

PROCEDIMENTO AUTORIZZATORIO UNICO DI V.I.A. RELATIVO AL PROGETTO

“Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato e avvio dell’adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente. Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE)”, presentato da Agenzia Interregionale per il fiume Po, localizzato lungo il fiume Secchia nel Comune di Modena, Campogalliano (MO) e Rubiera (RE).



RELAZIONE IDROLOGICA

Valutazione degli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno (20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni) in corrispondenza della sezione di ingresso alla cassa di espansione.

Parma, 13 maggio 2021

INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. VALUTAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DI ASSEGNATO TEMPO DI RITORNO	5
3. PLUVIOMETRIA	10
3.1. Analisi statistica dei dati pluviometrici.....	10
3.2. Linee segnalatrici di probabilità pluviometrica puntuali (Direttiva piena di progetto – P.A.I.) – Regolarizzazione serie storiche dati di pioggia	16
3.3. Regionalizzazione delle precipitazioni (V.A.P.I. Progetto speciale per la Valutazione delle Piene in Italia)	17
3.4. Confronto precipitazioni	19
4. VALUTAZIONE DEGLI IDROGRAMMI DI PIENA	22
4.1. Progetto “Adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia in località Rubiera (RE) e Campogalliano (MO) alle attuali esigenze idrauliche ed alle norme del D.P.R. 1 novembre 1959 n° 1363 e successive (Regolamento Dighe)” (Ministero dei lavori pubblici – Magistrato per il Po – Parma - 1991)” ..	23
4.2. “Studio idrologico ed idraulico del sistema fluviale asta del Secchia – Cassa di espansione di Rubiera a monte della città di Modena” (Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambiente e del Rilevamento - 1999);.....	25
4.3. “Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Secchia nel tratto da Lugo alla confluenza in Po” (Autorità di bacino del fiume Po – 2007);.....	26
4.4. Progetto “MO-E-1357 – Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell’adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa di espansione esistente; MO-E-1273 – Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia nel Comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero – RER – Parte A” (Agenzia Interregionale per il Fiume Po – 2019).	31
4.5. Modello idrologico di trasformazione afflussi - deflussi	33
5. CONFRONTO RISULTATI	57
6. CONCLUSIONI	61

1. PREMESSA

Oggetto del presente studio è la **valutazione degli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno (20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni) in corrispondenza della sezione di ingresso alla cassa di espansione ubicata sull'asta del fiume Secchia, nel Comune di Rubiera (RE).**

Premesso che:

- in data 08.02.2013 è stata emanata la Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri recante *“Indirizzi operativi per l'Istituzione dell'Unità di Comando e Controllo del bacino del fiume Po ai fini del governo delle piene, nonché modifiche ed integrazioni alla Direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri del 27 febbraio 2004 e successive modificazioni”*, pubblicata il 26.04.2013 sulla G.U. n°97;
- ai sensi della suesposta Direttiva, L'AIPo, con il supporto della struttura di ARPA-SIMC di Parma, Centro di competenza per la modellistica idrologica, garantisce il funzionamento del sistema di modellistica idrologica e idraulica (**FEWS PO – Flood Early Warning System Po**);
- il sistema FEWS PO è un sistema per la gestione di dati e modellistica in tempo reale, che è stato sviluppato ai fini della previsione idrologica e idraulica, in supporto ai sistemi di allertamento e di governo delle piene. Il sistema integra attualmente tre catene modellistiche idrologico-idrauliche operative in tempo reale (MIKE-NAM÷MIKE-HD, **HEC-HMS**÷HEC-RAS, TOPKAPI÷SOBEK);
- con Determinazione Dirigenziale n. 827 del 15.10.2019 è stato approvato l'“*Accordo di collaborazione, ai sensi dell'art. 15 della L. n. 241/1990 e s.m.i., tra l'Agenzia interregionale per il fiume Po e l'Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia della regione Emilia Romagna, Struttura Idro-Meteo-Clima per l'aggiornamento delle analisi idrologiche per la gestione operativa dei manufatti di laminazione a supporto del sistema FEWS-PO*”;
- l'oggetto del suesposto accordo di collaborazione consiste nell'**aggiornamento delle analisi idrologiche degli eventi di piena temibili** nei bacini di Parma, Crostolo, **Secchia** e Panaro, tutti interessati da casse di espansione soggette alla normativa dighe, al fine di implementare nel sistema FEWS-PO le regole di gestione dei manufatti di laminazione delle piene, sia in tempo reale che in tempo differito;
- nell'ambito del suesposto accordo di collaborazione, con Determinazione Dirigenziale n. 156 del 19.02.2020 si è determinato di affidare al Prof. Ing. Armando

Brath la fornitura di un servizio di ingegneria per il supporto all'aggiornamento delle analisi idrologiche in oggetto. Nell'ambito della fornitura in oggetto, in particolare, è stata condotta **un'analisi statistica dei massimi annuali delle portate al colmo** disponibili in corrispondenza di un set di stazioni idrometriche ubicate nel territorio regionale, effettuata con analisi di frequenza di tipo regionale, mediante applicazione della metodologia "**RoI**" (**Region of influence**), tesa alla valutazione delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno (20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni) in corrispondenza delle sezioni in ingresso alle casse di espansione presenti sulle aste dei torrenti Parma, Crostolo, **Secchia** e Panaro;

- che la stima delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno del Fiume Secchia è stata effettuata in corrispondenza della stazione idrometrica di Secchia a Rubiera SS9, considerata con buona approssimazione coincidente con la sezione di ingresso al manufatto di laminazione;

lo scrivente ufficio ha condotto delle indagini, volte a definire gli idrogrammi di piena, per differenti tempi di ritorno (20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni), all'ingresso del manufatto di laminazione ubicato sull'asta del fiume Secchia.

La stima degli idrogrammi di piena è stata effettuata in corrispondenza della stazione idrometrica di Secchia a Rubiera SS9, in coerenza con quanto condotto nell'analisi idrologica predisposta dal Prof. Ing. Armando Brath.

L'analisi idrologica è stata articolata secondo le seguenti fasi:

- a) aggiornamento delle statistiche di pioggia intensa in corrispondenza delle stazioni pluviometriche rappresentative ubicate nell'area di interesse e confronto con i metodi definiti dall'Autorità di Bacino del Fiume Po (*Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica*) e dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche (*Progetto per la Valutazione delle Piene in Italia*);
- b) stima degli idrogrammi di piena prevedibili alla sezione di chiusura di interesse in caso di eventi con tempo di ritorno 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni, mediante applicazione del codice di calcolo HEC-HMS e confronto con i risultati di studi pregressi.

2. VALUTAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DI ASSEGNATO TEMPO DI RITORNO

Si riportano di seguito i risultati delle analisi idrologiche descritte nell'elaborato *“Supporto tecnico per l'aggiornamento delle analisi idrologiche degli eventi di piena temibili nei bacini di Secchia, Panaro, Parma e Crostolo”*, redatto dal Prof. Ing. Armando Brath, con la collaborazione del Servizio idrografia e idrologia regionale e distretto Po di Arpa-SIMC.

Nell'ambito dello studio in oggetto è stata condotta un'analisi statistica dei valori massimi annuali delle portate al colmo di piena disponibili in corrispondenza di un set di stazioni idrometriche ubicate nel territorio regionale, preventivamente individuato e validato con la collaborazione di Arpa, effettuata con *analisi di frequenza di tipo regionale*, tesa alla valutazione delle portate di assegnato tempo di ritorno in corrispondenza delle sezioni in ingresso alle casse di espansione presenti sulle aste dei torrenti Parma, Crostolo, Secchia e Panaro.

I *metodi di regionalizzazione dell'informazione idrometrica*, ovvero di analisi regionale di frequenza delle piene (*Regional Flood Frequency Analysis*), consentono di eseguire una stima delle grandezze idrologiche di interesse, integrando la limitata o assente informazione temporale con la più ampia informazione spaziale. Tali metodi si basano sull'individuazione di raggruppamenti di bacini idrografici che abbiano caratteristiche comuni in riferimento alla formazione dei fenomeni di piena (regioni omogenee), cioè regioni costituite da un insieme di siti caratterizzati da una distribuzione di probabilità degli eventi idrologici intensi che si può ritenere unica, a meno di un fattore di scala, ed in cui è possibile elaborare unitamente l'insieme dei dati sperimentali rilevati. Attraverso un opportuno accorpamento delle osservazioni si perviene a campioni aventi dimensioni significativamente maggiori di quelli a disposizione per ciascuna sezione strumentata, sulla base di cui risulta possibile ottenere stime della distribuzione di probabilità delle portate al colmo più affidabili di quelle fornite da un'analisi di tipo locale.

In particolare, nell'ambito delle analisi effettuate dal Prof. Ing. Armando Brath con la collaborazione del Servizio idrografia e idrologia regionale e distretto Po di Arpa-SIMC, è stata utilizzata la metodologia **“RoI”** (*Region of influence*). La metodologia **“RoI”** prevede che il raggruppamento dei bacini possa essere identificato a prescindere dalla

posizione geografica dei bacini stessi, facendo riferimento esclusivamente alle loro caratteristiche geomorfologiche e climatiche, sostituendo l'idea di zone omogenee, cioè contigue dal punto di vista geografico, con quella di raggruppamenti omogenei di bacini, costruiti sulla base di indici geomorfologici e climatici (area del bacino imbrifero sotteso, media della precipitazione cumulata annuale a scala di bacino, quota media del bacino imbrifero sotteso, quota della sezione di chiusura del bacino imbrifero sotteso, posizione del bacino in termini di coordinate del baricentro). La base dati utilizzata per la definizione dei raggruppamenti omogenei, come già precedentemente citato, è stata messa a disposizione da Arpa, a seguito di un processo di validazione delle portate massime al colmo annue disponibili in stazioni idrometriche significative del territorio della regione Emilia - Romagna, individuando un data set complessivo pari a 74 stazioni idrometriche.

Il processo di definizione del raggruppamento di bacini è controllato da due criteri fondamentali: l'omogeneità interna del gruppo e la sua dimensione obiettivo. L'omogeneità del raggruppamento è un requisito fondamentale per garantire una stima affidabile del quantile di portata di assegnato tempo di ritorno e tende generalmente a decrescere all'aumentare della dimensione del raggruppamento. Al tempo stesso, occorre considerare che la dimensione minima del raggruppamento risulta strettamente collegata al tempo di ritorno di interesse e dunque, perché non sia compromessa l'affidabilità delle stime del quantile regionale, non può risultare troppo esigua. Nell'ambito delle analisi statistiche effettuate, nell'ottica di individuare una soluzione di compromesso tra l'omogeneità interna del gruppo e l'attendibilità della stima del quantile di piena di assegnato tempo di ritorno, tenuto conto del numero complessivo di osservazioni disponibili nel dataset di partenza, si è fatto riferimento all'applicazione del criterio di *Cunnane* (1987), che afferma che, per ottenere una stima attendibile del quantile di piena corrispondente ad un tempo di ritorno di 1000 anni è necessario di disporre di almeno 500 osservazioni di portata massima annuale, e alla valutazione dell'omogeneità dei raggruppamenti mediante applicazione del test statistico di *Hosking e Wallis* (1993).

Una volta applicato l'approccio "RoI" per pervenire a raggruppamenti di bacini di adeguata dimensione e omogeneità, i campioni regionali sono stati costruiti adimensionalizzando le osservazioni dei massimi annuali di portata, dividendole per il valore medio delle osservazioni delle corrispondenti stazioni di provenienza; una volta

costruito il campione adimensionale, sono state ricavate le curve di crescita teoriche regionali, associate, nello specifico, alle distribuzioni TCEV (*Two-Component Extreme Value*) e GEV (*Generalized Extreme Value*), scelte anche in base al buon adattamento rispetto alla curva campionaria regionale.

Al fine di individuare la curva di crescita regionale dimensionale, in accordo con il *metodo della piena indice*, la curva di crescita regionale adimensionale stimata in corrispondenza delle 4 sezioni di interesse all'ingresso delle casse di espansione è stata moltiplicata per la portata indice, valutata come valor medio dei dati osservati presso la sezione in esame, ove disponibili; in assenza di osservazioni, la portata indice è stata valutata con il metodo di *Gherardelli-Marchetti*, sulla base delle informazioni ricavabili da un sito strumentato “donatore”, preso nelle vicinanze del sito di interesse, sullo stesso corso d'acqua o su un corso d'acqua limitrofo, il cui bacino idrografico fosse simile dal punto di vista geomorfologico e climatico al bacino sotteso dalla sezione di interesse.

Per quanto concerne la valutazione dei quantili di piena del fiume Secchia nella sezione di ingresso del manufatto di laminazione, considerata con buona approssimazione coincidente, ai fini della stima delle portate di assegnato tempo di ritorno, con la stazione idrometrica di Secchia a Rubiera SS9 (Superficie bacino imbrifero sotteso pari a 1.303 km^2), il campione regionale identificato con l'approccio “RoI” risulta costituito da 13 bacini idrografici, sottesi da altrettante stazioni idrometriche, per un totale di 436 osservazioni. La portata indice, calcolata come media campionaria delle portate massime al colmo annue registrate nella stazione di Secchia a Rubiera SS9, risulta pari a $635,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nella successiva Figura 2.1 sono messe a confronto, in forma grafica, la curva di crescita campionaria del campione regionale “RoI” individuato per il bacino sotteso dalla cassa di espansione e le curve di crescita teoriche delle distribuzioni TCEV e GEV, rese dimensionali attraverso la portata indice stimata: entrambe le distribuzioni riproducono in modo soddisfacente la distribuzione di frequenza del campione regionale. Nella medesima Figura è mostrata anche la distribuzione di frequenza della serie osservata dei massimi annuali a Rubiera SS9: si evidenzia il buon adattamento con entrambe le curve regionali teoriche.

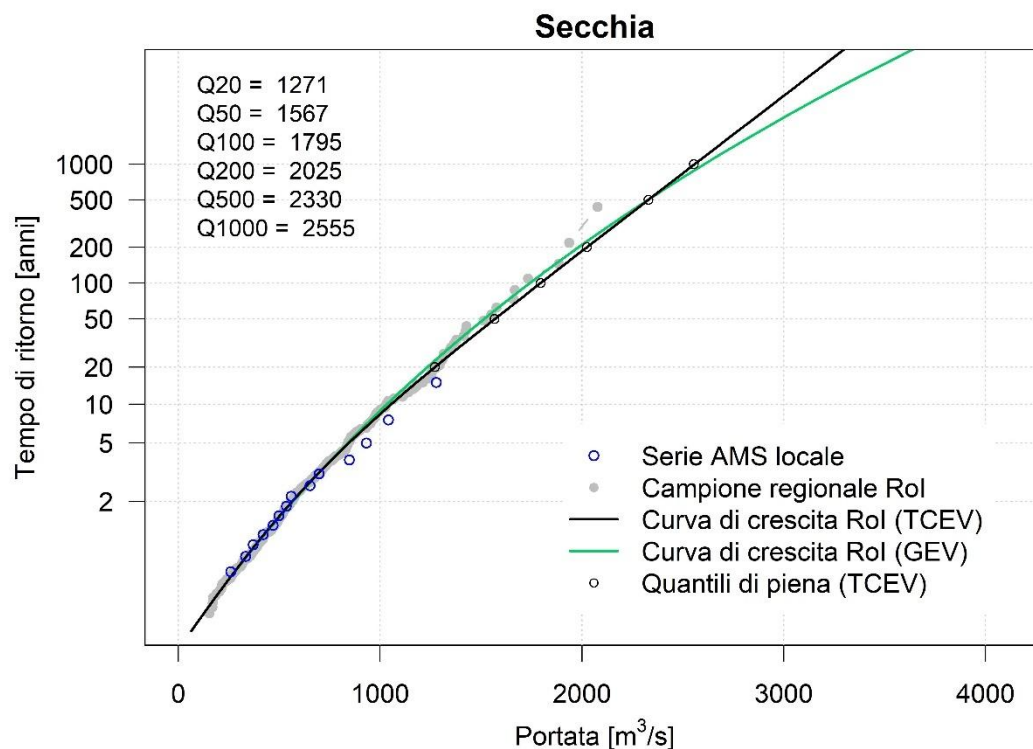


Figura 2.1 – Secchia a Rubiera SS9 – Confronto curve di crescita RoI-TCEV e RoI-GEV.

Nella successiva Tabella 2.1 sono riportate le portate di piena di assegnato tempo di ritorno (20, 50, 100, 200, 500, 1000 e 3000 anni) associate alle due distribuzioni di frequenza teoriche adottate.

Fiume Secchia alla cassa di espansione ($S = 1303 \text{ km}^2$)		
TR	TCEV	GEV
20	1.271	1.234
50	1.567	1.515
100	1.795	1.742
200	2.025	1.983
500	2.330	2.327
1000	2.555	2.607
3000	2.924	3.089

Tabella 2.1 – Stime delle portate di piena (m^3/s) di assegnato tempo di ritorno calcolate per il fiume Secchia alla sezione di ingresso della cassa di espansione, secondo i modelli regionali RoI-TCEV e RoI-GEV.

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 2.1 si evince come il modello regionale RoI-TCEV fornisca risultati leggermente più cautelativi rispetto al modello regionale RoI-GEV per tempi di ritorno fino a 200 anni. Per il tempo di ritorno di 500 anni i modelli forniscono sostanzialmente lo stesso valore di portata, mentre per tempi di ritorno superiori o uguali a 1000 anni, il modello RoI-GEV risulta più cautelativo.

