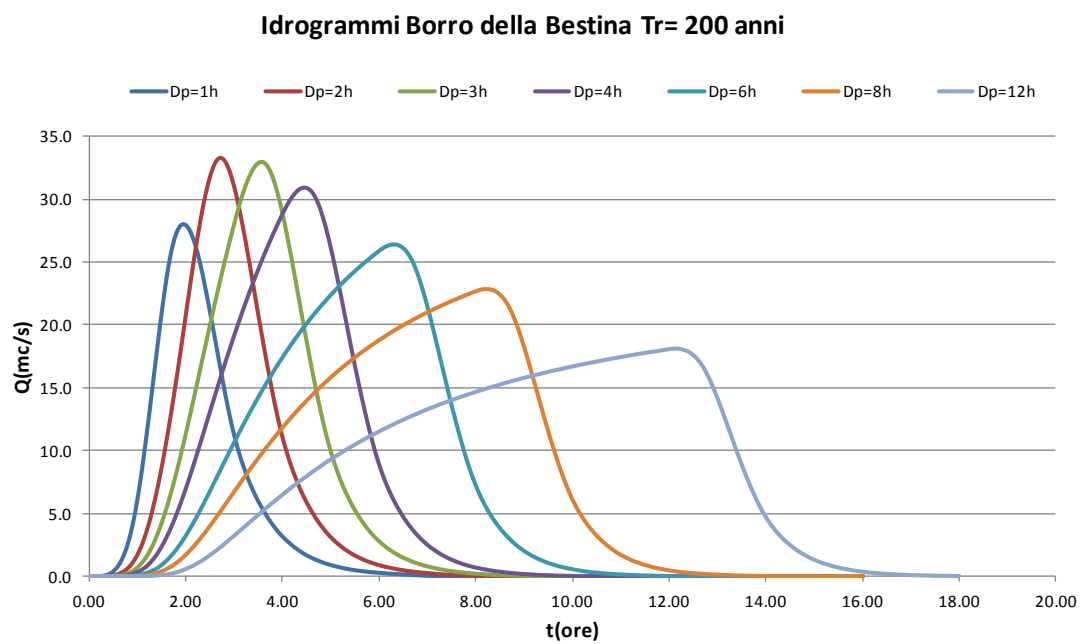
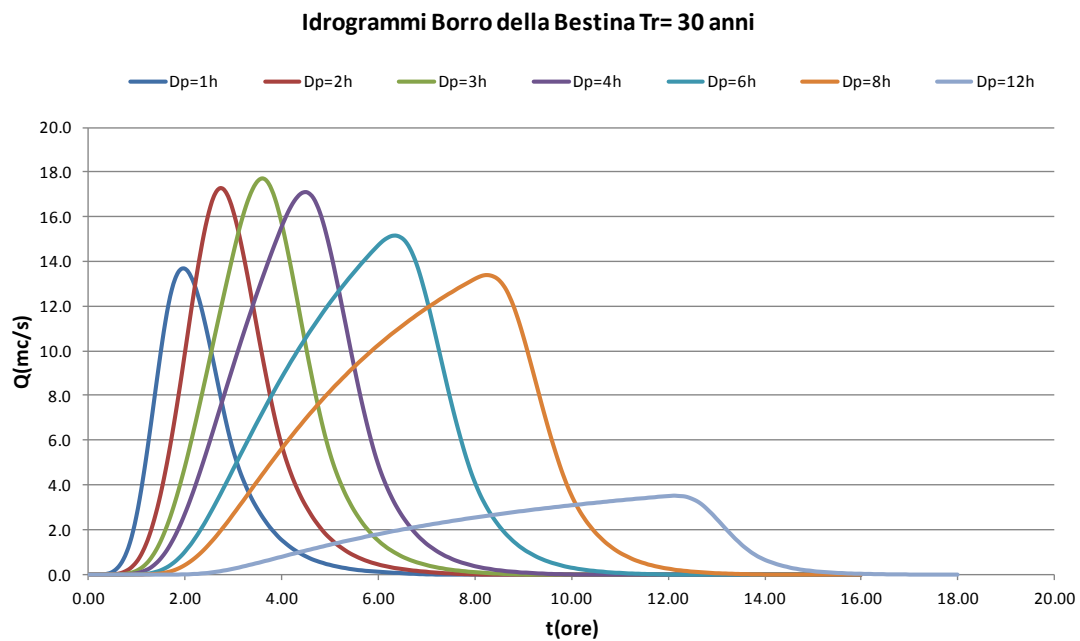
TR=30 anni, Dp=10h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)	TR=200 anni, Dp=10h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)
Borro Bestina	11.95	10:12	269.88	Borro Bestina	20.13	10:08	493.04
Fiume Ombrone	178.54	11:44	5796.2	Fiume Ombrone	281.86	11:36	9232.87
Borro della Copra	45.07	10:16	1148.24	Borro della Copra	71.76	10:12	1952.84
Borro della Rabatta	3.87	10:12	83.07	Borro della Rabatta	6.69	10:08	156.53
Interbacino 3	2.09	10:00	49.14	Interbacino 3	3.35	10:00	85.51
Conf. E	17.89	10:08	402.1	Conf. E	30.14	10:08	735.08
Tratto E-D	17.88	10:16	401.86	Tratto E-D	30.13	10:12	734.76
Tratto D-B	23.04	10:12	529.77	Tratto D-B	38.52	10:08	956.47
Borro Bestinino	4.18	10:04	101.58	Borro Bestinino	6.67	10:04	174.95
Interbacino 2	1.19	10:00	26.59	Interbacino 2	1.92	10:00	47.08
Conf. D	23.06	10:04	530.03	Conf. D	38.54	10:04	956.79
Interbacino 1	0.18	10:00	3.54	Interbacino 1	0.3	10:00	6.64
Confl. B	68.16	10:12	1681.55	Confl. B	110.43	10:08	2915.94
Tratto B-A	68.15	10:12	1681.52	Tratto B-A	110.42	10:08	2915.93
Confl. A	235.96	10:44	7477.72	Confl. A	376.76	10:36	12148.79
Borro della Casaccia	1.22	10:00	26.15	Borro della Casaccia	2.03	10:00	47.86