Si sottolinea che, al fine di individuare una regione caratterizzata da un'adeguata omogeneità idrologica interna, identificata sulla base dell'applicazione del test di *Hosking e Wallis* (1993), è stato limitato il numero delle stazioni idrometriche appartenenti alla regione omogenea, escludendo dal raggruppamento quelle che, sebbene garantissero la costituzione di un campione dotato di almeno 500 osservazioni, avrebbero determinato un incremento dell'eterogeneità del medesimo, e riducendo, di conseguenza, il campione regionale ad un numero di 436 osservazioni. Si può ritenere che tale campione sia caratterizzato da una numerosità adeguata per stimare con sufficiente affidabilità portate fino alla millenaria, applicando in modo non rigido il criterio di *Cunanne* (1987). In considerazione di quanto enunciato, si può pertanto desumere che alla portata con tempo di ritorno 3000 anni stimata con l'analisi regionale di frequenza sopra esposta, non possa essere attribuito un vero e proprio significato statistico. Si può ragionevolmente assumere che portate caratterizzate da tempi di ritorno di 1000 o 3000 anni possano essere attribuibili ad eventi che, sulla base delle osservazioni disponibili, hanno una probabilità molto bassa di verificarsi.

3. PLUVIOMETRIA

La caratterizzazione pluviometrica del territorio in esame è stata articolata secondo le seguenti fasi:

- aggiornamento della statistica delle serie storiche delle precipitazioni intense pubblicate negli Annali Idrologici (massimi annuali di durata 1, 3, 6, 12 e 24 ore registrati sino all'anno 2018) in corrispondenza dell'area territoriale oggetto di indagine, mediante applicazione della distribuzione GEV (*Generalized Extreme Value*);
- confronto con la regolarizzazione statistica delle serie storiche delle precipitazioni intense riportate negli Annali Idrologici del Servizio Idrografico e Mareografico Italiano, indicate dalla *Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica (P.A.I)* dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, per le stazioni pluviometriche ritenute significative in relazione al territorio in esame;
- confronto con le analisi statistiche sui dati di precipitazione intensa condotte nell'ambito del progetto V.A.P.I. (Progetto speciale per la Valutazione delle Piene in Italia) del *Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche* del *Consiglio Nazionale delle Ricerche*.

3.1. Analisi statistica dei dati pluviometrici

Con riferimento ai massimi annuali delle precipitazioni intense di durata 1, 3, 6, 12 e 24 ore, si è provveduto all'aggiornamento delle statistiche di pioggia intensa sull'area di interesse attraverso l'applicazione della distribuzione GEV (*Generalized Extreme Value*), mediante caratterizzazione della curva di crescita e spazializzazione del valore indice. Le stazioni considerate sono quelle aventi numerosità campionaria maggiore uguale a 10 anni; la stima puntuale dei parametri è stata eseguita sui campioni avente numerosità maggiore o uguale a 15 anni.

Le stazioni pluviometriche considerate sono le più rappresentative, sia dal punto di vista territoriale, sia perché dotate di una serie storica di registrazioni estesa. Nella successiva Tabella 3.1.1 sono indicate, per ciascuna delle stazioni considerate, le principali caratteristiche e l'estensione della serie storica dei dati di pioggia, con riferimento alle diverse durate di precipitazione. In Figura 3.1.1 è individuata la posizione geografica delle medesime stazioni, con riferimento al perimetro del bacino imbrifero del fiume Secchia delimitato alla sezione di chiusura in corrispondenza della stazione idrometrica di Rubiera SS9. Le stazioni pluviometriche sono rappresentate con cerchi di dimensione crescente al crescere della numerosità del campione, con riferimento ai massimi registrati per la durata di 12 ore.

CODICE	STAZIONE	Altitudine [m s. m]	Anno inizio osservazioni	Anno fine osservazioni	Numero Osservazioni (D = 1 h)	Numero Osservazioni (D = 3 h)	Numero Osservazioni (D = 6 h)	Numero Osservazioni (D = 12 h)	Numero Osservazioni (D = 24 h)
M-430700	FORMIGINE	83	1971	2006	21	21	21	21	21
M-429900	CARPINETA	580	2008	2018	10	10	10	10	10
M-431400	MONTEFIORINO	630	2007	2018	11	11	11	11	11
M-431200	MODENA ARPA	77	2007	2018	12	12	12	12	12
M-209800	FEBBIO	1148	1971	2018	41	41	41	41	41
M-209700	LASTELLA	726	2002	2018	17	17	17	17	17
M-210100	COLLAGNA	832	2001	2018	18	18	18	18	18
M-209900	FARNETA	703	1930	2018	70	69	69	69	69
M-207000	LIGONCHIO	912	1929	2018	67	69	69	69	68
M-60700	SUCCISO	998	1970	2018	39	39	39	39	39
M-60400	PAVULLO	678	1937	2018	61	60	62	62	61
M-60100	PIEVEPELAGO	737	1985	2018	32	32	32	32	32
M-60500	FRASSINORO	1091	1986	2018	30	30	30	30	30
M-60800	CASTELNOVO NE' MONTI	729	1952	2016	52	52	52	52	52
M-205600	BAISO	550	1970	2018	42	42	42	41	42
M-292500	CA DE' CAROLI	98	1930	2018	25	24	24	24	24

CODICE	STAZIONE	Altitudine [m s. m]	Anno inizio osservazioni	Anno fine osservazioni	Numero Osservazioni (D = 1 h)	Numero Osservazioni (D = 3 h)	Numero Osservazioni (D = 6 h)	Numero Osservazioni (D = 12 h)	Numero Osservazioni (D = 24 h)
M-365300	CORREGGIO	33	2007	2018	11	11	11	11	11
M-181400	SASSOSTORNO	971	2003	2018	16	16	16	16	16
M-325300	CIVAGO	1051	2003	2018	16	16	16	16	16
M-335200	POLINAGO	754	2003	2018	16	16	16	16	16
M-324100	PIANDELAGOTTI	1219	1937	2018	61	62	61	61	62
M-291200	RAMISETO	798	2004	2018	15	15	15	15	15
M-291100	S. VALENTINO	302	2003	2018	16	16	16	16	16
M-325500	OSPITALETTO	1150	1972	2018	29	29	29	29	29
M-291300	PREDOLO	751	2003	2018	16	16	16	16	16
M-212400	VILLAMINOZZO	704	2000	2018	19	19	19	19	19
M-280200	SERRAMAZZONI	791	2002	2018	17	17	17	17	17
M-211600	PONTECAVOLA	367	2000	2018	17	17	17	17	17
-	SASSUOLO	121	1940	2003	32	32	32	32	33

Tabella 3.1.1 – Caratteristiche delle stazioni pluviometriche di riferimento.

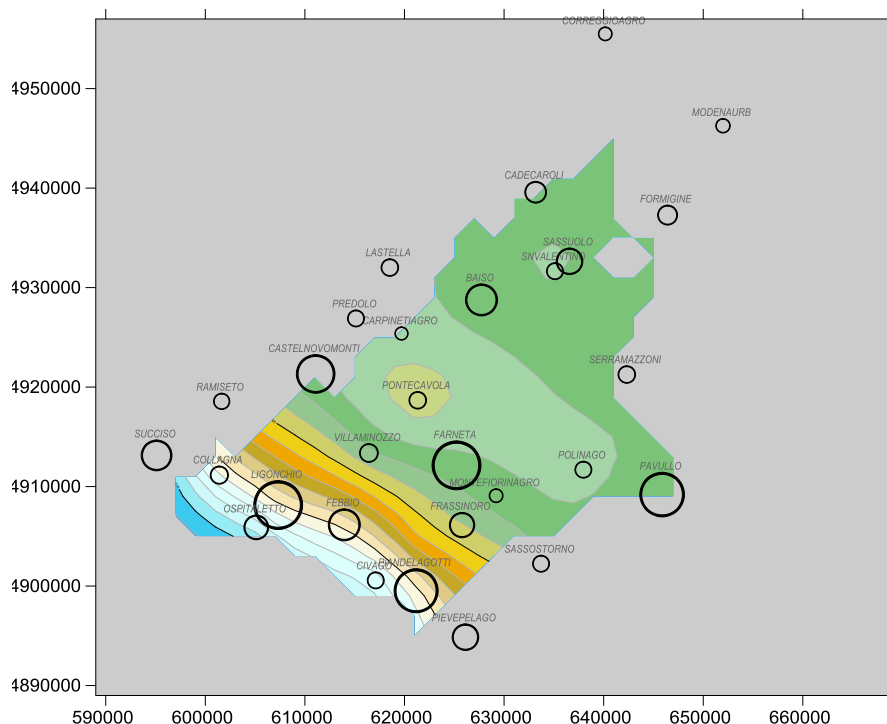


Figura 3.1.1 – Ubicazione stazioni pluviometriche di riferimento.

Si riporta di seguito l'espressione della probabilità di non superamento $F(X)$ attraverso la distribuzione GEV (*Generalized Extreme Value*; Jenkinson, 1955).

$$F(X) = \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k}{\alpha} \cdot (X - \varepsilon) \right]^{\frac{1}{k}} \right\}$$

essendo:

X : altezza di precipitazione massima annuale [mm];

k : parametro di forma ($k < 0$);

α : parametro di scala;

ε : parametro di posizione.

Per valori di $k=0$ la GEV si riduce alla distribuzione di Gumbel, avente espressione:

$$F(X) = \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{(X - \varepsilon)}{\alpha} \right] \right\}$$

Nella successiva Tabella 3.1.2 sono riportati, per ciascuna delle stazioni elencate nella Tabella 3.1.1 e per fissata durata (1, 3, 6, 12 e 24 ore), i parametri caratteristici della distribuzione di probabilità GEV, derivanti da stima puntuale nel caso in cui la stazione disponga di una numerosità maggiore di 15 anni e da stima regionale nel caso in cui la stazione non abbia numerosità sufficiente, ovvero inferiore a 15 anni.

STAZIONE	ε	α	k	ε	α	k	ε	α	k	ε	α	k	ε	α	k
	D = 3 ore			D = 6 ore			D = 6 ore			D = 12 ore			D = 24 ore		
FORMIGINE	17.440	4.699	-0.359	27.342	10.132	0.000	35.545	12.370	0.000	45.240	16.975	0.000	56.444	21.883	-0.052
CARPINETA	18.833	6.501	-0.123	24.949	7.316	-0.128	31.867	8.657	-0.055	40.871	11.312	-0.005	53.122	15.456	0.000
MONTEFIORINO	20.870	7.235	-0.129	27.160	7.827	-0.134	35.309	9.470	-0.052	45.540	12.560	0.000	57.669	16.847	0.000
MODENA ARPA	17.169	5.815	-0.034	25.058	7.515	-0.014	32.748	8.897	0.000	42.595	11.806	0.000	50.327	15.025	-0.013
FEBBIO	23.205	4.787	0.000	36.431	8.194	-0.017	52.504	10.710	-0.108	78.458	16.314	-0.080	100.346	25.717	0.000
LASTELLA	19.824	6.326	-0.347	26.001	9.348	-0.228	30.904	11.043	-0.134	39.396	14.173	-0.048	46.383	17.701	0.000
COLLAGNA	25.910	8.672	-0.183	43.212	12.152	-0.089	59.245	16.291	-0.019	81.796	22.722	0.000	100.602	29.996	-0.061
FARNETA	20.915	6.712	-0.040	27.310	6.130	-0.134	35.006	8.607	0.000	45.786	11.352	0.000	58.110	16.850	-0.018
LIGONCHIO	22.039	8.240	-0.316	36.368	10.390	-0.356	53.278	13.547	-0.230	74.814	23.101	-0.056	101.417	28.115	-0.034
SUCCISO	27.326	8.494	-0.251	45.311	14.073	-0.369	65.997	19.328	-0.344	95.768	26.859	-0.274	121.683	37.082	-0.241
PAVULLO	20.138	7.442	-0.002	28.135	7.974	-0.147	34.075	8.788	-0.205	44.314	13.177	-0.130	56.524	19.502	-0.117
PIEVEPELAGO	20.689	7.599	-0.021	35.052	12.893	0.000	52.060	17.957	0.000	69.834	27.129	-0.020	91.026	38.086	-0.027
FRASSINORO	17.830	6.865	-0.393	27.928	6.648	-0.344	37.932	10.456	-0.053	50.789	14.829	-0.041	63.674	21.631	0.000
CASTELNOVO NE' MONTI	20.017	7.095	-0.018	27.484	8.501	-0.098	34.061	8.208	-0.130	44.512	10.667	-0.009	58.186	12.831	0.000
BAISO	16.833	5.652	-0.173	23.110	7.326	-0.248	32.369	9.959	-0.045	44.434	13.107	-0.072	55.950	19.807	-0.036
CA DE' CAROLI	19.632	7.702	-0.004	26.396	9.291	-0.107	35.962	9.875	-0.055	44.609	11.491	-0.013	50.885	11.220	-0.247
CORREGGIO	19.908	7.237	-0.053	24.416	8.486	-0.092	30.414	9.323	-0.051	39.375	11.259	-0.036	50.279	14.737	-0.007

STAZIONE	ε	α	k	ε	α	k	ε	α	k	ε	α	k	ε	α	k
	D = 3 ore			D = 6 ore			D = 6 ore			D = 12 ore			D = 24 ore		
SASSOSTORNO	22.233	8.567	-0.118	30.272	9.497	-0.004	42.254	8.115	0.000	52.120	9.884	0.000	66.267	14.371	-0.013
CIVAGO	25.294	6.940	-0.127	41.696	14.191	-0.121	58.836	19.450	-0.046	88.259	26.599	0.000	126.943	37.498	0.000
POLINAGO	20.165	8.042	-0.149	27.173	8.709	-0.121	36.897	6.198	-0.046	45.160	5.743	0.000	54.588	10.567	0.000
PIANDELAGOTTI	21.587	7.338	-0.121	37.014	11.018	-0.141	55.194	16.199	0.000	78.885	22.593	0.000	105.981	30.868	0.000
RAMISETO	23.633	5.649	-0.069	33.680	10.352	-0.005	44.622	9.802	-0.081	58.139	13.341	-0.048	72.835	14.746	-0.023
S. VALENTINO	20.172	6.993	-0.129	24.814	7.151	-0.134	32.065	8.600	-0.052	42.840	11.816	0.000	53.895	15.744	0.000
OSPITALETTO	26.145	9.929	-0.048	45.523	14.888	-0.027	64.741	20.784	0.000	91.633	31.128	-0.002	116.267	40.982	-0.012
PREDOLO	17.275	5.531	-0.230	24.247	8.587	-0.047	30.080	8.090	-0.080	37.312	9.249	-0.048	47.348	11.611	0.000
VILLAMINOZZO	22.008	9.067	-0.155	29.011	8.450	-0.250	37.149	9.970	-0.075	48.995	11.169	0.000	60.363	11.425	0.000
SERRAMAZZONI	22.868	7.301	-0.074	28.798	7.997	-0.130	37.003	7.563	-0.060	48.445	9.950	0.000	56.832	13.427	-0.011
PONTECAVOLA	16.297	4.666	-0.278	21.000	5.836	-0.168	27.096	7.360	-0.023	36.930	8.886	0.000	47.824	10.619	0.000
SASSUOLO	16.544	4.534	-0.259	24.963	6.361	-0.046	32.064	7.857	-0.045	43.348	12.699	0.000	55.349	17.877	-0.047

Tabella 3.1.2 – Parametri caratteristici delle distribuzioni GEV, applicate alle piogge intense di durata 1, 3, 6, 12 e 24 ore, relativi alle stazioni ricadenti nell'area oggetto di interesse (aggiornamento dati osservati: anno 2018).

3.2. Linee segnalatrici di probabilità pluviometrica puntuali (Direttiva piena di progetto – P.A.I.) – Regularizzazione serie storiche dati di pioggia

Sono state individuate le curve di massima possibilità pluviometrica per piogge di durata $1 \div 24$ ore indicate dalla “*Direttiva piena di progetto*” del P.A.I, ricavate mediante regularizzazione dei dati di precipitazione riportati sugli *Annali Idrologici* pubblicati dal *Servizio Idrografico*.

Le stazioni pluviografiche considerate sono le più rappresentative sia dal punto di vista territoriale, sia perché dotate di una serie storica di registrazioni estesa. Nella successiva Tabella 3.2.1 sono indicate, per ciascuna delle stazioni considerate, le principali caratteristiche e l'estensione della serie storica dei dati di pioggia.

CODICE	STAZIONE	Bacino imbrifero	Altitudine [m s. m]	Anno inizio osservazioni	Anno fine osservazioni	Numero osservazioni
1921	LIGONCHIO	Secchia	928	1952	1986	28
1922	CASTELNUOVO MONTI	Secchia	730	1952	1986	24
1930	FARNETA C.LE	Secchia	380	1950	1986	24
1932	PIANDELAGOTTI	Secchia	1209	1952	1985	27
1937	PAVULLO NEL FRIGNANO	Secchia	682	1951	1986	31
1942	SASSUOLO	Secchia	121	1951	1985	24

Tabella 3.2.1 – Caratteristiche delle stazioni pluviometriche di riferimento individuate nella “Direttiva piena di progetto” del P.A.I.

Nella Tabella 3.2.2 sono riportati i valori dei parametri a ed n , indicati dalla Direttiva piena di progetto (P.A.I.), che definiscono le curve di possibilità climatica per le stazioni considerate con tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni, definite nella forma:

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

essendo:

h: altezza di precipitazione [mm];

t: tempo di pioggia [ore];

a, n: parametri.

CODICE	STAZIONE	Parametri	Tr = 20	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 500
1921	LIGONCHIO	a	41,99	53,66	58,36	65,21
		n	0,463	0,454	0,451	0,448
1922	CASTELNUOVO MONTI	a	39,49	50,62	55,38	61,65
		n	0,259	0,238	0,232	0,225
1930	FARNETA C.LE	a	38,17	47,99	52,25	57,74
		n	0,357	0,357	0,357	0,357
1932	PIANDELAGOTTI	a	45,88	59,11	64,77	72,24
		n	0,482	0,475	0,473	0,471
1937	PAVULLO NEL FRIGNANO	a	43,07	55,65	61,01	68,09
		n	0,336	0,334	0,334	0,333
1942	SASSUOLO	a	33,62	42,36	46,08	51,01
		n	0,375	0,374	0,373	0,373

Tabella 3.2.2 – Linee segnalatrici (Direttiva piena di progetto – P.A.I.).

3.3. Regionalizzazione delle precipitazioni (V.A.P.I. Progetto speciale per la Valutazione delle Piene in Italia)

Il Gruppo Nazionale per la Difesa dalle catastrofi idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche (GNDCI-CNR) ha portato avanti il Progetto V.A.P.I., sulla *Valutazione delle Piene in Italia*, al fine di predisporre una procedura uniforme sull'intero territorio nazionale, per la valutazione delle portate di piena naturali.

Obiettivo di tale rapporto è quello di fornire uno strumento ed una guida ai ricercatori ed ai tecnici operanti sul territorio, per comprendere i fenomeni coinvolti nella produzione delle portate di piena naturali e per effettuare previsioni sui valori futuri delle piene in una sezione di un bacino idrografico non regolato.

Nel 2001 è stato pubblicato il “*Rapporto sulla Valutazione delle piene – Italia Nord Occidentale – Portata al colmo di piena – Bacino del Fiume Po e Liguria Tirrenica – Estratto dal Rapporto Nazionale VAPI con aggiornamenti*”, a cura dei Prof. Carlo De Michele e Renzo Rosso, che contiene una sintesi delle indagini e delle ricerche effettuate con riferimento all'area territoriale corrispondente ai Compartimenti del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) di Parma e di Genova, che

comprende il bacino del Po, chiuso a Pontelagoscuro ed i bacini liguri con foce sul litorale tirrenico.

Con riferimento ai massimi annuali delle precipitazioni intense da 1 a 24 ore consecutive registrati dalle stazioni pluviometriche e pluviografiche del SIMN fino al 1986 (366 stazioni di misura con almeno 20 anni di osservazione ed una numerosità media di 34 anni), si è provveduto all'aggiornamento delle statistiche di pioggia intensa, per ogni stazione, utilizzando la distribuzione GEV (*Generalized Extreme Value*).

Stimati i parametri di forma, k , di scala, α e di posizione ε , della distribuzione di probabilità, risulta univocamente determinata la relazione tra il periodo di ritorno T_r e il fattore di crescita K_T :

$$K_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{K} \cdot (1 - e^{-k \cdot y_T})$$

dove y_T indica la variabile ridotta di Gumbel, funzione del periodo di ritorno T_r in anni:

$$y_T = -\ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right)$$

L'altezza di pioggia cumulata di assegnato tempo di ritorno viene calcolata mediante la relazione:

$$h_T(d) = m(d) \cdot K_T,$$

dove $m(d)$ è il valore atteso dell'altezza di pioggia massima annuale caduta in d ore consecutive, stimato mediante la seguente relazione:

$$m[h(d)] = a_1 \cdot d^n,$$

essendo a_1 ed n parametri stimati con regressione ai minimi quadrati nelle 366 stazioni di misura presenti sul territorio esaminato.

Nella successiva Tabella 3.3.1 sono riportati, per le stazioni ricadenti nell'area di interesse, i parametri caratteristici α , ε , e k della distribuzione di probabilità del

coefficiente di crescita ed i parametri a_1 ed n della legge di variabilità della media del massimo annuale dell'altezza di pioggia su una fissata durata d .

STAZIONE	ϵ	α	k	a_1	n
LIGONCHIO	0.851	0.247	-0.028	25.2	0.463
PAVULLO	0.805	0.277	-0.115	23.9	0.352
PIANDELAGOTTI	0.83	0.28	-0.029	26.7	0.5
SASSUOLO	0.853	0.24	-0.036	20.8	0.37

Tabella 3.3.1 – Parametri caratteristici stazioni rapporto V.A.P.I.

3.4. Confronto precipitazioni

Nelle successive Figure 3.4.1÷3.4.3 è rappresentato, in forma grafica, il confronto, in corrispondenza di un set di stazioni rappresentative ubicate nel bacino imbrifero del fiume Secchia, tra le altezze di pioggia calcolate utilizzando le differenti metodologie di stima descritte nei precedenti paragrafi, per una durata pari a 12 ore e per differenti tempi di ritorno (20, 100, 200 anni).

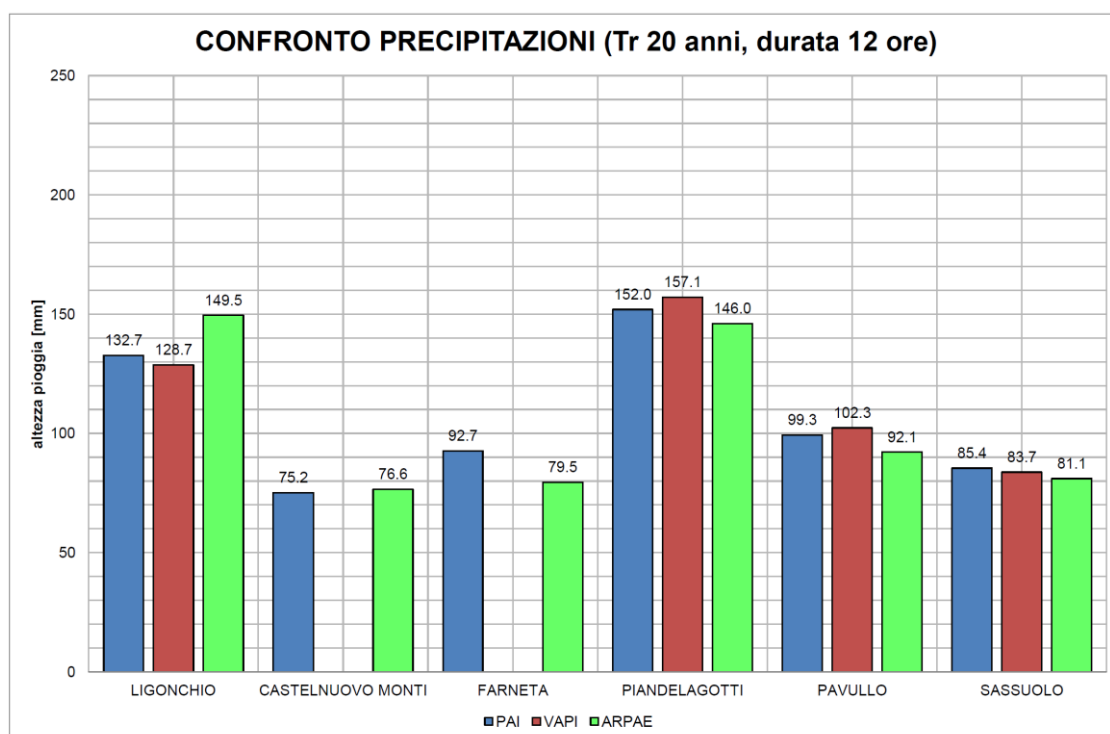


Figura 3.4.1 – Confronto precipitazioni (d = 12 ore, TR = 20 anni).

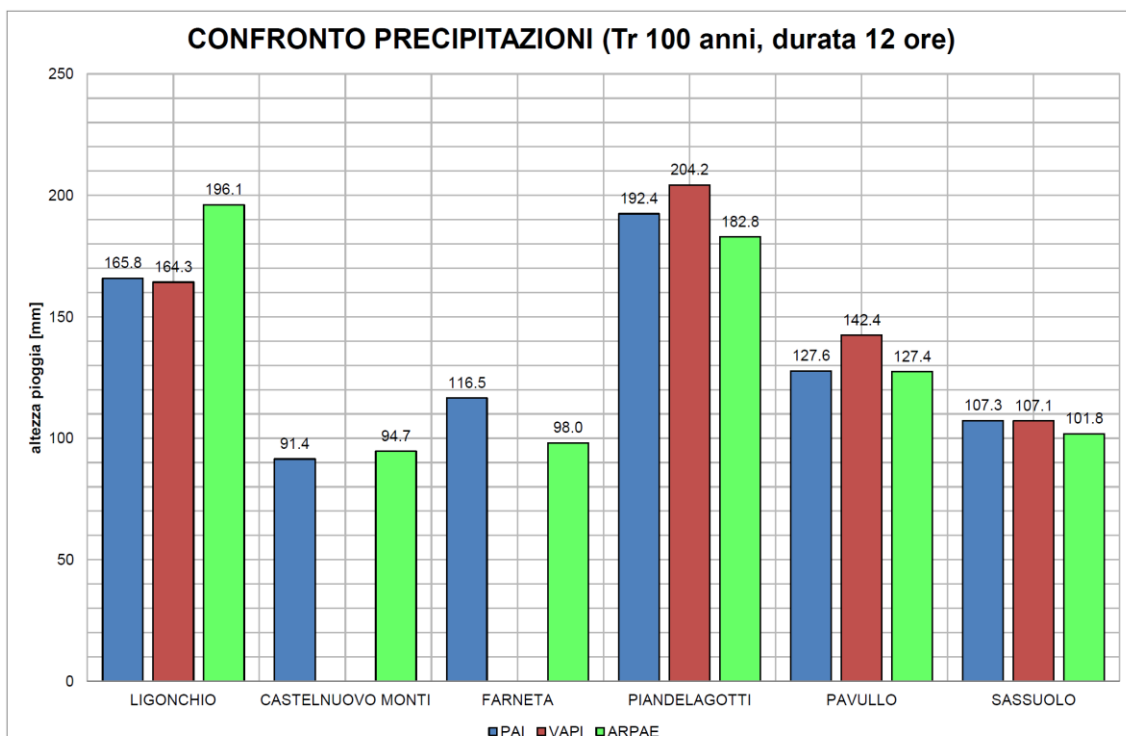


Figura 3.4.2 – Confronto precipitazioni (d = 12 ore, TR = 100 anni).

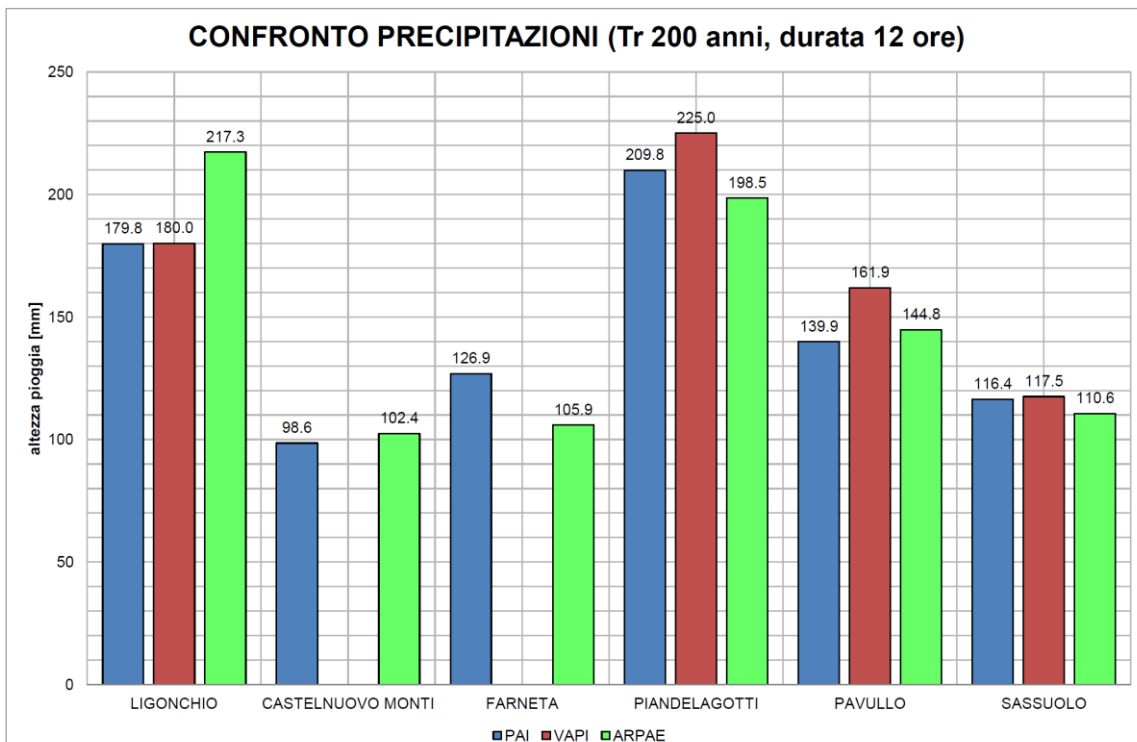


Figura 3.4.3 – Confronto precipitazioni (d = 12 ore, TR = 200 anni).

Dall'analisi dei dati riportati nella precedenti Figure si evince come, per le stazioni considerate, le altezze di pioggia ricavate sulla base delle funzioni di distribuzione di probabilità calcolate da Arpae a seguito dell'aggiornamento della statistica delle precipitazioni intense, forniscano valori di pioggia molto simili alle altezze ricavate mediante applicazione delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica puntuali indicate dal P.A.I.; si riscontra anche, mediamente, un buon adattamento con le altezze di pioggia ricavate applicando le metodologie individuate nel Progetto V.A.P.I.

4. VALUTAZIONE DEGLI IDROGRAMMI DI PIENA

Gli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno (20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni) del fiume Secchia alla sezione di ingresso del manufatto di laminazione sono stati stimati mediante applicazione delle seguenti metodologie:

- confronto con risultati di studi pregressi sul fiume Secchia:
 - Progetto “*Adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia in località Rubiera (RE) e Campogalliano (MO) alle attuali esigenze idrauliche ed alle norme del D.P.R. 1 novembre 1959 n° 1363 e successive (Regolamento Dighe)*” (Ministero dei lavori pubblici – Magistrato per il Po – Parma - 1991);
 - “*Studio idrologico ed idraulico del sistema fluviale asta del Secchia – Cassa di espansione di Rubiera a monte della città di Modena*” (Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambiente e del Rilevamento - 1999);
 - “*Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Secchia nel tratto da Lugo alla confluenza in Po*” (Autorità di bacino del fiume Po – 2007);
 - Progetto “*MO-E-1357 – Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell’adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa di espansione esistente; MO-E-1273 – Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia nel Comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero – RER – Parte A)*” (Agenzia Interregionale per il Fiume Po – 2019).
- implementazione di un modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi mediante applicazione del codice di calcolo HEC-HMS.

4.1. Progetto “Adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia in località Rubiera (RE) e Campogalliano (MO) alle attuali esigenze idrauliche ed alle norme del D.P.R. 1 novembre 1959 n° 1363 e successive (Regolamento Dighe)” (Ministero dei lavori pubblici – Magistrato per il Po – Parma - 1991)”

Nell’ambito del progetto di “Adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia in località Rubiera (RE) e Campogalliano (MO) alle attuali esigenze idrauliche ed alle norme del D.P.R. 1 novembre 1959 n° 1363 e successive (Regolamento Dighe)”, è stato predisposto uno studio idrologico del bacino del fiume Secchia che ha condotto, mediante l’applicazione del metodo dell’idrogramma unitario, alla definizione delle onde di piena di assegnato tempo di ritorno, per differenti durate di precipitazione, alla sezione di ingresso del manufatto di laminazione.

Nelle successive Figure 4.1.1÷4.1.3 si riportano le onde di piena corrispondenti a tempi di ritorno di 20, 50 e 100 anni e ad una durata di precipitazione pari a 12 ore, *durata critica agli effetti della laminazione*, calcolate nello studio predisposto dal Magistrato per il Po.

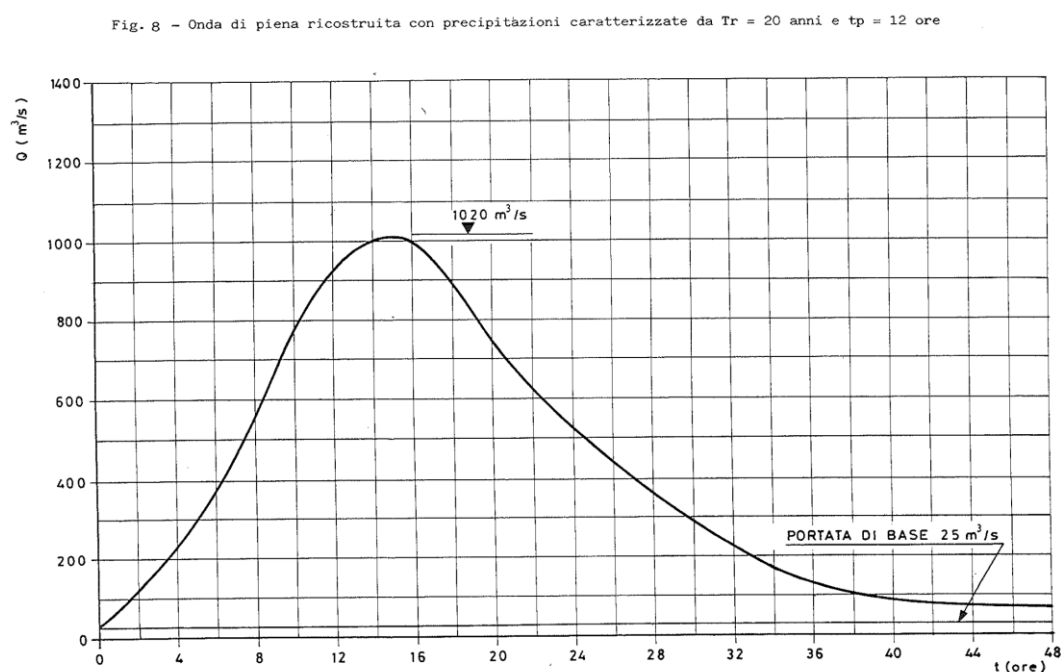


Figura 4.1.1 – Ondata di piena ricostruita con precipitazioni caratterizzate da $T_r = 20$ anni e durata di pioggia 12 ore.