Tabella 31 - Portate di progetto per tempo di pioggia di 12 ore

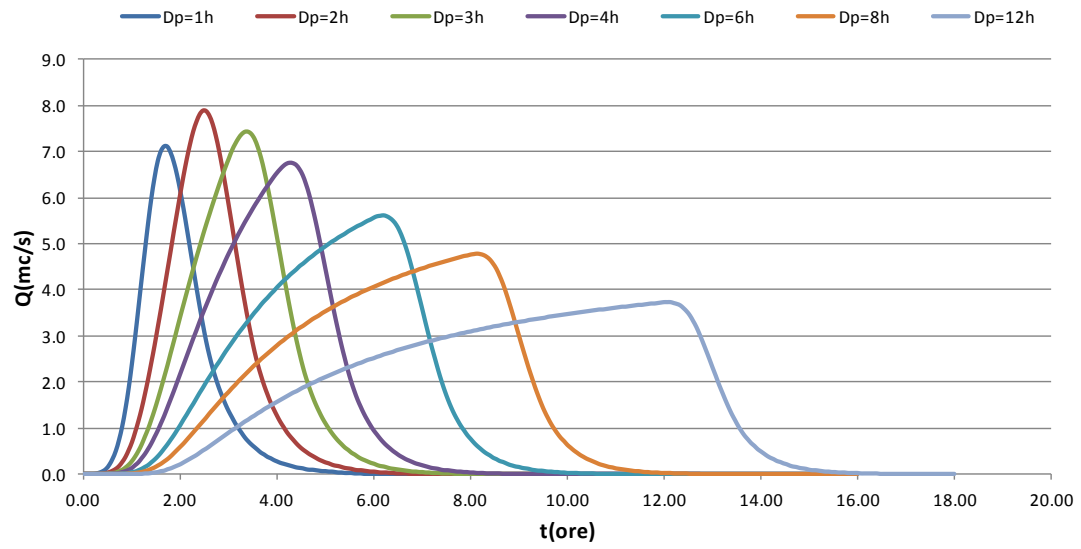
TR=30 anni, Dp=12h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)	TR=200 anni, Dp=12h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc)
Borro Bestina	10.84	12:12	292.82	Borro Bestina	18.06	12:08	530.34
Fiume Ombrone	169.33	13:28	6215.89	Fiume Ombrone	263.91	13:24	9812.7
Borro della Copra	40.49	12:12	1233.2	Borro della Copra	63.87	12:08	2083.73
Borro della Rabatta	3.53	12:08	90.53	Borro della Rabatta	6.01	12:08	168.96
Interbacino 3	1.87	12:00	52.95	Interbacino 3	2.97	12:00	91.47
Conf. E	16.22	12:08	436.3	Conf. E	27.02	12:04	790.78
Tratto E-D	16.21	12:16	436.07	Tratto E-D	27.02	12:12	790.49
Tratto D-B	20.87	12:08	573.85	Tratto D-B	34.5	12:08	1027.6
Borro Bestinino	3.74	12:04	109.29	Borro Bestinino	5.92	12:04	186.95
Interbacino 2	1.06	12:00	28.72	Interbacino 2	1.7	12:00	50.46
Conf. D	20.88	12:04	574.09	Conf. D	34.5	12:04	1027.9
Interbacino 1	0.16	12:00	3.85	Interbacino 1	0.26	12:00	7.16
Confl. B	61.43	12:08	1810.9	Confl. B	98.53	12:04	3118.49
Tratto B-A	61.41	12:08	1810.87	Tratto B-A	98.52	12:08	3118.47
Confl. A	224.34	12:36	8026.76	Confl. A	353.59	12:32	12931.17
Borro della Casaccia	1.1	12:00	28.38	Borro della Casaccia	1.81	12:00	51.49

Di seguito si riportano i gli idrogrammi di progetto dei bacini idrografici del Borro della Copra e affluenti per tempo di ritorno 30 e 200 anni e per durate di pioggia 1, 2, 3, 4, 6, 8 e 12 ore.