Fig. 8 - Onda di piena ricostruita con precipitazioni caratterizzate da $T_r = 20$ anni e $t_p = 12$ ore

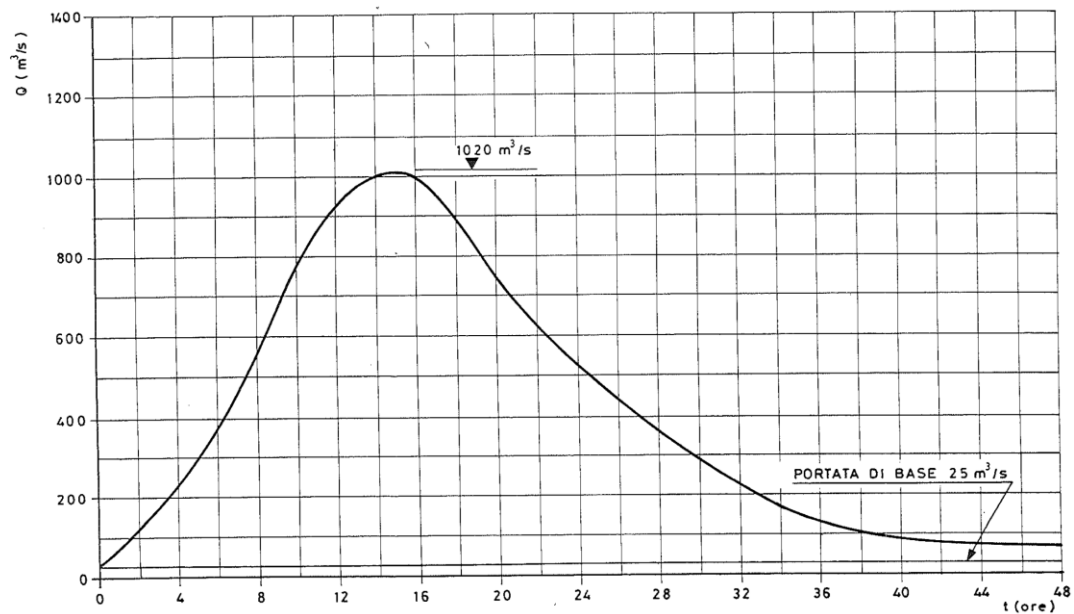


Figura 4.1.2 – Onda di piena ricostruita con precipitazioni caratterizzate da $T_r = 50$ anni e durata di pioggia 12 ore.

Fig. 4 - Confronto fra le onde di piena centenarie ricostruite ($t_p = 12$ ore) in diversi corsi d'acqua emiliani (Enza Parma e Secchia)

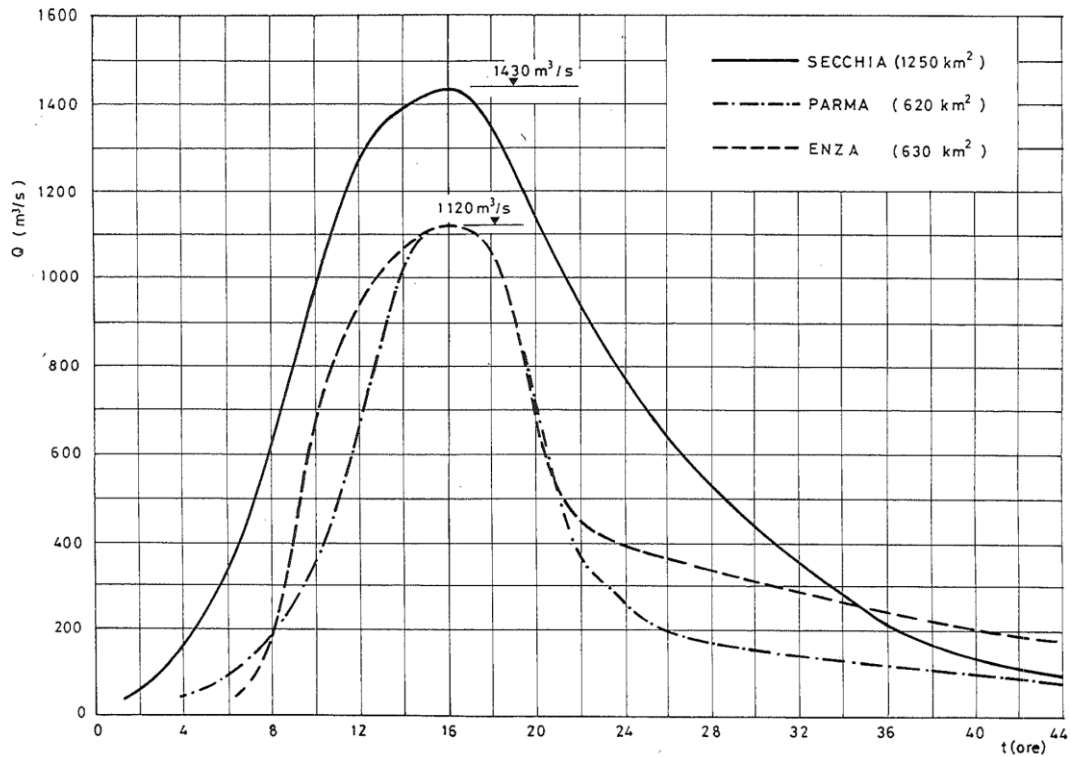


Figura 4.1.3 – Onda di piena ricostruita con precipitazioni caratterizzate da $T_r = 100$ anni e durata di pioggia 12 ore.

4.2. “Studio idrologico ed idraulico del sistema fluviale asta del Secchia – Cassa di espansione di Rubiera a monte della città di Modena” (Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambiente e del Rilevamento - 1999);

Nell’ambito dello “Studio idrologico ed idraulico del sistema fluviale asta del Secchia – Cassa di espansione di Rubiera a monte della città di Modena”, commissionato dall’Autorità di Bacino del Fiume Po al Politecnico di Milano, è stato predisposto uno studio idrologico del bacino del fiume Secchia che ha condotto alla definizione degli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 e 200 anni) alla sezione di ingresso al manufatto di laminazione, in località Rubiera.

Per lo studio sono stati utilizzati gli idrogrammi di piena dei maggiori eventi storici registrati alla stazione idrometrica di Ponte Bacchello prima dell’entrata in funzione della cassa di laminazione. Sono state determinate le onde di piena sintetiche alla stazione di Ponte Bacchello e, mediante una procedura di *de-laminazione* sono state ricavate le onde di piena sintetiche alla sezione di ingresso della cassa di espansione di Rubiera.

Nella successiva Figura 4.2.1 sono rappresentate le onde di piena di assegnato tempo di ritorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 e 200 anni) calcolate nello studio predisposto dal Politecnico di Milano alla sezione di ingresso della cassa di espansione di Rubiera.

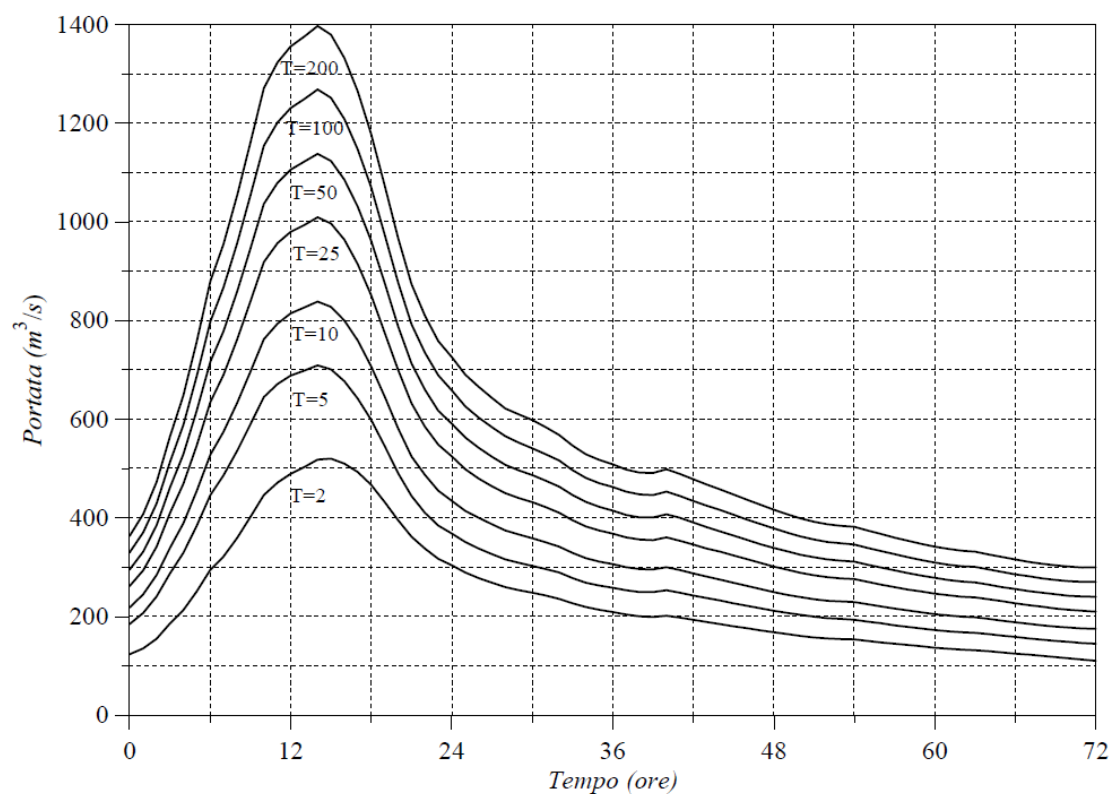


Figura 4.2.1 – Onde di piena sintetiche alla sezione della cassa di Rubiera.

4.3. “Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Secchia nel tratto da Lugo alla confluenza in Po” (Autorità di bacino del fiume Po – 2007);

Nell’ambito dello “*Studio idrologico ed idraulico del sistema fluviale asta del Secchia – Cassa di espansione di Rubiera a monte della città di Modena*”, commissionato dall’Autorità di Bacino del Fiume Po a Beta Studio s.r.l. nel quadro dell’attività 3-2-1 del P.A.I. “*Definizione delle portate di piena di riferimento*”, è stato predisposto uno studio idrologico del bacino del fiume Secchia che ha condotto alla definizione degli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno in corrispondenza di sezioni significative del corso d’acqua, *al fine di effettuare l’analisi del comportamento attuale del corso d’acqua e per la definizione dell’assetto di progetto dello stesso*.

Ai fini della valutazione degli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno, è stato implementato un modello idrologico afflussi-deflussi, tarato sulla base di eventi gravosi che si sono verificati sul bacino del fiume Secchia sino all’anno 2000, mediante l’utilizzo del software HEC-HMS. Il bacino imbrifero del fiume Secchia è stato suddiviso in sottobacini: Castellarano, IB5 (Interbacino 5), IB6 (Interbacino 6), Fosso Spezzano e Tresinaro.

Sono stati ricostruiti, a partire da dati pluviometrici aventi la stessa probabilità di accadimento, ed estratti dagli elaborati della *Direttiva sulla piena di progetto del P.A.I.*, (Linee segnalatrici di probabilità pluviometrica puntuali e Distribuzione spaziale delle precipitazioni intense - kriging) gli idrogrammi di piena per eventi con tempo di ritorno di 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni in alcune sezioni significative dell’asta del fiume Secchia (Castellarano, Sassuolo e Rubiera).

Gli idrogrammi di assegnato tempo di ritorno sono stati stimati per durate di pioggia di 12 e 24 ore, che determinano, rispettivamente, la massima portata al colmo ed il massimo volume sopra la soglia di $750 \text{ m}^3/\text{s}$, corrispondente alla portata di progetto del tratto arginato a valle della cassa di espansione.

Con particolare riferimento alla sezione di Rubiera, si specifica come il contributo del torrente Tresinaro sia stato definito sulla base di un approccio di tipo statistico e come si sia tenuto conto dell’effetto di laminazione nel tratto compreso tra Castellarano e Rubiera mediante la predisposizione di un modello bidimensionale di propagazione dell’idrogramma ottenuto alla sezione di Castellarano con il software SOBEK Channel Flow – Overland Flow di WL [Delft Hydraulics].

Nelle successive Figure 4.3.1÷4.3.8 sono rappresentate le onde di piena di assegnato tempo di ritorno (20, 100, 200, 500 anni) calcolate nello studio predisposto da Beta Studio s.r.l. alla sezione di ingresso della cassa di espansione di Rubiera.

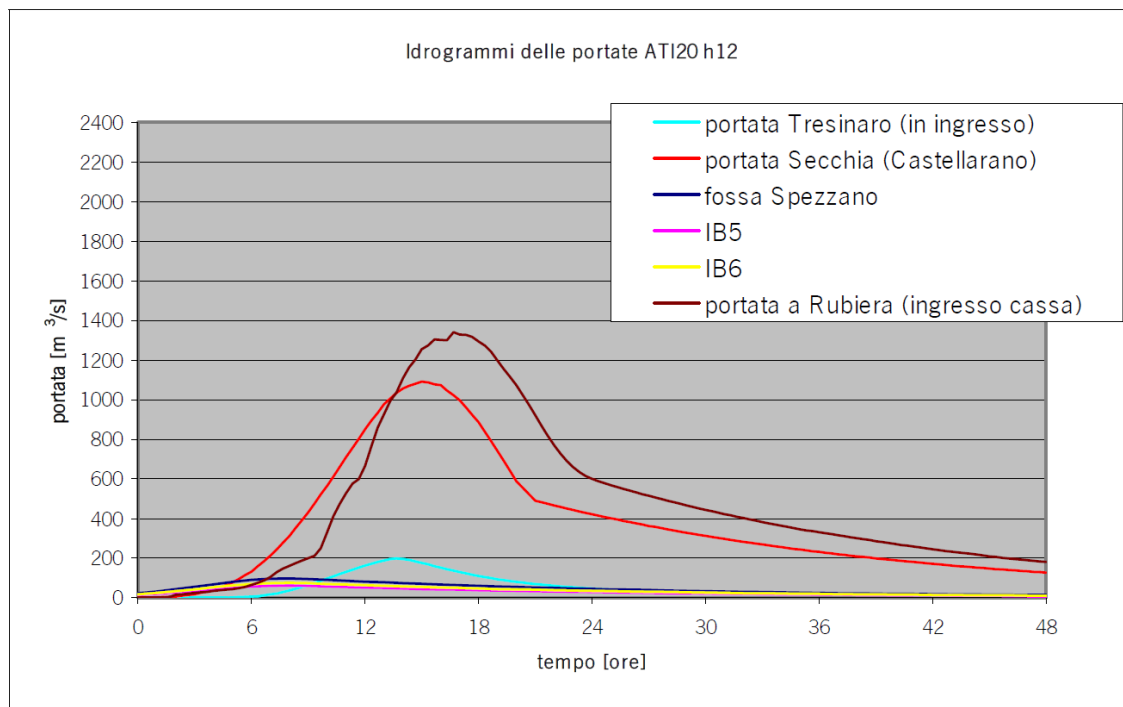


Figura 4.3.1 – Idrogramma di piena ottenuto a partire da precipitazioni caratterizzate da $T_r = 20$ anni e durata di pioggia 12 ore.

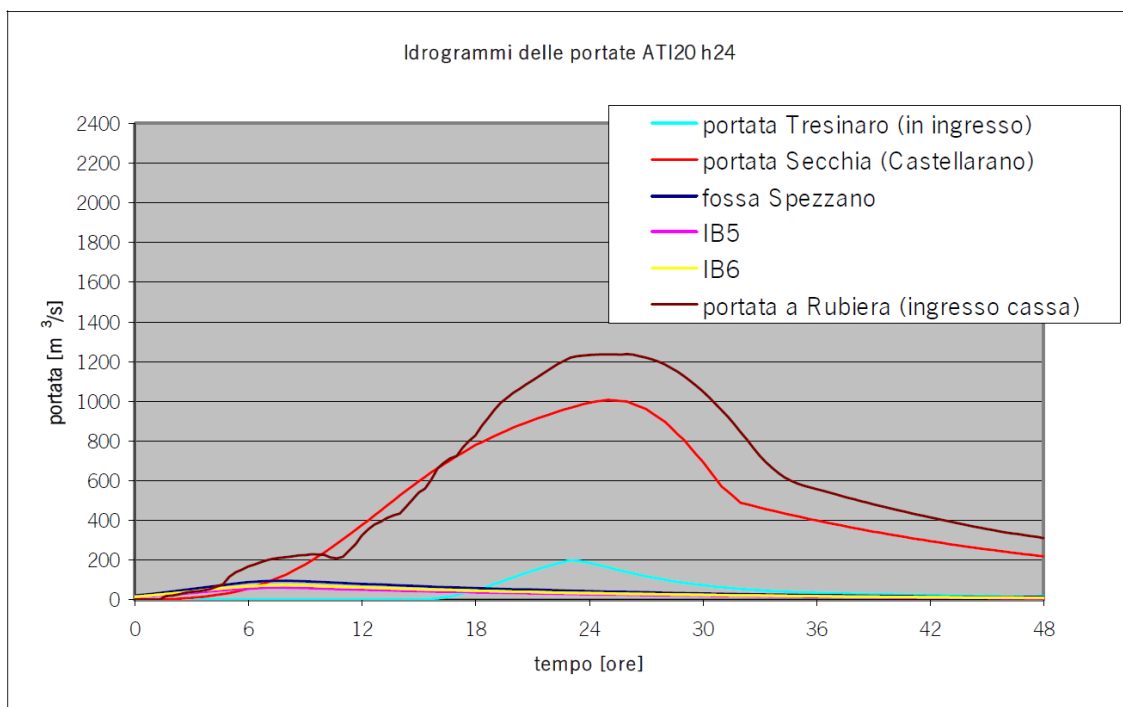


Figura 4.3.2 – Idrogramma di piena ottenuto a partire da precipitazioni caratterizzate da $T_r = 20$ anni e durata di pioggia 24 ore.

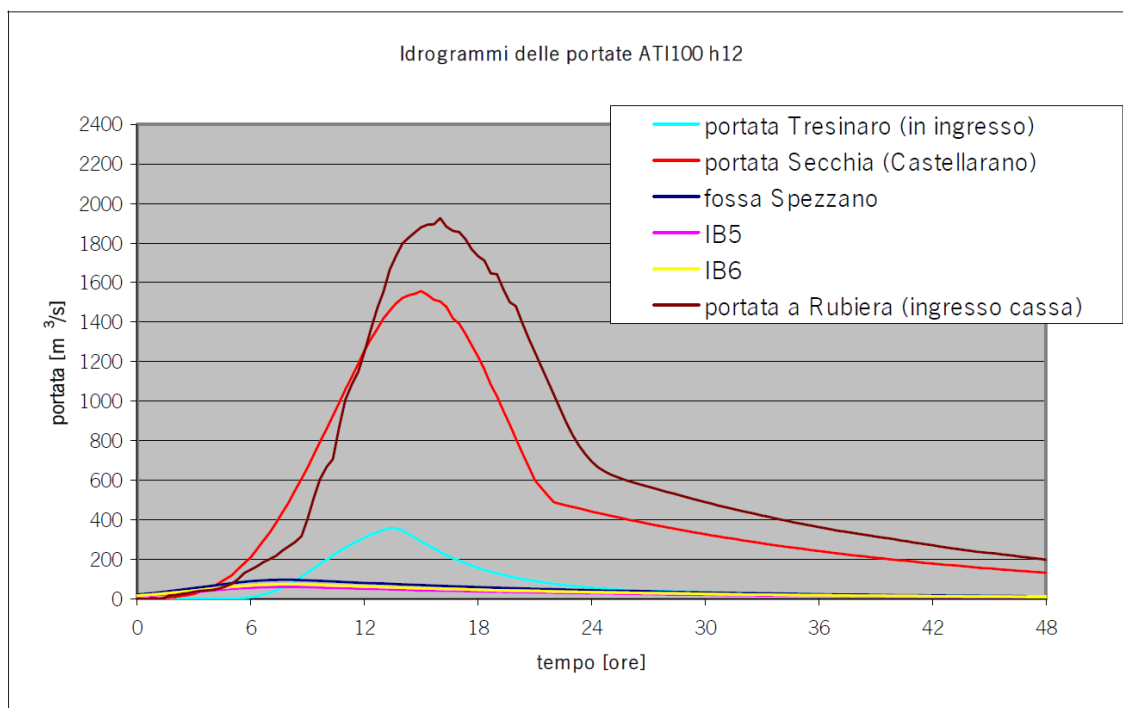


Figura 4.3.3 – Idrogramma di piena ottenuto a partire da precipitazioni caratterizzate da $T_r = 100$ anni e durata di pioggia 12 ore.

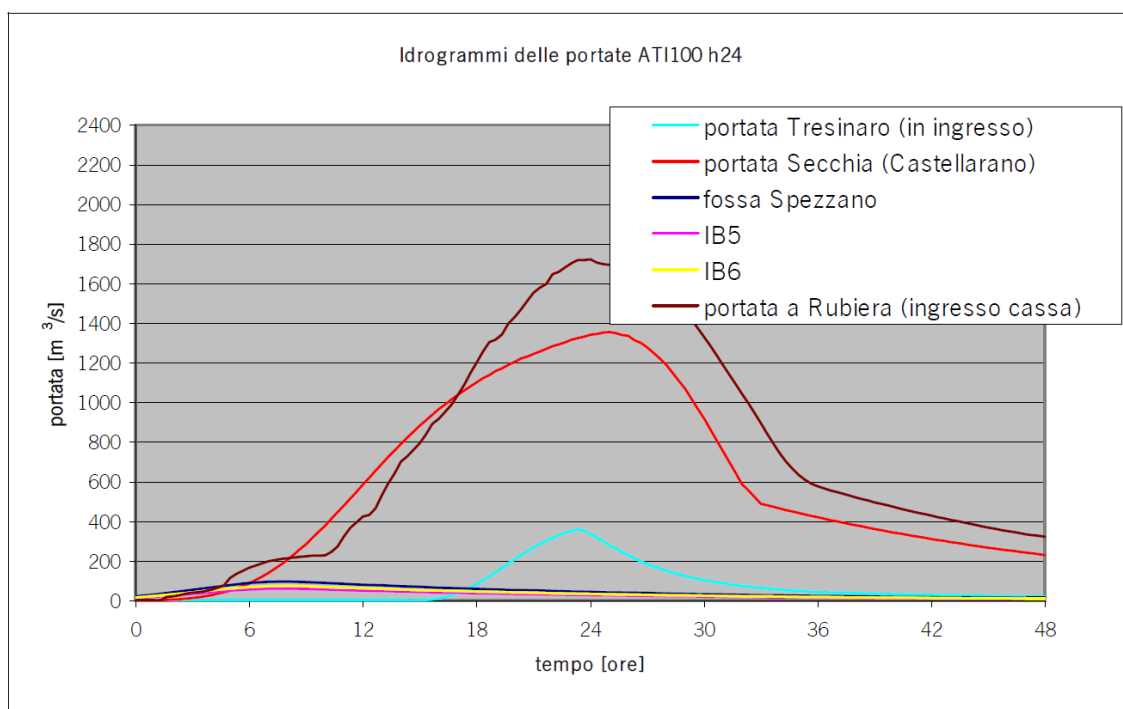


Figura 4.3.4 – Idrogramma di piena ottenuto a partire da precipitazioni caratterizzate da $T_r = 100$ anni e durata di pioggia 24 ore.

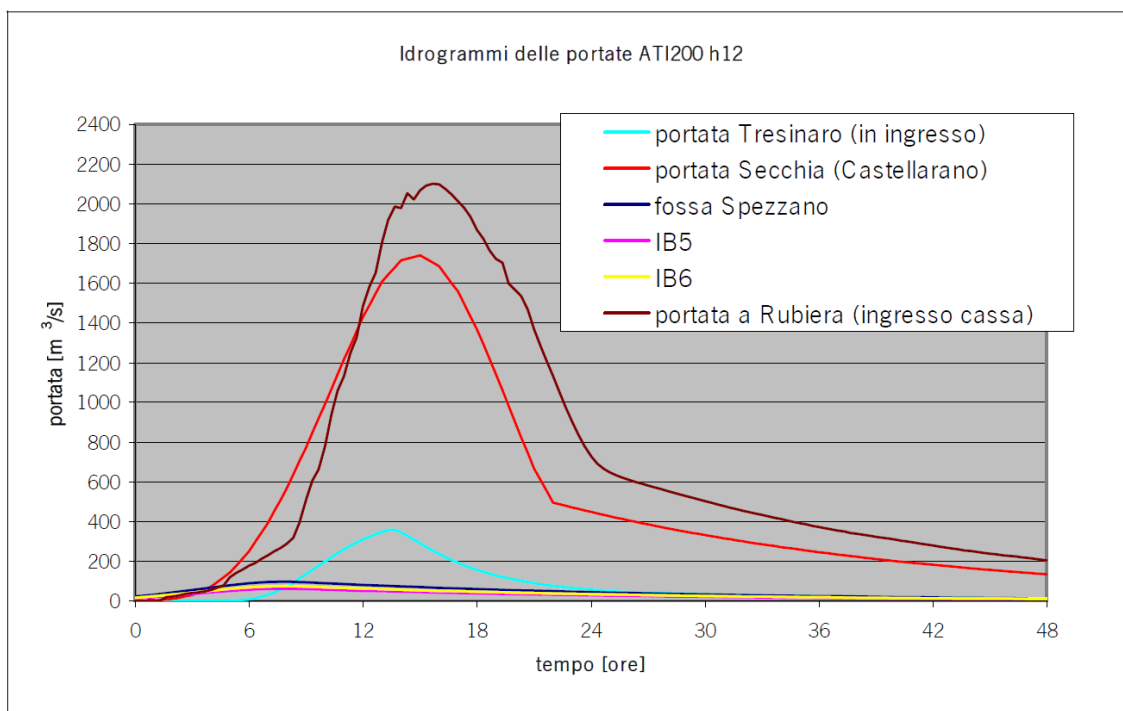


Figura 4.3.5 – Idrogramma di piena ottenuto a partire da precipitazioni caratterizzate da $Tr = 200$ anni e durata di pioggia 12 ore.

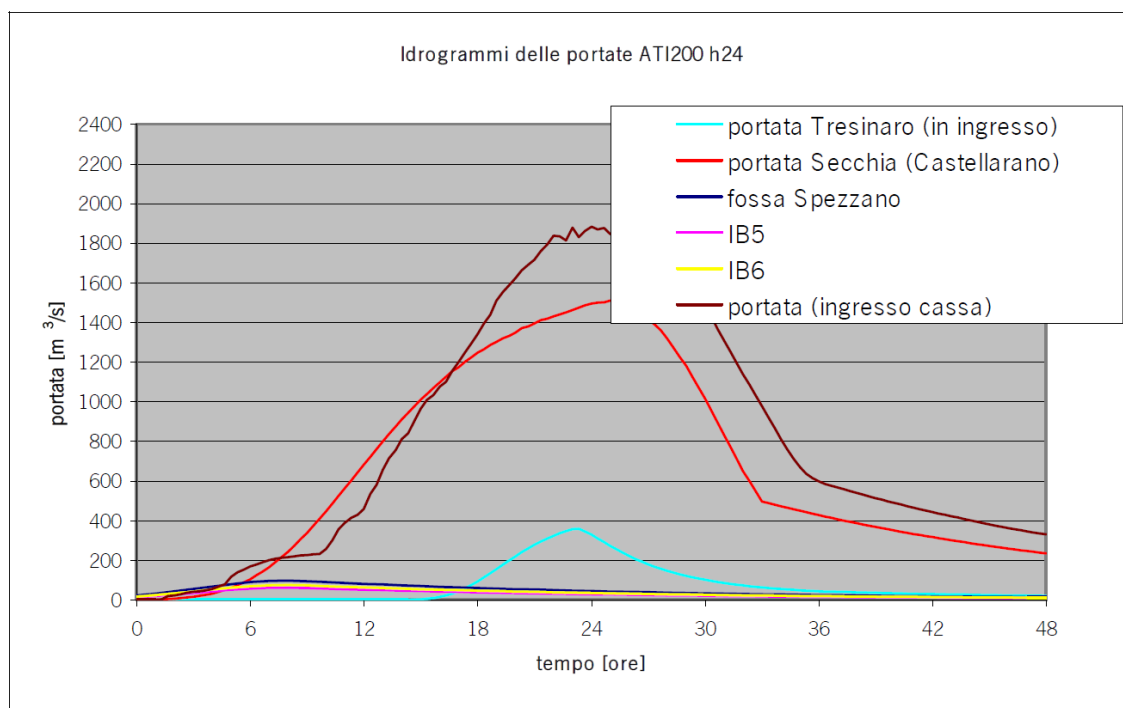


Figura 4.3.6 – Idrogramma di piena ottenuto a partire da precipitazioni caratterizzate da $Tr = 200$ anni e durata di pioggia 24 ore.

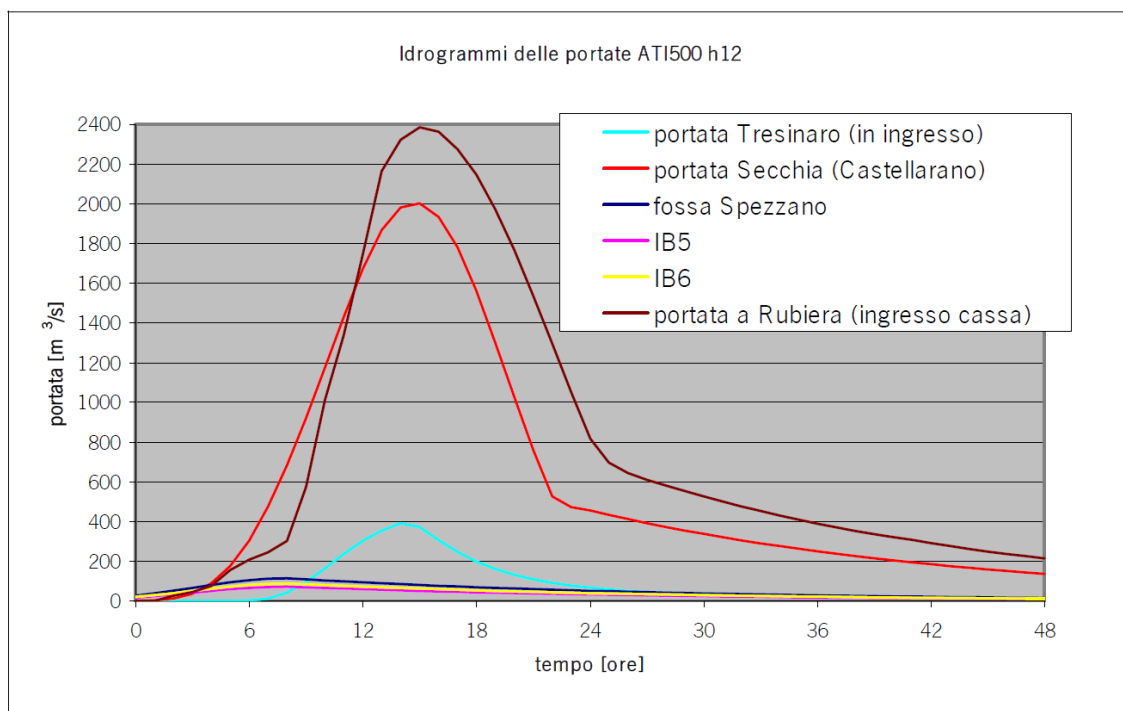


Figura 4.3.7 – Idrogramma di piena ottenuto a partire da precipitazioni caratterizzate da $Tr = 500$ anni e durata di pioggia 12 ore.

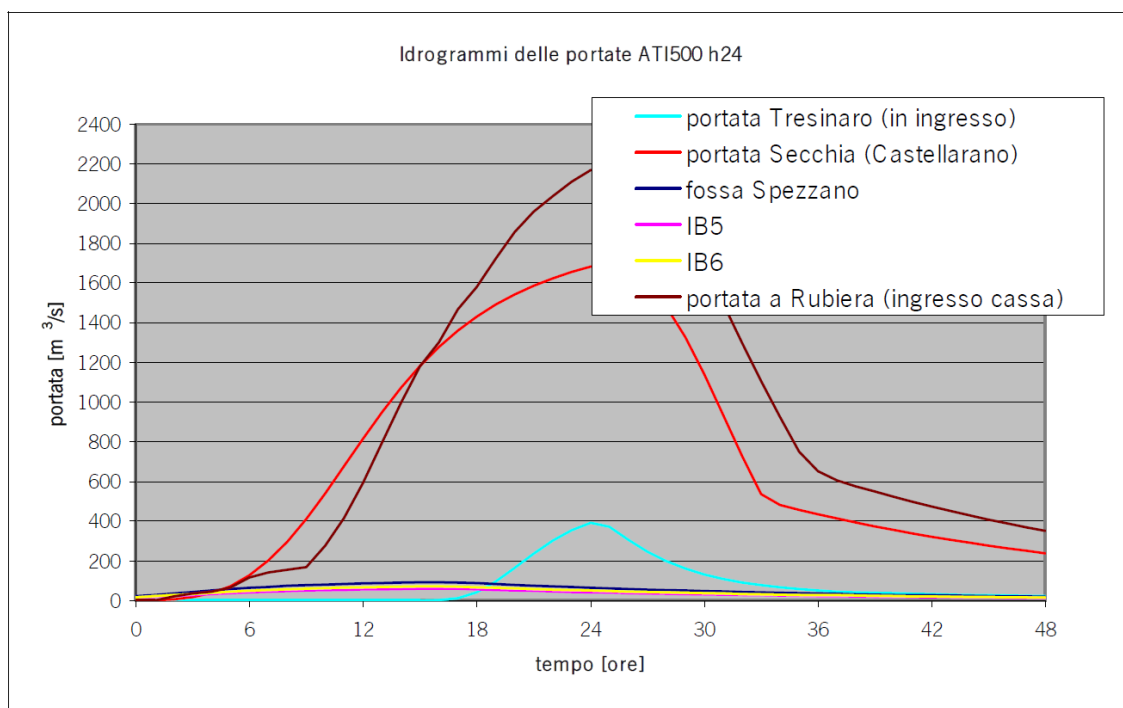


Figura 4.3.7 – Idrogramma di piena ottenuto a partire da precipitazioni caratterizzate da $Tr = 500$ anni e durata di pioggia 24 ore.

4.4. Progetto “MO-E-1357 – Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell’adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa di espansione esistente; MO-E-1273 – Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia nel Comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero – RER – Parte A” (Agenzia Interregionale per il Fiume Po – 2019).