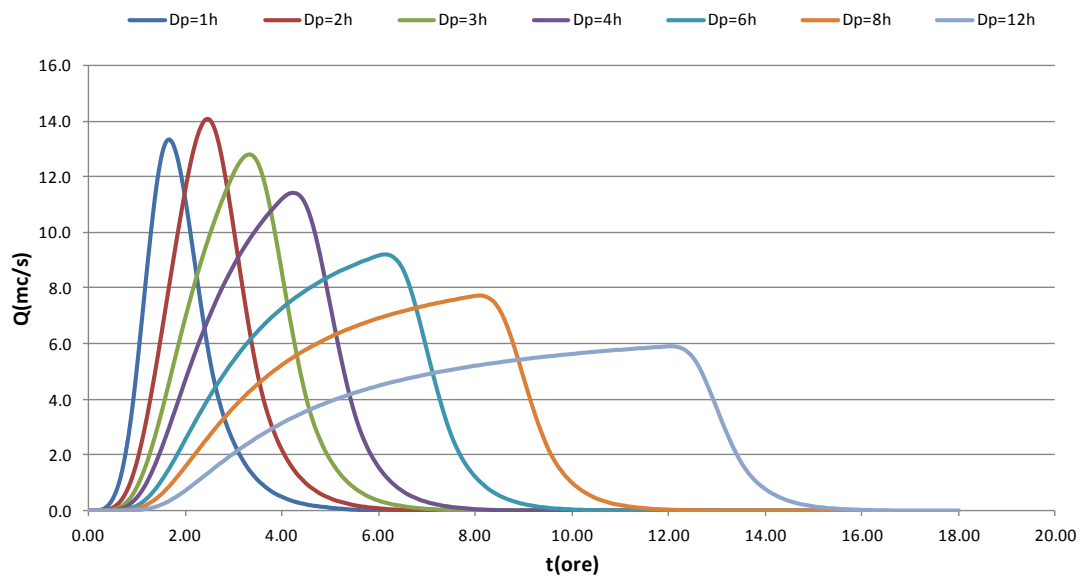




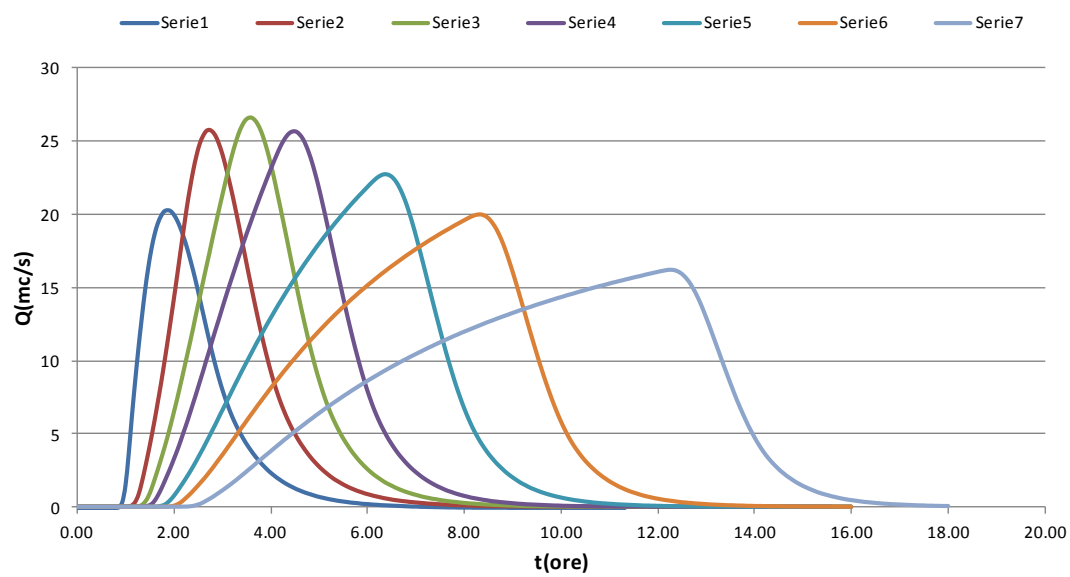
Idrogrammi Borro del Bestinino Tr= 30 anni



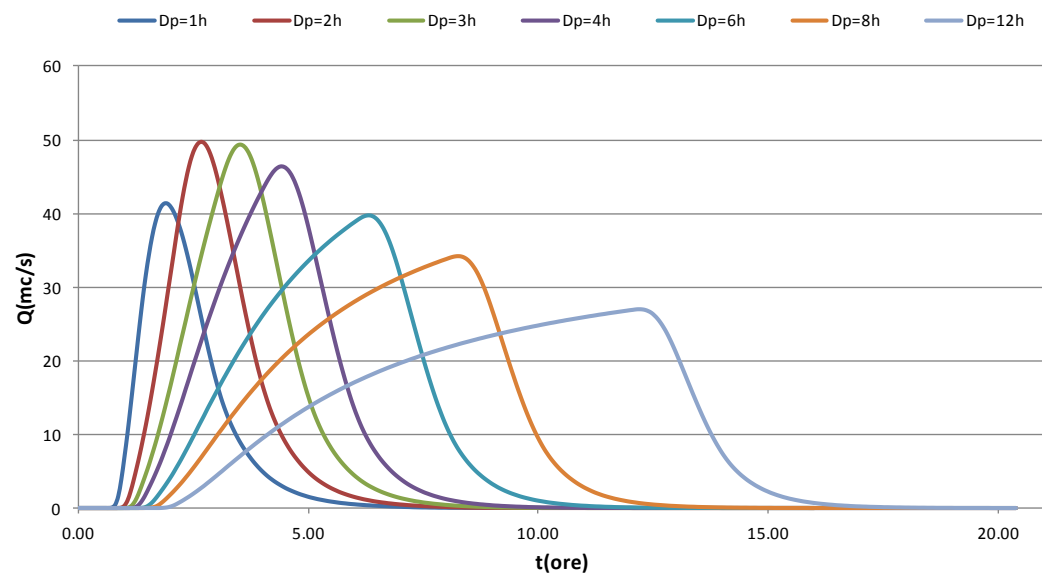
Idrogrammi Borro del Bestinino Tr= 200 anni