Nell’ambito del progetto “MO-E-1357 – Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell’adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa di espansione esistente; MO-E-1273 – Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia nel Comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero – RER – Parte A”, è stata predisposta una relazione idrologica che effettua una sintesi critica degli studi pregressi che negli anni si sono susseguiti sul F. Secchia ed individua gli idrogrammi di riferimento da adottare per le analisi idrauliche.

Il progettista ha specificato che *secondo le disposizioni del committente, nell’ottica di mantenere un’omogeneità con quanto assunto a valle per la progettazione degli argini di contenimento (Art 2017) – nonché perfetta aderenza alla pianificazione vigente, per il dimensionamento delle opere di cui al presente progetto sono stati scelti come idrogrammi di riferimento quelli calcolati nell’ambito dello Studio di fattibilità del 2007 da Beta Studio per la sezione di Rubiera (monte cassa d’espansione).*

Nelle successive Figure 4.4.1 e 4.4.2 si riportano gli idrogrammi di piena per i tempi di ritorno di riferimento (20, 100, 200 e 500 anni), calcolati per durate di precipitazione 12 e 24 ore poiché la prima durata massimizza il valore della portata di picco, mentre la seconda il volume sotteso dall’onda di piena.

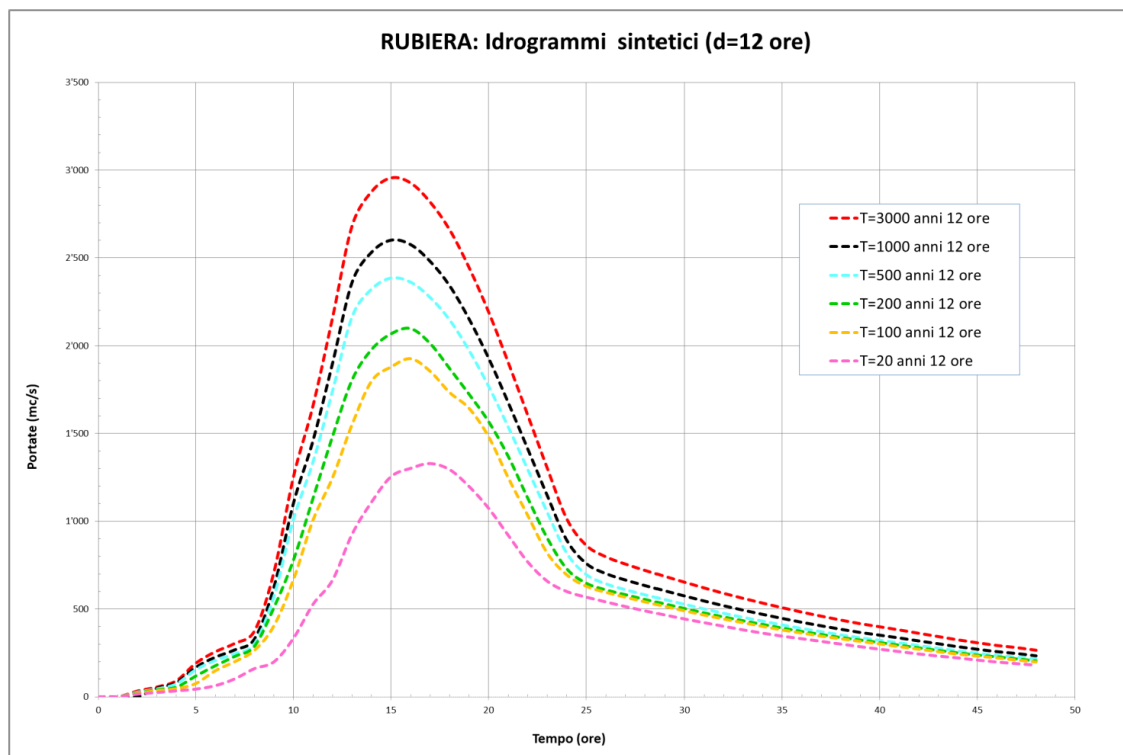


Figura 4.4.1 – Idrogrammi di piena ottenuti a partire da precipitazioni caratterizzate da durata di pioggia 12 ore.

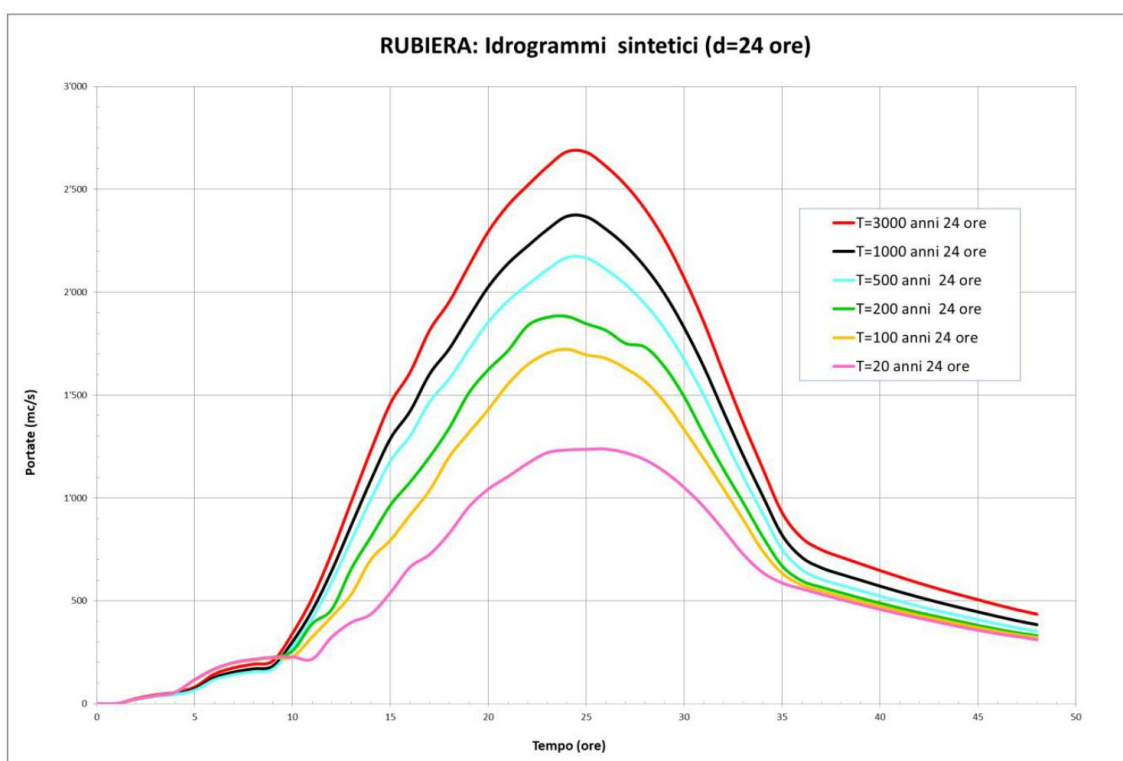


Figura 4.4.2 – Idrogrammi di piena ottenuti a partire da precipitazioni caratterizzate da durata di pioggia 24 ore.

4.5. Modello idrologico di trasformazione afflussi - deflussi

La formazione di una piena in corrispondenza della sezione di chiusura di un bacino imbrifero è determinata dalla sovrapposizione di due differenti fenomeni:

- trasformazione degli afflussi meteorici sul bacino imbrifero sotteso, in deflussi superficiali nella rete idrografica;
- traslazione e composizione dell'onda di piena nel reticolo idrografico, sino alla sezione di chiusura del bacino.

Il fenomeno di trasformazione afflussi-deflussi è condizionato dall'effetto dovuto a perdite per infiltrazione, presenza di piccoli invasi superficiali, perdite per evapotraspirazione, capacità di intercettazione della vegetazione, etc. La morfologia del bacino e la geometria della rete idrografica determinano invece il ritardo tra afflusso meteorico e deflusso superficiale.

I modelli idrologici di trasformazione afflussi-deflussi consentono, mediante applicazione di relazioni matematiche correlate, di descrivere – sebbene in maniera semplificata – la fase terrestre del ciclo dell'acqua.

Il Servizio idrografia e idrologia regionale e distretto Po di Arpa-SIMC garantisce il funzionamento del sistema di modellistica idrologica e idraulica (**FEWS PO – Flood Early Warning System Po**), sistema per la **gestione di dati e modellistica in tempo reale**, sviluppato ai fini della previsione idrologica e idraulica, in supporto ai sistemi di allertamento e di governo delle piene.

Le previsioni delle piene, per ciascun bacino idrografico, viene effettuata mediante tre catene modellistiche che operano in parallelo e con modalità di funzionamento “in continuo”. Ciascuna catena è costituita da un modello idrologico afflussi-deflussi che simula la risposta dei bacini imbriferi alla pioggia (software: Mike 11-NAM, **HEC-HMS**, Topkapi) e da un modello idraulico collegato in cascata per la previsione della propagazione delle piene fluviali (software: Mike11-HD, HEC-RAS e Sobek). Tutte le catene sono alimentate da dati osservati idrometeorologici (precipitazioni, temperature) e da prodotti meteorologici previsionali (Modello Cosmo Lami, etc...).

Nella successiva Figura 4.5.1 è rappresentato lo schema concettuale che descrive le catene modellistiche operative nel sistema FEWS PO.

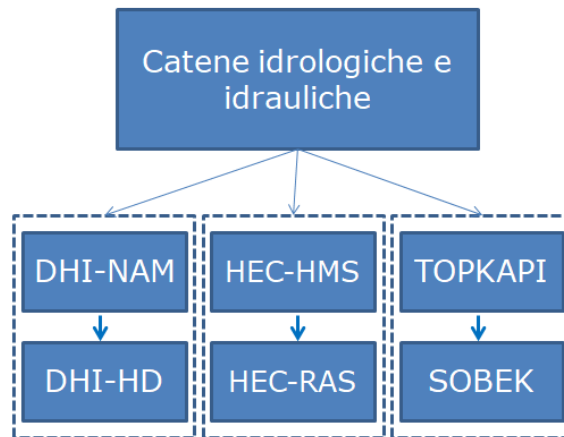


Figura 4.5.1 – Catene idrologiche – idrauliche operative nel sistema FEWS PO.

Lo studio idrologico in oggetto è stato effettuato utilizzando il codice di calcolo HEC-HMS, a partire dal modello idrologico del fiume Secchia chiuso alla sezione di ingresso del manufatto di laminazione di Rubiera, estratto dalla versione più aggiornata della catena modellistica HEC-HMS – HEC-RAS operativa nel sistema **FEWS PO** (aggiornamento anno 2015).

A partire dallo schema del fiume Secchia alla sezione di chiusura in corrispondenza della stazione idrometrica di Secchia a Rubiera SS9, considerata con buona approssimazione coincidente con la sezione di ingresso al manufatto di laminazione, è stato costruito un modello idrologico afflussi-deflussi, secondo lo schema rappresentato nella seguente Figura 4.5.2. L’implementazione del modello è stata articolata secondo le seguenti fasi:

- analisi dello schema di calcolo e dei parametri di taratura del modello idrologico operativo “in continuo” nel sistema FEWS PO;
- parziale revisione dello schema di calcolo al fine di adeguare il funzionamento della catena modellistica idrologica, originariamente concepita per operare “in continuo”, all’uso “in tempo differito”, con particolare riferimento al metodo di simulazione delle perdite idrologiche;
- individuazione dei parametri di calibrazione del modulo di trasformazione afflussi-deflussi, con riferimento alla verifica (in termini di forma e volume) degli idrogrammi di piena osservati nella stazione di Rubiera SS9 durante alcuni eventi gravosi verificatisi nel bacino del fiume Secchia dal 2005 al 2015;
- taratura del modello ai fini della verifica delle portate al colmo di piena, stimate per un tempo di ritorno di 100 anni mediante *analisi di frequenza di tipo regionale* applicando, i modelli *RoI-TCEV* e *RoI-GEV*, così come descritto nel Capitolo 2 della presente relazione.

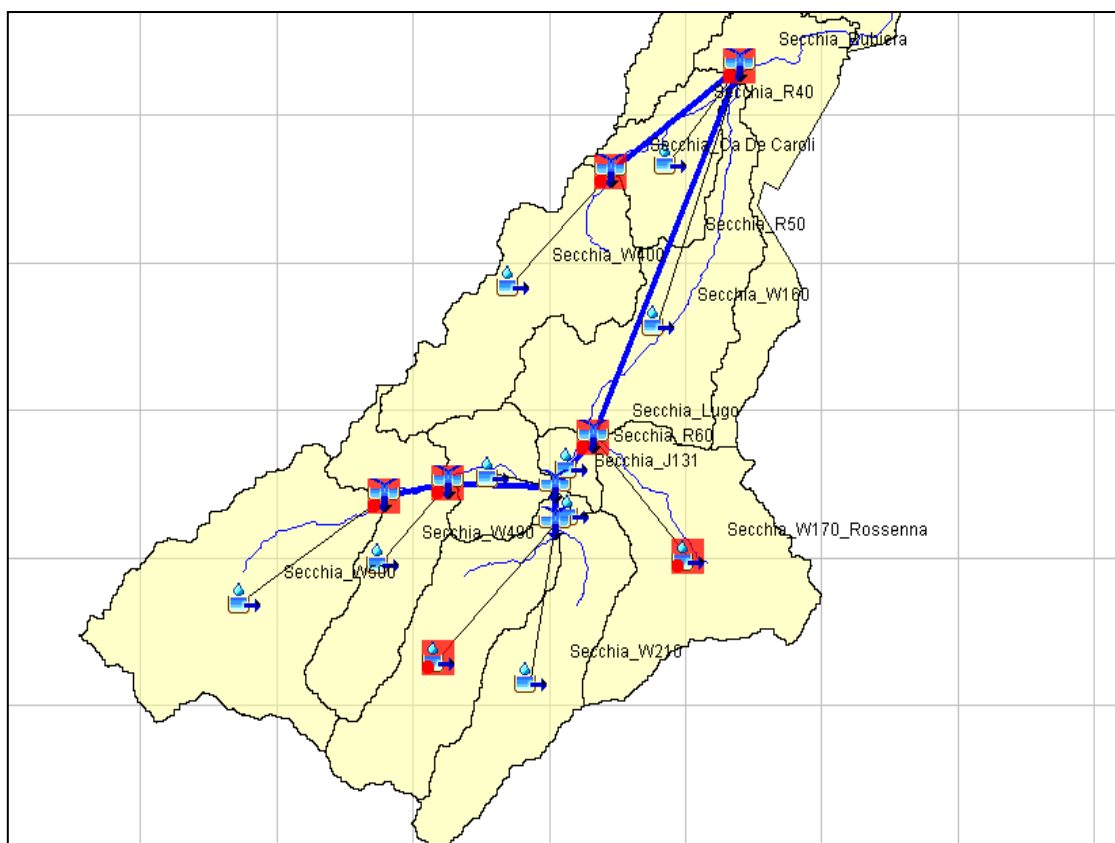


Figura 4.5.2 – Schema bacino imbrifero fiume Secchia alla sezione di Rubiera.

Il bacino imbrifero del fiume Secchia è stato suddiviso in sottobacini, denominati *Secchia_W390*, *Secchia_W180*, *Secchia_W170_Rossenna*, *Secchia_W200*, *Secchia_W440*, *Secchia_W220*, *Secchia_W440*, *Secchia_W220_PonteDolo*, *Secchia_W210*, *Secchia_W490*, *Secchia_W500*, *Secchia_W160*, *Secchia_W400*, considerati per un confronto con la sezione del Secchia alla sezione di ingresso al manufatto di laminazione, per cui sono disponibili valori di portata al colmo stimati mediante *analisi di frequenza di tipo regionale* applicando, i modelli *RoI-TCEV* e *RoI-GEV*.

Caratteristiche morfologiche del bacino del fiume Secchia alla sezione di ingresso al manufatto di laminazione

La morfologia, la copertura vegetale, la geologia, la pedologia, la permeabilità dei terreni, l'acclività dei versanti, la densità e la geometria della rete di drenaggio, l'uso del suolo rappresentano i principali fattori che influenzano il fenomeno della trasformazione afflussi-deflussi.

Nella successiva Tabella 4.5.1 sono riportate le caratteristiche morfologiche del bacino in esame: l'area del bacino (S), la lunghezza (L), la pendenza (i) dell'asta principale, la pendenza dei versanti (y), la quota massima (H_{\max}), minima (H_{sez}) e media (H_{med}) del bacino.

La pendenza media dell'asta principale è stata calcolata con riferimento alla seguente formula di Fornari:

$$\sqrt{i} = \frac{L}{\sum \frac{L_i}{\sqrt{i_i}}}$$

dove:

i_i : pendenza media dell'i-esimo tratto;

L_i : lunghezza i-esimo tratto.

La pendenza dei versanti y è stata invece calcolata con riferimento alla formula di Horton:

$$y = \frac{e \cdot \sum l_i}{A}$$

dove:

e: equidistanza;

l_i : lunghezza dell'i-esima curva di livello;

A: area bacino.

BACINO	S (km ²)	L (km)	H_{\max} (m s.m.)	H_{med} (m s.m.)	H_{sez} (m s.m.)	i (%)	y (%)
Fiume Secchia alla sezione di ingresso del manufatto di laminazione	1.303	80,4	2.121	693	33	0,9	29

Tabella 4.5.1 – Caratteristiche morfologiche bacino in esame.

Nelle successive Figura 4.5.3 e 4.5.4 sono riportati i grafici rappresentativi delle caratteristiche morfologiche del bacino imbrifero oggetto di studio.

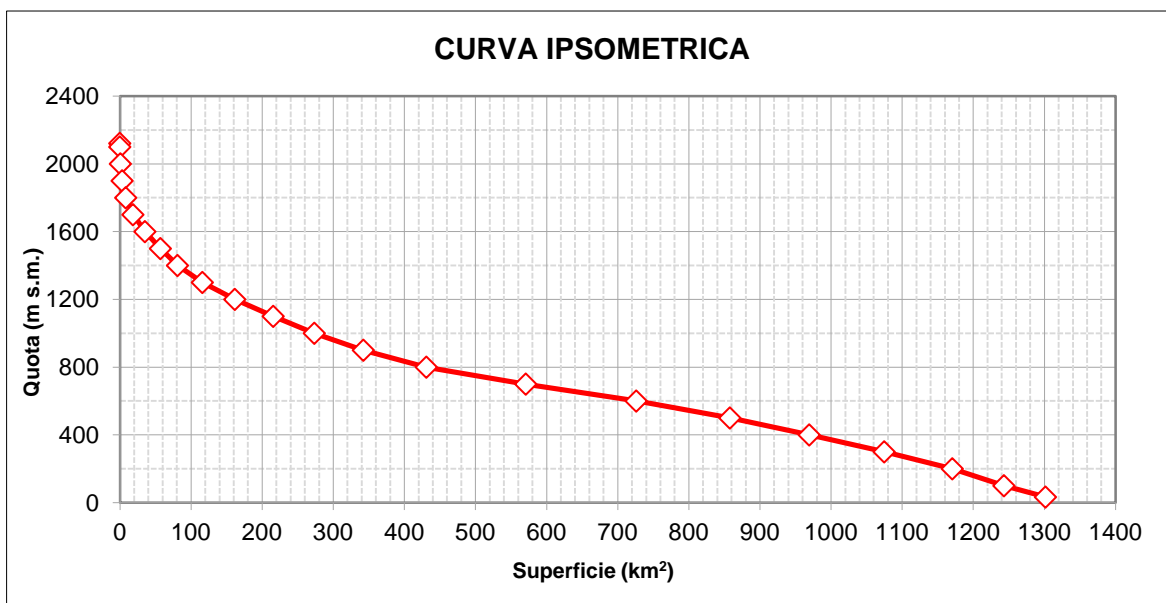


Figura 4.5.3 – Curva ipsometrica del bacino.

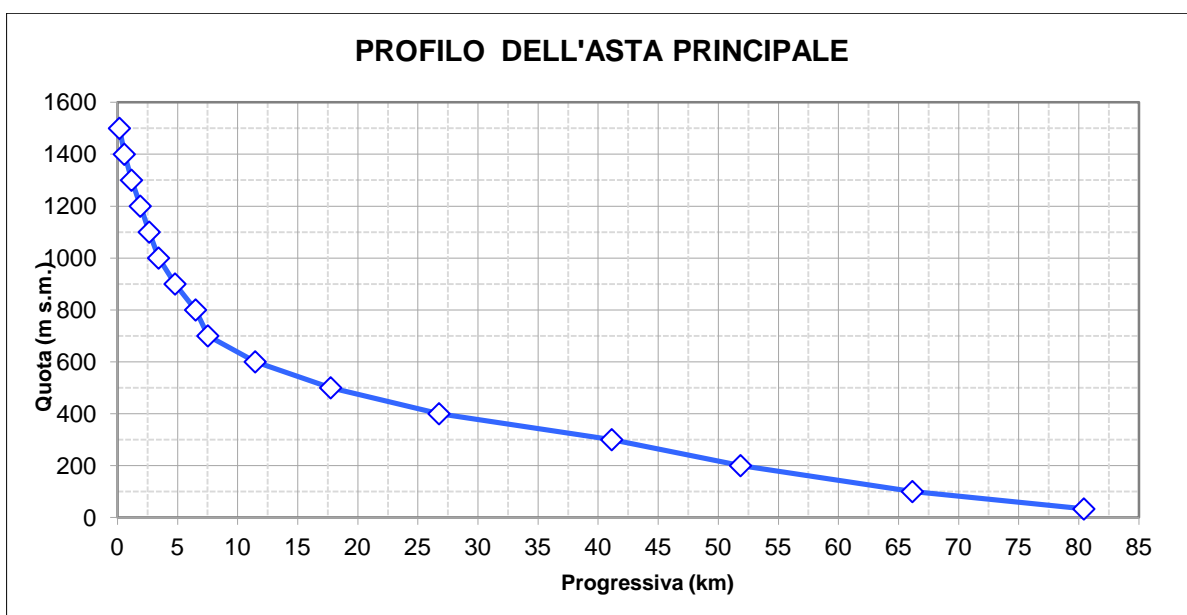
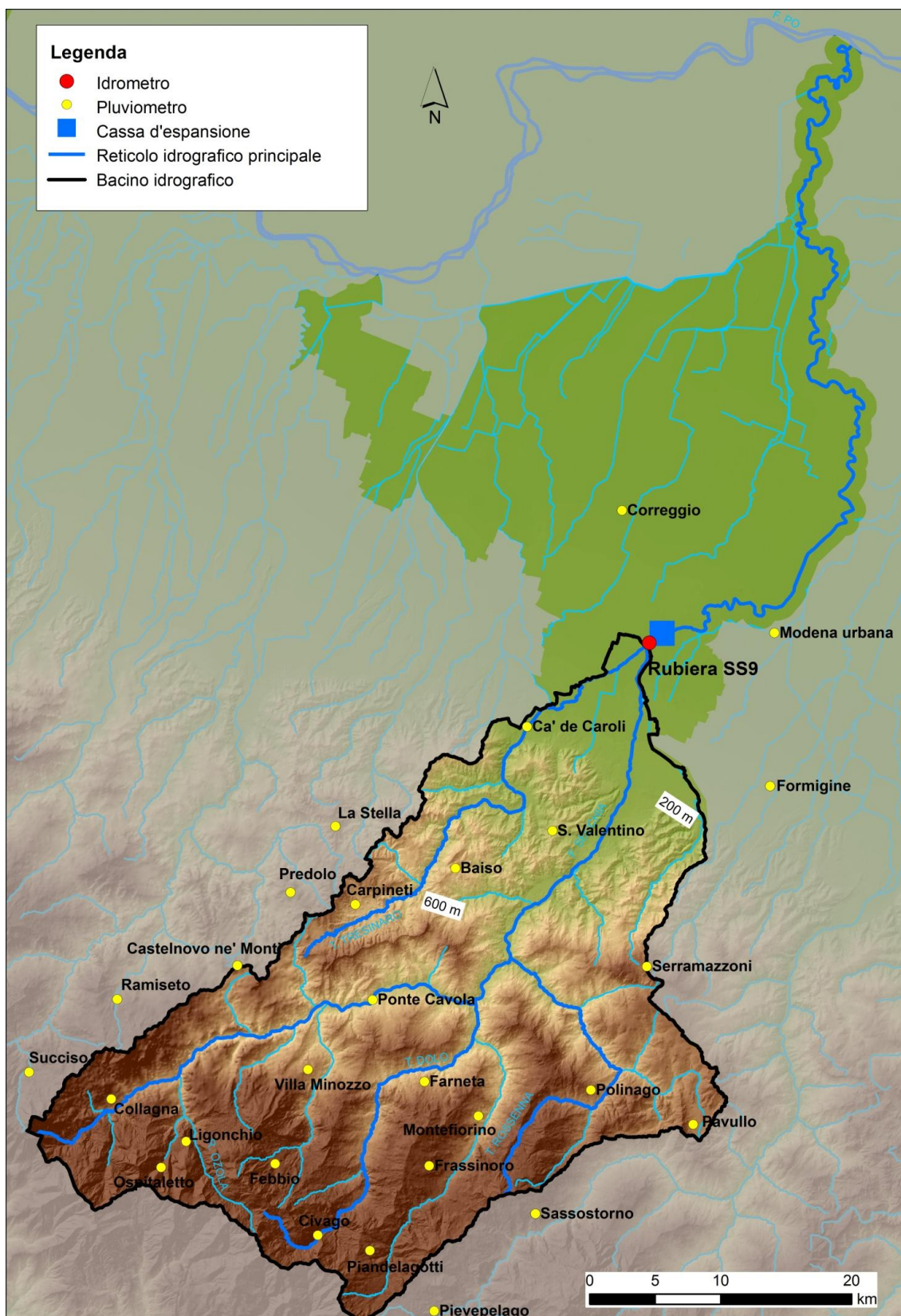


Figura 4.5.4 – Profilo dell'asta principale.



Tempo di corrivazione

La determinazione del valore del tempo di corrivazione del bacino in esame, alla sezione di chiusura considerata, è stata effettuata mediante applicazione della formula di Giandotti, in funzione delle caratteristiche morfologiche ed altimetriche del bacino:

- superficie	S	[km ²];
- altitudine massima	Hmax	[m s.m.];
- altitudine media	Hmed	[m s.m.];
- quota della sezione di chiusura	Hmin	[m s.m.];
- lunghezza dell'asta principale	L	[km];

Viene di seguito riportata l'espressione di calcolo relativa al metodo adottato.

$$t_c = \frac{4 \cdot S^{0.5} + 1,5 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{(H_{med} - H_{min})}}$$

Il valore del tempo di corrivazione ricavato applicando la formula sopra esposta, sulla base dei parametri riportati in Tabella 4.5.1, è pari a 12,9 ore.

Nel progetto di “*Adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia in località Rubiera (RE) e Campogalliano (MO) alle attuali esigenze idrauliche ed alle norme del D.P.R. 1 novembre 1959 n° 1363 e successive (Regolamento Dighe)*” (Ministero dei lavori pubblici – Magistrato per il Po – Parma - 1991), viene attribuito, al bacino del fiume Secchia sotteso dallo sbarramento, *un tempo di corrivazione pari a circa 12 ore.*

Per il bacino del Secchia alla sezione di chiusura in corrispondenza dell'ingresso della cassa di espansione si assume pertanto un valore del tempo di corrivazione pari a 12 ore.

Afflussi meteorici (ietogrammi di progetto)

La pioggia di progetto è stata assegnata a ciascun sottobacino con riferimento ai metodi precedentemente esposti, in particolare sono state adottate le altezze di pioggia ricavate da Arpae per le stazioni pluviometriche appartenenti alla rete di misura regionale ubicate nell'area di interesse, a seguito dell'aggiornamento, sino all'anno 2018, delle statistiche di pioggia intensa, utilizzando la distribuzione GEV (*Generalized Extreme Value*). L'elenco delle stazioni prese a riferimento per l'individuazione della pioggia di assegnato tempo di ritorno è elencato in Tabella 3.1.1.

Sono state analizzate due differenti durate dell' evento di pioggia: 12 ore, pari al tempo di corrivazione del bacino del fiume Secchia alla sezione di interesse indagata e 24 ore, durata indicata come critica *in riferimento al volume sopra la soglia di 750 mc/s, corrispondente alla portata di progetto del tratto arginato a valle della cassa di espansione*, così come indicato nello Studio commissionato da Autorità di Bacino del Fiume Po a Beta Studio s.r.l.

Si è infine attribuita una distribuzione costante delle precipitazioni per ogni sottobacino, individuando il valore della precipitazione media areale mediante il metodo dei topoi.

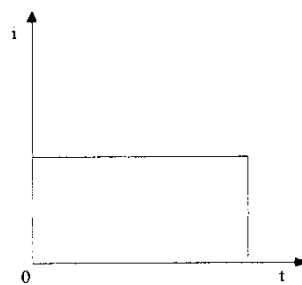


Figura 4.5.6 – Ietogramma ad intensità costante.

Nelle successive Tabelle 4.5.2 e 4.5.3 sono riportate, per ciascuno dei sottobacini che costituiscono il modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi, le altezze di pioggia per le diverse durate di evento considerate ai fini del presente studio.

Sottobacino	Area [km ²]	h, d=12 ore [mm]					
		Tr 20	TR 50	Tr 100	Tr 200	Tr 500	Tr 1000
W180	17,337	79,0	91,0	100,2	109,7	122,6	132,7
W160	174,13	81,2	93,4	102,7	112,1	124,8	134,6
W170	186,8	74,0	83,4	90,8	98,4	109,0	117,4
W200	6,7634	151,1	171,2	186,3	201,3	221,1	236,1
W210	130,85	103,2	118,3	129,8	141,3	156,8	168,5
W220	136,11	116,2	133,1	145,9	158,8	176,0	189,1
W390	71,578	79,2	90,3	98,8	107,3	118,6	127,2
W400	149,72	80,9	93,6	103,4	113,4	127,1	137,8
W440	56,381	67,6	76,8	83,6	90,5	99,6	106,5
W490	113,14	91,7	104,4	114,3	124,4	138,2	148,9
W500	235,27	135,2	156,7	173,4	190,7	214,6	233,7

Figura 4.5.2 – Altezze di pioggia di assegnato tempo di ritorno (d = 12 ore).

Sottobacino	Area [km ²]	h, d=24 ore [mm]					
		Tr 20	TR 50	Tr 100	Tr 200	Tr 500	Tr 1000
W180	17,337	105,8	122,5	135,3	148,2	165,5	178,9
W160	174,13	105,5	122,6	136,0	149,8	168,8	183,9
W170	186,8	98,8	113,2	124,4	135,9	151,7	164,2
W200	6,7634	208,1	239,9	264,0	288,3	320,9	345,8
W210	130,85	137,0	157,4	172,7	188,0	208,2	223,4
W220	136,11	159,2	182,6	200,3	217,9	241,2	258,8
W390	71,578	100,1	123,2	144,1	168,6	207,5	243,1
W400	149,72	106,1	124,7	139,5	155,2	177,6	196,0
W440	56,381	87,0	98,7	107,6	116,4	128,2	137,1
W490	113,14	115,2	129,8	140,7	151,6	166,0	176,9
W500	235,27	173,4	201,3	223,1	245,7	276,9	301,6

Figura 4.5.3 – Altezze di pioggia di assegnato tempo di ritorno (d = 24 ore).

Fattore di riduzione areale delle precipitazioni

L'afflusso meteorico viene valutato in riferimento ai valori puntuali di precipitazione registrati in corrispondenza di stazioni di misura esistenti. L'andamento delle precipitazioni non è tuttavia mai costante sull'intera superficie di un bacino idrografico, in particolare per eventi intensi. Tale situazione è tanto più accentuata quanto più esteso è il comprensorio in esame.

Tale variabilità è spesso alta anche in aree non molto estese ed è difficilmente valutabile, per cui il problema viene usualmente affrontato in modo empirico, stimando il rapporto:

$$r = \frac{h_S(d, T_r)}{h(d, T_r)}$$

essendo:

h_S : altezza di pioggia media sulla superficie di area S;

h : altezza puntuale di precipitazione;

d : durata della precipitazione;

S : superficie del bacino;

T_r : tempo di ritorno.

L'ipotesi che sta alla base dei metodi empirici per la stima di r è che il valore puntuale h corrisponda al massimo valore dell'altezza di pioggia nell'area S , cioè che il cosiddetto centro di scroscio della precipitazione sia proprio in corrispondenza del pluviometro. Tale ipotesi è abbastanza plausibile se si tiene conto che ci si riferisce ai massimi valori misurati dallo strumento e se la rete di misura è sufficientemente fitta ed omogenea. Esistono in alternativa delle formule che calcolano il ragguaglio all'area rispetto al baricentro della zona interessata.

I fattori da cui dipende r sono tre: l'area e la forma della superficie interessata dalla precipitazione, la durata della precipitazione e il tempo di ritorno. La maggior parte delle formule proposte in letteratura per la stima di r non tengono conto del tempo di ritorno.

La determinazione del fattore di riduzione areale del bacino del fiume Secchia, alla sezione di ingresso del manufatto di laminazione, è stata effettuata mediante applicazione di differenti formule di letteratura. Vengono di seguito riportate le espressioni di calcolo relative ad ognuno dei metodi confrontati:

U.S. Weather Bureau (1958):

$$r = 1 - \exp(-1,1d^{1/4}) + \exp(-1,1d^{1/4} - 0,01S) \text{ con: } S \text{ in [miglia]}$$

Moisello e Papiri (1986):

$$r = 1 - \exp\left(-2,472S^{-0.242}d^{0,6-\exp(-0,643S^{0,235})}\right)$$

Natural Environmental Research Council Britannico (1975):

$$r = (1 + 0,02S^{0,37}d^{-0,48})^{-2}$$

In Tabella 4.5.4 sono riassunti i valori del fattore di riduzione areale ricavati sulla base delle formule sopra descritte.

BACINO	Durata [ore]	U.S. Weather Bureau	Moisello e Papiri	Natural Environmental Council Britannico
Fiume Secchia all'ingresso del manufatto di laminazione	12	0,87	0,83	0,85
	24	0,91	0,93	0,89

Tabella 4.5.4 – Fattore di riduzione areale secondo le diverse formulazioni.

Il metodo di ragguaglio impiegato si basa sull'assunzione che l'intensità di pioggia sia uniforme nello spazio e pertanto che lo ietogramma della pioggia ragguagliata si possa ottenere da quello della pioggia puntuale moltiplicando le altezze di pioggia parziali per uno stesso valore del coefficiente di riduzione, corrispondente alla durata d e all'area S .

Sulla base delle considerazioni sopra esposte è stato assunto, per il bacino del Secchia alla sezione di ingresso del manufatto di laminazione e per entrambe le durate di evento analizzate (12 e 24 ore), cautelativamente, un fattore di riduzione areale pari a 0,9.