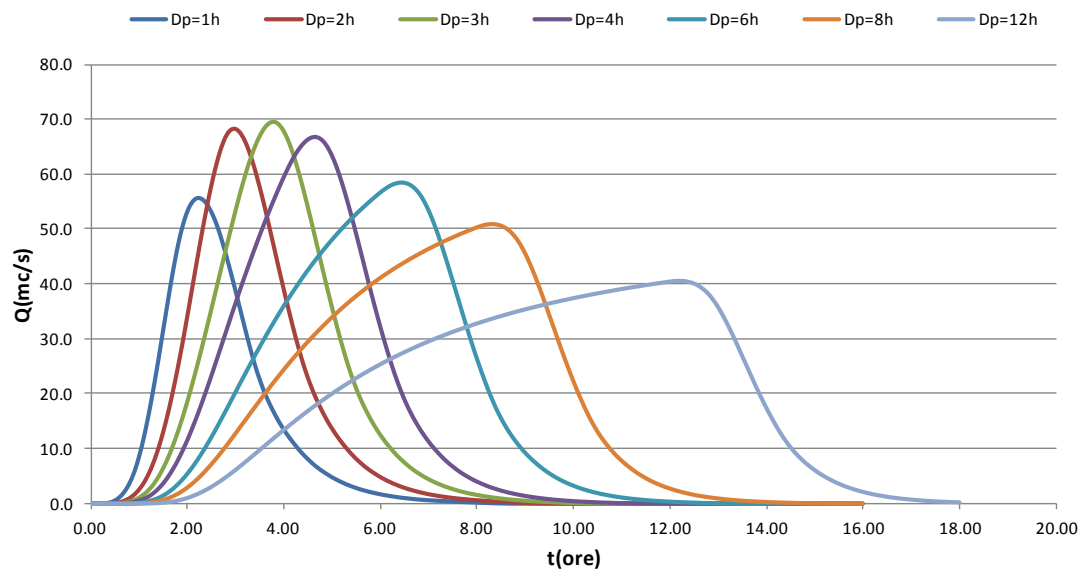
Idrogrammi Borro del Bestina tratto E- D Tr= 30 anni



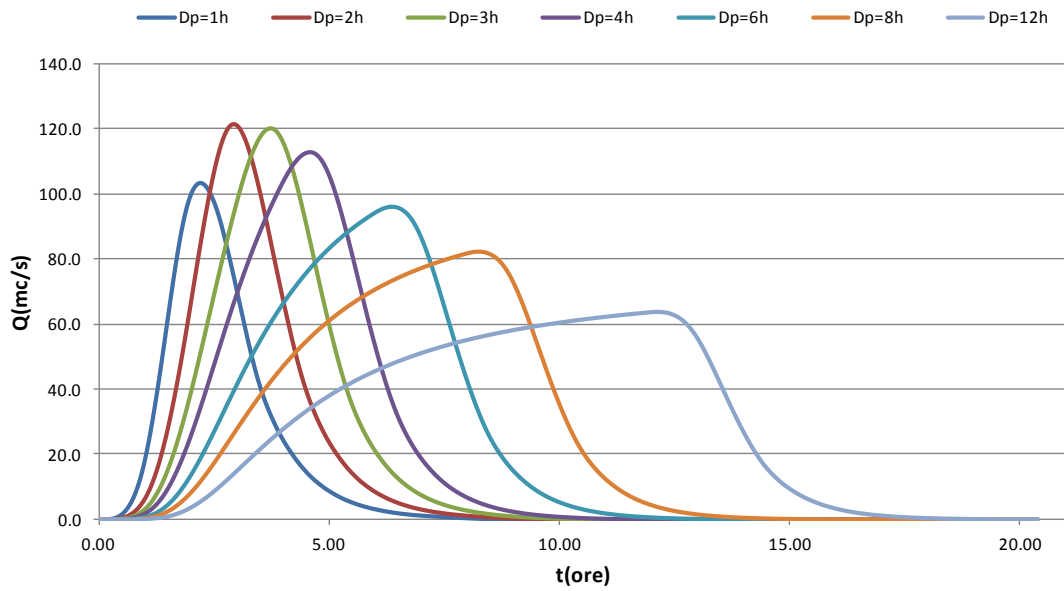
Idrogrammi Borro della Bestina tratto E-D Tr= 200 anni



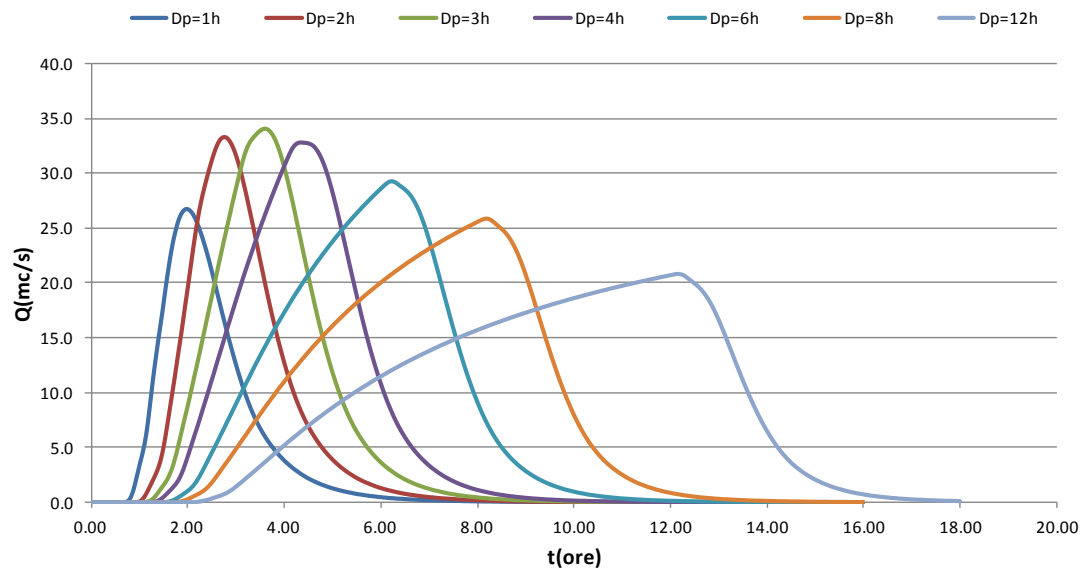
Idrogrammi Borro della Copra Tr= 30 anni



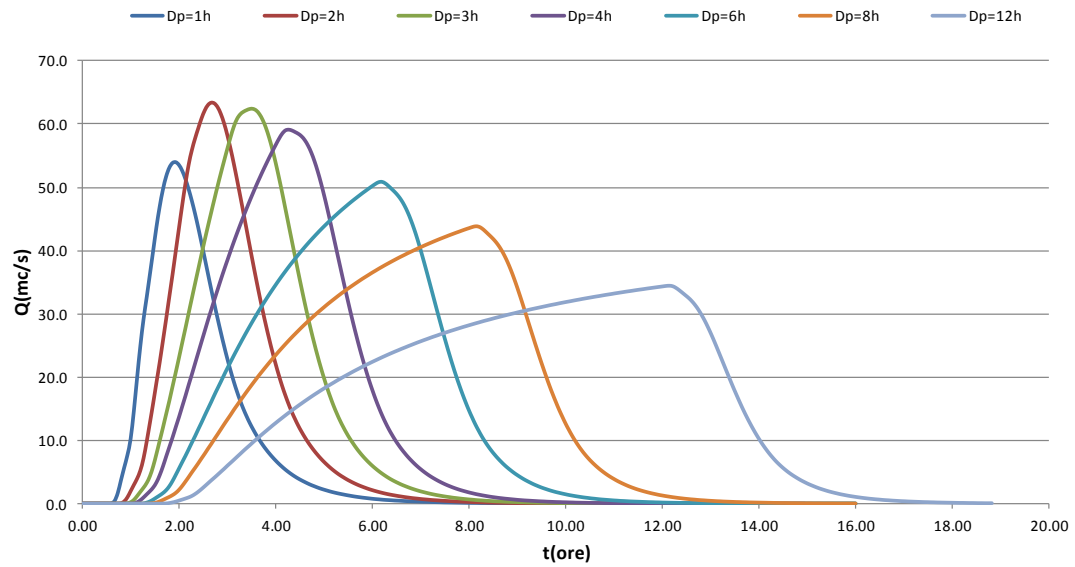
Idrogrammi Borro della Copra Tr= 200 anni



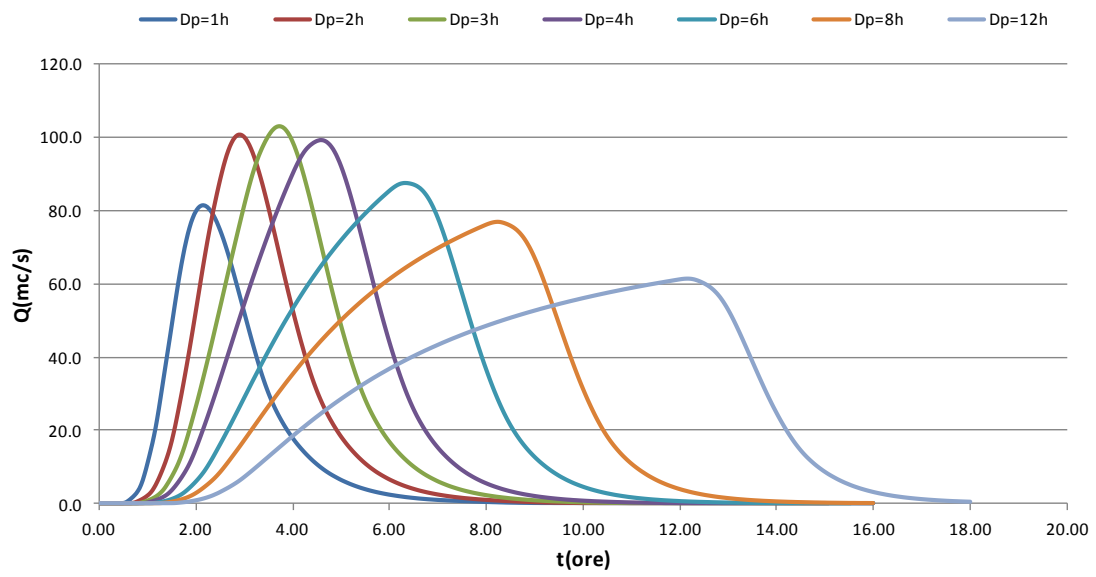
Idrogrammi Borro del Bestina tratto D- B Tr= 30 anni



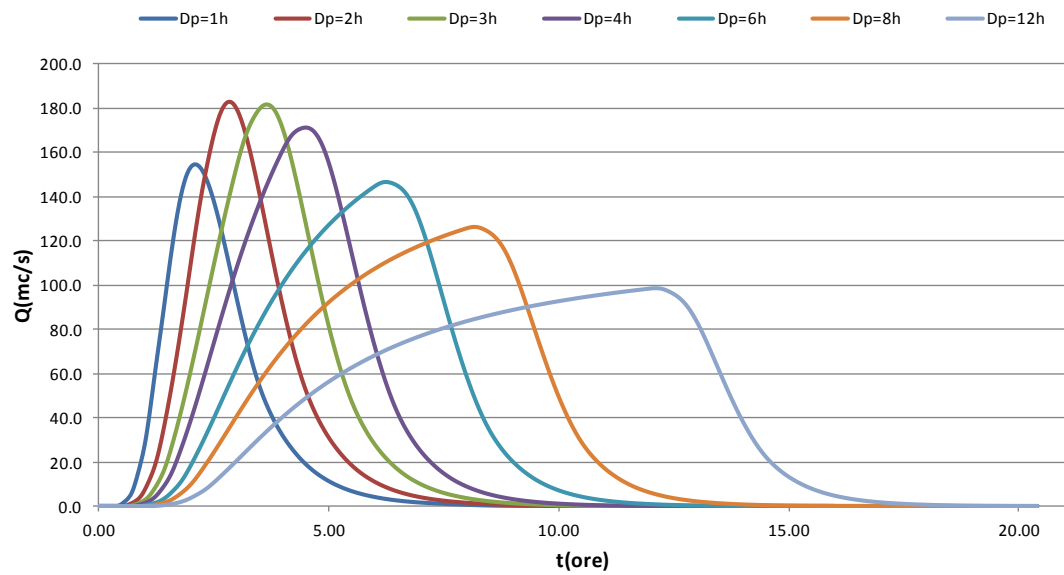
Idrogrammi Borro della Bestina tratto D-B Tr= 200 anni



Idrogrammi Borro della Copra tratto B-A Tr= 30 anni

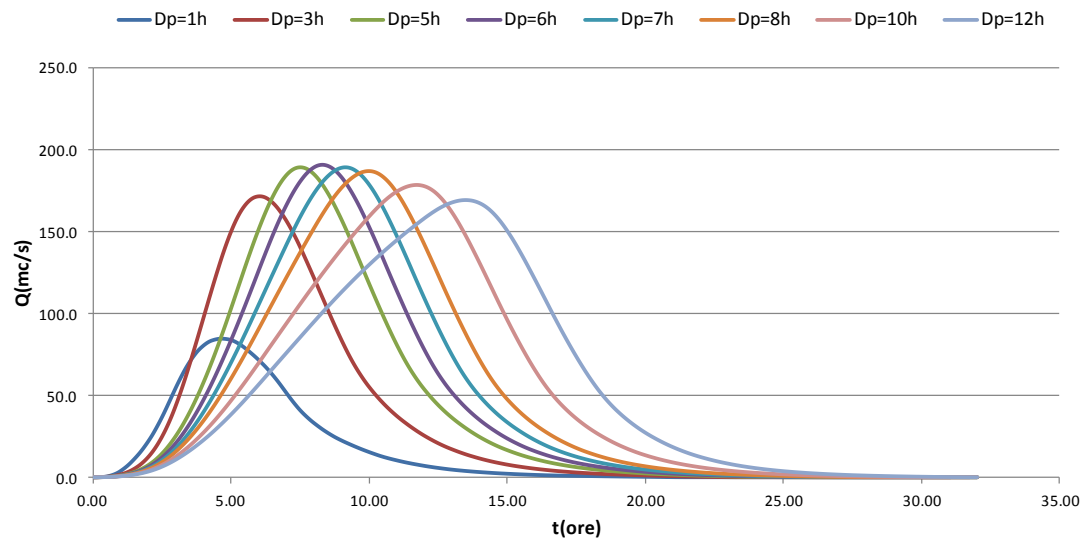


Idrogrammi Borro della Copra tratto B-A Tr= 200 anni

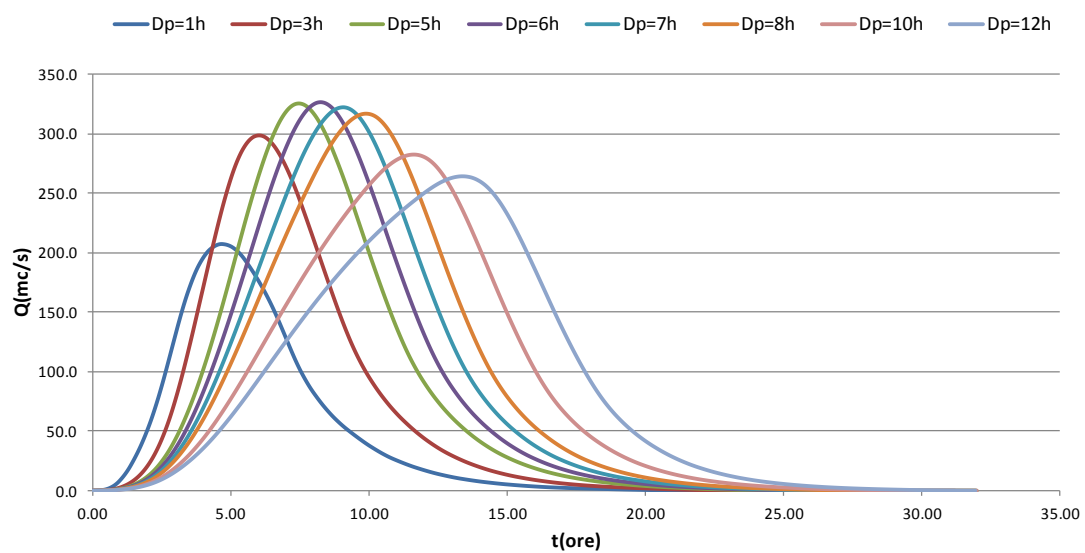


Di seguito si riportano i valori degli idrogrammi di progetto del Fiume Ombrone a monte e valle della confluenza con il Borro della copra per tempo di ritorno 30 e 200 anni e per durate di pioggia 1, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 12 ore.

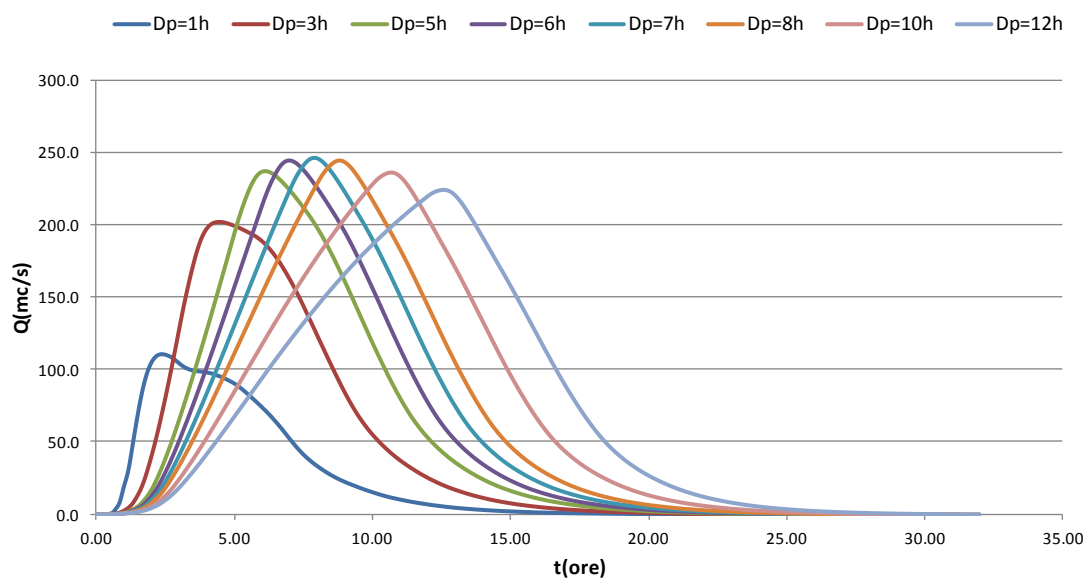
Idrogrammi Fiume Ombrone Tr= 30 anni



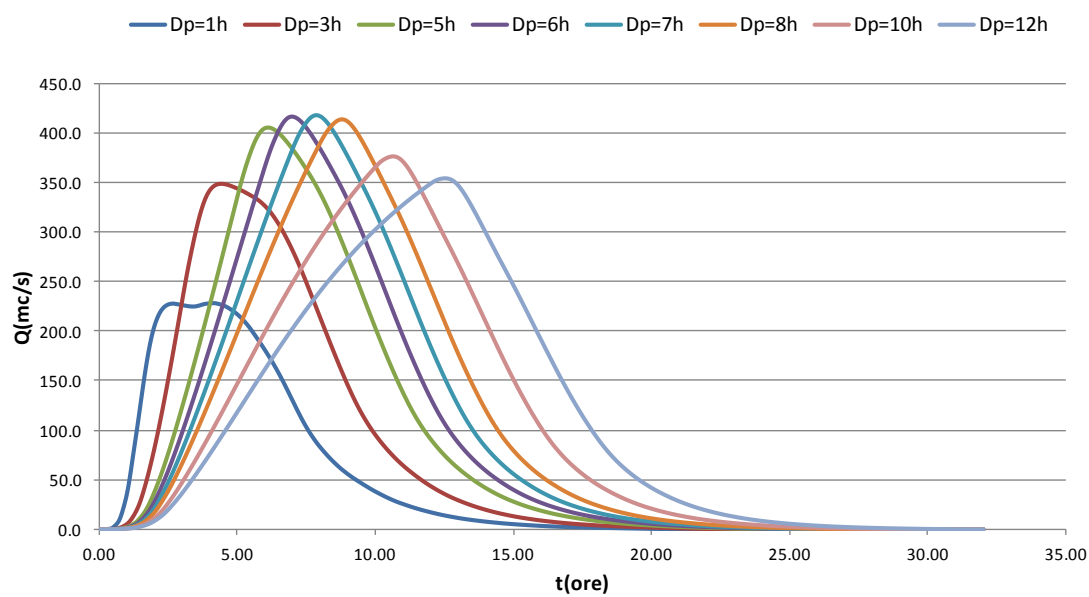
Idrogrammi Fiume Ombrone Tr= 200 anni



Idrogrammi Fiume Ombrone tratto a valle confluenza "A" $T_r = 30$ anni



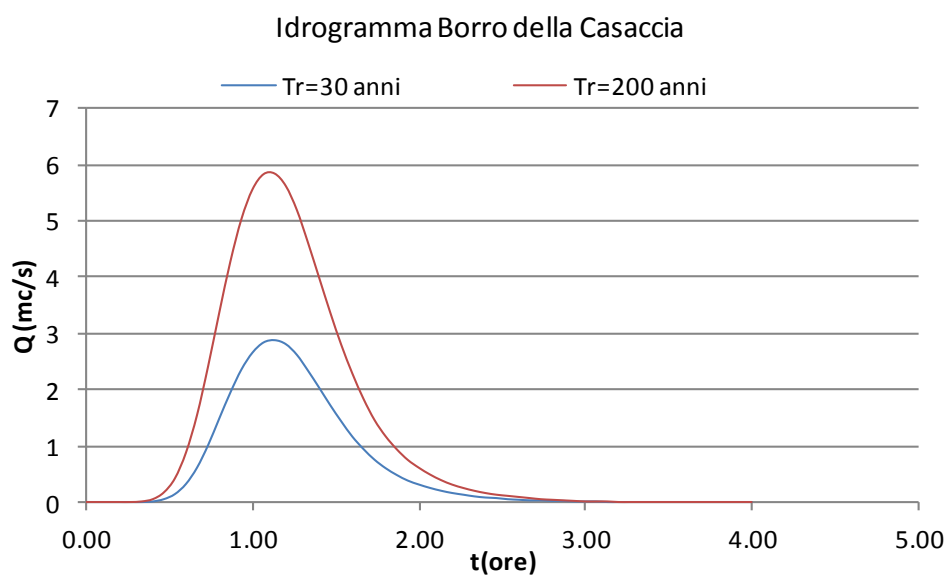
Idrogrammi Fiume Ombrone tratto a valle confluenza "A" $r = 200$ anni



Di seguito si riportano i valori di portata di picco e gli idrogrammi per Tr30 e Tr200 anni del Borro della Casaccia, generati con ietogramma di tipo “Chicago” e durata di pioggia pari ad 1 ora.

Tabella 32 - Portate di progetto Borro della Casaccia

TR=30 anni, Dp=1h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc/s)	TR=200 anni, Dp=1h	Qp (mc/s)	Tp	Deflusso (1000 mc/s)
Borro Casaccia	2,87	1:04	8,4	Borro Casaccia	5,85	1:08	17,4



Le portate di piena al colmo utilizzate per le verifiche idrauliche, individuate dalla generazione dei relativi idrogrammi di piena mediante l'applicativo Hec HMS 3.5, sono sintetizzate nella tabella seguente:

Tabella 33 - Portate massime di piena di progetto del Fiume Ombrone e affluenti

Bacino	Area	Tr	Dp	Tp	Volume affluito	Volume defluito	Cd	Q _{valle}	q unit.
	[kmq]	[anni]	[ore]	[ore:minuti]	[1000 mc]	[1000 mc]	[#]	[mc/s]	[mc/s kmq]
Confluenza A – Fiume Ombrone (Sez.A2)	172.49	30	7	07:56	12044.1	6519.4	0.54	246.34	1.43
		200	7	07:52	17845.8	11194.7	0.63	417.43	2.42
Fiume Ombrone monte Copra (Sez. A1)	134.00	30	6	08:16	10162.6	4768.6	0.47	190.57	1.42
		200	6	08:16	14689.1	8170.2	0.56	326.23	2.43
Tratto B-A - Borro Copra valle Borro Bestina	38.49	30	3	03:44	2433.8	1012.9	0.42	103.12	2.68
		200	2	02:52	3168.4	1562.1	0.49	182.86	4.75
Borro della Copra (Sez. B)	24.05	30	3	03:48	1525.2	705.2	0.46	69.60	2.89
		200	2	02:56	1985.5	1069.9	0.54	121.35	5.05
Borro della Casaccia (Sez. C)	0.74	30	1	01:08	35.4	8.4	0.24	2.87	3.88
		200	1	01:08	51.2	17.4	0.34	5.85	7.91
Tratto D-B – Borro Bestina valle Borro Bestinino	14.33	30	3	03:36	908.6	305.7	0.34	34.01	2.37
		200	2	02:40	1182.8	488.9	0.41	63.52	4.43
Borro Bestinino (Sez. D)	2.24	30	2	02:28	127.9	51.5	0.40	7.90	3.53
		200	2	02:28	184.9	94.5	0.51	14.05	6.27
Tratto E-D – Borro Bestina valle Borro Rabatta	11.43	30	3	03:36	724.8	229.2	0.32	26.59	2.33
		200	2	02:40	943.6	370.8	0.39	49.78	4.36
Borro Bestina (Sez. E1)	7.62	30	3	03:36	483.2	153.9	0.32	17.74	2.32
		200	2	02:44	629.1	248.9	0.40	33.31	4.37
Borro della Rabatta (Sez. E2)	2.68	30	3	03:32	169.9	45.8	0.27	5.71	2.13
		200	2	02:36	221.2	76.3	0.34	11.10	4.14

Si evidenzia a titolo di confronto che le portate al colmo calcolate per il Fiume Ombrone a monte del Borro della Copra e del Borro della Copra risultano superiori con quelle individuate nello Studio Paris (vedi Tabella 7 – Portate del fiume Ombrone - Studio Paris - Relazione Integrativa maggio 2009, riportata nella presente relazione).