Perdite idrologiche

La differenza tra la precipitazione totale caduta su un bacino idrografico e la precipitazione netta (quota parte di pioggia che raggiunge la sezione di chiusura come deflusso superficiale), costituisce la perdita idrologica del bacino.

Le perdite sono funzione delle caratteristiche del bacino (tipo e uso dei suoli, stato di umidità iniziale del terreno, caratteristiche fisiografiche, ...), del tipo di afflussi (altezza totale di pioggia, intensità di precipitazione, dinamica temporale e distribuzione spaziale della pioggia); inoltre parte del volume di pioggia può essere trattenuto per detenzione superficiale del terreno, immagazzinamento nella rete idrografica e nelle depressioni superficiali o disperdersi per evapotraspirazione.

Per il calcolo delle perdite si è adottato il metodo *SCS Curve Number*, elaborato dal U.S. Soil Conservation Service (Department of Agriculture), che determina la precipitazione netta P_n sottraendo alla precipitazione totale P le perdite iniziali I_a dovute all'*immagazzinamento superficiale*, all'*intercettazione* della copertura vegetale ed

all'*infiltrazione* prima della formazione del deflusso. Il metodo si basa sull'ipotesi che sia valida la seguente relazione (in cui tutte le grandezze sono espresse in mm):

$$\frac{V}{P_n} = \frac{W}{S}$$

dove:

V = volume di deflusso;

P_n = precipitazione netta;

W = invaso nel suolo;

S = invaso massimo nel suolo.

La precipitazione netta ($P_n = P - I_a$, essendo $I_a = 0,2S$ perdita iniziale) si ripartisce tra il volume di deflusso superficiale e l'invaso del suolo:

$$P_n = V + W$$

da cui, con alcuni passaggi, si ricava l'espressione che fornisce il volume di deflusso:

$$V = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

Il parametro S , che rappresenta il massimo invaso nel bacino, è dato dalla relazione:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

CN è il "Runoff Curve Number", coefficiente sperimentale definito secondo i criteri indicati dal U.S. Soil Conservation Service (Department of Agriculture) in funzione delle caratteristiche di infiltrazione, uso e trattamento del suolo, contenuto di umidità del terreno, condizione di umidità antecedente del bacino (*AMC Antecedent Moisture Condition*).

In relazione alla capacità di infiltrazione del terreno sono distinte quattro classi di appartenenza:

- A - Suoli ad alta permeabilità (basso potenziale di scorrimento superficiale): sono costituiti principalmente da sabbie o ghiaie di notevole spessore, con elevata capacità di drenaggio.
- B - Suoli a moderato tasso di infiltrazione, caratterizzati da tessitura da moderatamente fine a moderatamente grossolana (sabbie limose ed argillose).
- C - Suoli a medio-bassa permeabilità, caratterizzati da tessitura da moderatamente fine a fine (argille e limi, con contenuti organici).
- D - Suoli a bassa permeabilità, costituiti da argille plastiche, con livello piezometrico permanentemente alto.

Sono distinte tre condizioni di umidità antecedente (AMC) in funzione della precipitazione nei 5 giorni antecedenti (Tabella 4.5.5):

- condizione I: suoli asciutti;
- condizione II: suoli in condizioni medie;
- condizione III: suoli saturi.

Categoria AMC	Altezza di precipitazione nei 5 giorni antecedenti [mm]	
	Stagione di riposo	Stagione vegetativa
I	<13	<36
II	13÷28	36÷53
III	>28	>53

Tabella 4.5.5 - Condizioni di umidità antecedente del terreno (AMC).

Nella Tabella 4.5.6 sono riportati i valori che il parametro CN assume nel caso di suoli in condizioni di umidità medie del terreno (AMC II). Nel caso di suoli asciutti (AMC I) od in condizioni sature (AMC III) i valori del parametro CN si ricavano invece, con riferimento alla successiva Tabella 4.5.7, a partire dai valori definiti per suoli in condizioni medie (AMC II).

<i>Tipologie di uso del suolo</i>	<i>Tipo di suolo</i>			
	A	B	C	D
Suoli coltivati	62 – 72	71 – 81	78 – 88	81 – 91
Pascoli	39 – 68	61 – 79	74 – 86	80 – 89
Prati	30	58	71	78
Boschi e foreste con copertura modesta	45	66	77	83
Boschi e foreste con buona copertura dall'erosione e sottobosco	25	55	70	77
Aree a parco e di fruizione ricreativa:				
- con copertura erbacea superiore al 75%	39	61	74	80
- con copertura erbacea dal 50% al 75%	41	69	79	84
Aree commerciali (impermeabili per l'85%)	89	92	94	95
Aree industriali (impermeabili per il 72%)	81	88	91	93
Aree residenziali con percentuale media impermeabile				
65%	77	85	90	92
38%	61	75	83	87
30%	57	72	81	86
25%	54	70	80	85
20%	51	68	79	84
Parcheggi, aree coperte (impermeabili)	98	98	98	98
Strade:				
- asfaltate	98	98	98	98
- inghiaiate	76	85	89	91

Tabella 4.5.6 - Valori del coefficiente CN in funzione del suolo e tipo di copertura (AMC II).

CN Condizione II	Corrispondente CN	
	I	III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Tabella 4.5.7 – Confronto fra i valori di CN nelle differenti condizioni idrologiche AMC (SCS Method).

La classificazione di uso del suolo, per il bacino imbrifero del fiume Secchia alla sezione di chiusura considerata, in corrispondenza dell'ingresso del manufatto di laminazione, è stata effettuata a partire dai dati vettoriali di uso del suolo della Regione Emilia – Romagna e dalle informazioni riportate nel *Database uso del suolo di dettaglio 2014*, a cura del *Servizio Statistica, Comunicazione, Sistemi Informativi Geografici, Partecipazione* della Regione Emilia Romagna, di cui si riporta una rappresentazione in planimetria nella successiva Figura 4.5.7.

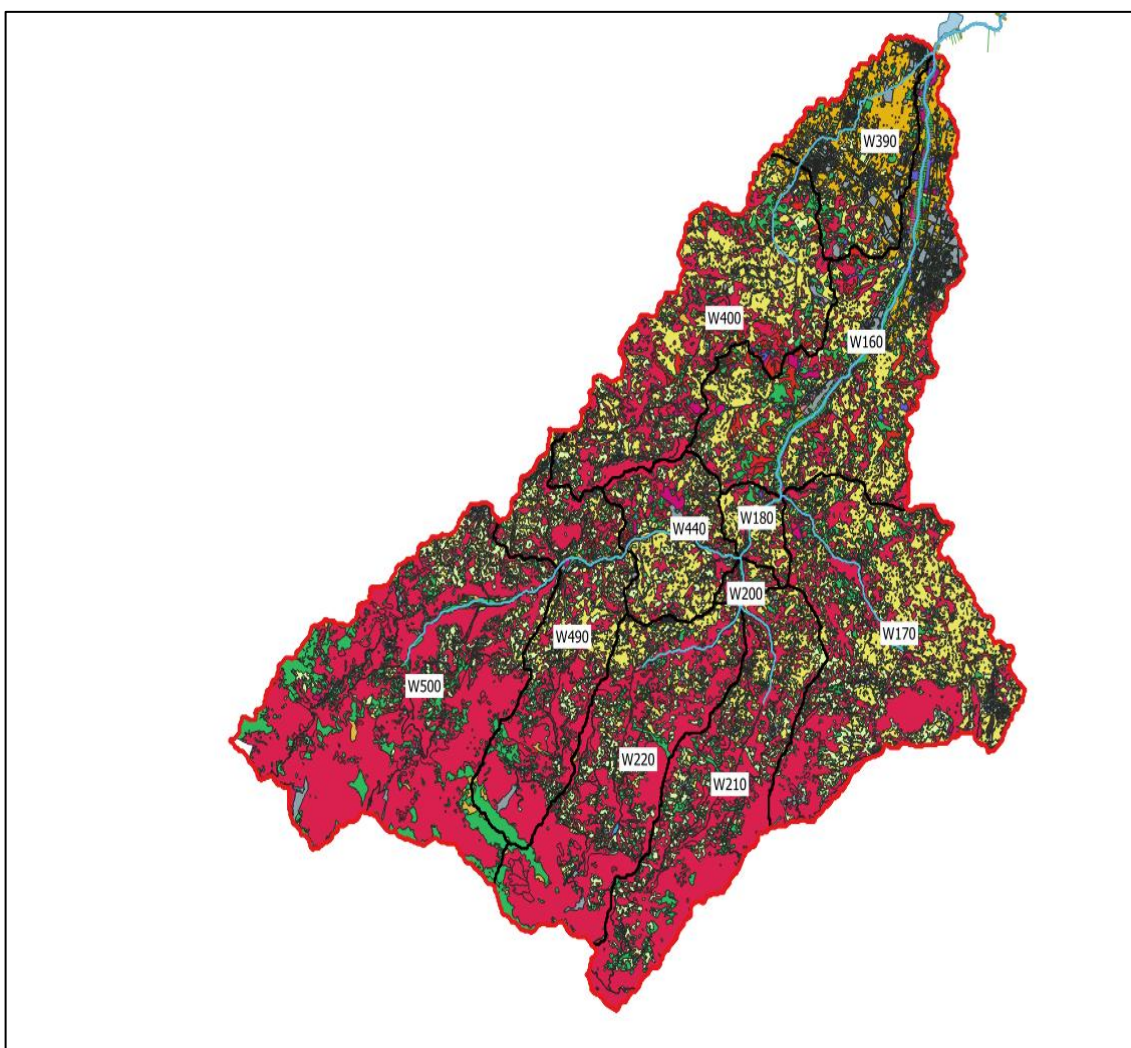


Figura 4.5.7 – Cartografia uso del suolo.

Per ogni sottobacino appartenente al bacino imbrifero del Fiume Secchia alla sezione di ingresso del manufatto di laminazione, sulla base delle informazioni precedentemente citate, sono stati individuati i valori di CN medi in funzione delle caratteristiche dei suoli e della copertura ($CNII = 72 \div 77$).

Trasformazione afflussi-deflussi

Il fenomeno di trasformazione afflussi-deflussi è stato simulato mediante applicazione del *metodo dell'idrogramma unitario di Clark*.

Nel metodo dell'*idrogramma unitario*, l'idrogramma di piena conseguente ad una data pioggia efficace è generato mediante convoluzione delle precipitazioni con riferimento all'idrogramma unitario definito come l'idrogramma generato da una pioggia efficace di altezza unitaria ed intensità costante, distribuita uniformemente sul bacino e caduta in un dato periodo di tempo, assunto come unitario. Il metodo è basato sull'implicita assunzione che il bacino costituisca un sistema lineare e stazionario.

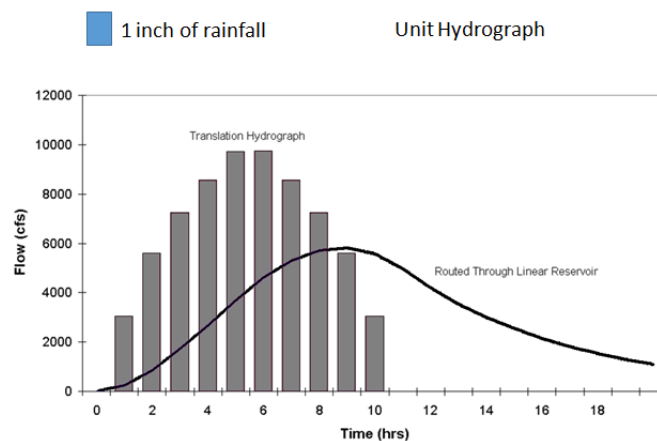


Figura 4.5.8 – Idrogramma unitario.

Il modello di Clark è un modello lineare e stazionario, in cui il bacino è rappresentato da un modello cinematico e un serbatoio lineare posti in serie, in modo che l'uscita del primo costituisca l'ingresso del successivo.

Il modello può essere definito secondo due possibili schemi equivalenti:

- il primo schema è rappresentato da un invaso lineare definito da una propria costante d'invaso posto a valle di una traslazione cinematica definita tramite una curva aree-tempi $A(t)$.
- Il secondo schema è rappresentato dalla traslazione cinematica posta a monte dell'invaso lineare.

Il modello di Clark individua due principali processi implicati nella trasformazione della pioggia netta in deflusso: l'attenuazione e la traslazione dell'onda di piena, di cui la costante di invaso "R" (*Storage coefficient*) e il tempo di corrivazione "Tc" (*Time of concentration*) rappresentano i parametri di calibrazione.

Nella successiva Figura 4.5.9 è rappresentata, in modo sintetico, la variabilità di un generico idrogramma di piena, con riferimento alla variazione dei parametri di calibrazione T_c ed R.

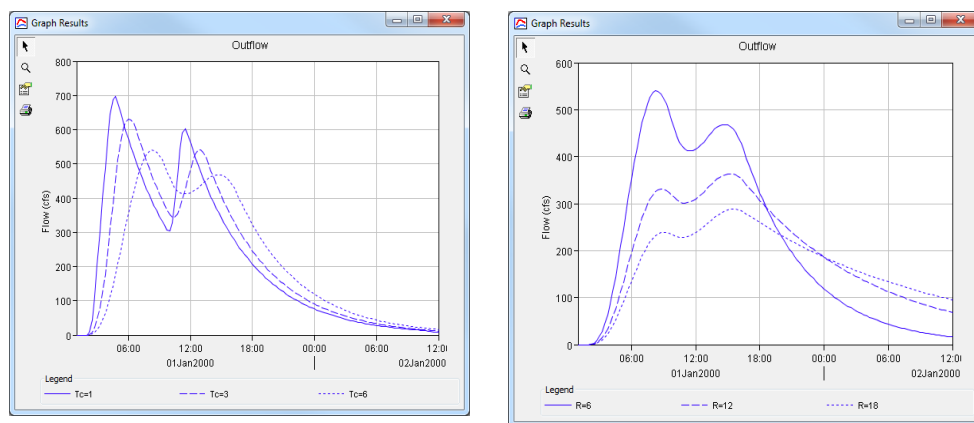


Figura 4.5.9 – Idrogramma unitario.

Il modello si basa sull'equazione di continuità:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t$$

essendo:

- S: volume immagazzinato nel serbatoio;
- I_t : afflusso medio nel tempo;
- O_t : portata in uscita dal bacino.

Il volume invasato nell'istante t è legato alla portata uscente dal bacino tramite una relazione lineare descritta nella seguente equazione:

$$S_t = RO_t.$$

Combinando e risolvendo le precedenti equazioni si ottiene la portata uscente media dalla sezione di chiusura del bacino:

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2}$$

Il fenomeno di traslazione viene modellato utilizzando una relazione area-tempi legata al tempo di corrvazione, "Tc" (*Time of concentration*) ovvero quel tempo che impiega la goccia d'acqua più lontana a raggiungere la sezione di chiusura del bacino. Lo schema concettuale prevede l'utilizzo di un modello "a canale lineare", in cui il deflusso viene propagato da un generico punto remoto al serbatoio lineare localizzato concettualmente alla chiusura del bacino, con un certo ritardo, ma senza subire fenomeni di laminazione; il modello, in particolare, simula l'area contribuente al deflusso in corrispondenza della sezione di chiusura come una funzione del tempo.

La propagazione del deflusso lungo l'asta principale del Fiume Secchia è stata simulata con il *metodo di Muskingum-Cunge a sezione standard* basato sull'equazione di continuità e sull'approssimazione parabolica delle equazioni complete di De Saint Venant, che descrive, seppure in maniera semplificata, anche i fenomeni di laminazione.

Taratura dei parametri relativi al modello di trasformazione afflussi – deflussi.

La calibrazione dei parametri idrologici del modello di trasformazione afflussi – deflussi, predisposto mediante applicazione del codice di calcolo HEC–HMS, è stata effettuata, ad un primo livello di approssimazione, con riferimento alla verifica di una serie di eventi gravosi registrati nella stazione idrometrica di Rubiera SS9, selezionati sul periodo 2005÷2015, per cui sono disponibili, nel sistema FEWS PO, oltre ai dati idrometrici, anche i dati di precipitazione che hanno interessato il bacino imbrifero sotteso:

- 02 dicembre – 04 dicembre 2005;
- 28 novembre – 04 dicembre 2008;
- 22 dicembre – 25 dicembre 2010;
- 10 novembre – 13 novembre 2012;
- 27 novembre – 30 novembre 2012.

Sulla base delle considerazioni precedentemente esposte si è pertanto proceduto alla taratura dei parametri di input del modello afflussi-deflussi (Curve Number, percentuale superficie impermeabile, costante di invaso di Clark), con l'obiettivo di individuare un buon grado di coerenza tra gli idrogrammi di piena osservati e gli idrogrammi di piena simulati, sia in riferimento alla portata al colmo e al tempo di picco che al volume sotteso dall'onda di piena ed alla forma dell'idrogramma. Per quanto concerne i tempi di corrvazione dei singoli sottobacini ed i parametri che definiscono le modalità di trasferimento delle onde di piena lungo l'asta fluviale, sono stati adottati, senza apportare modifiche, quelli implementati nel modello idrologico del fiume Secchia utilizzato per il funzionamento in tempo reale, nel sistema FEWS PO.

Si specifica come gli idrogrammi individuati per la taratura dei parametri del modello idrologico siano caratterizzati da valori di portata al colmo dell'ordine di circa 500-700 m³/s, ricostruiti a partire dai livelli idrometrici registrati, utilizzando una scala di deflusso (Secchia a Rubiera SS9) costruita in base a dati sperimentali di portata misurati fino a 600 m³/s, ritenuta pertanto particolarmente affidabile.

Si riportano di seguito i grafici e i tabulati relativi alla procedure di taratura dei parametri del modello idrologico con riferimento agli eventi gravosi selezionati.

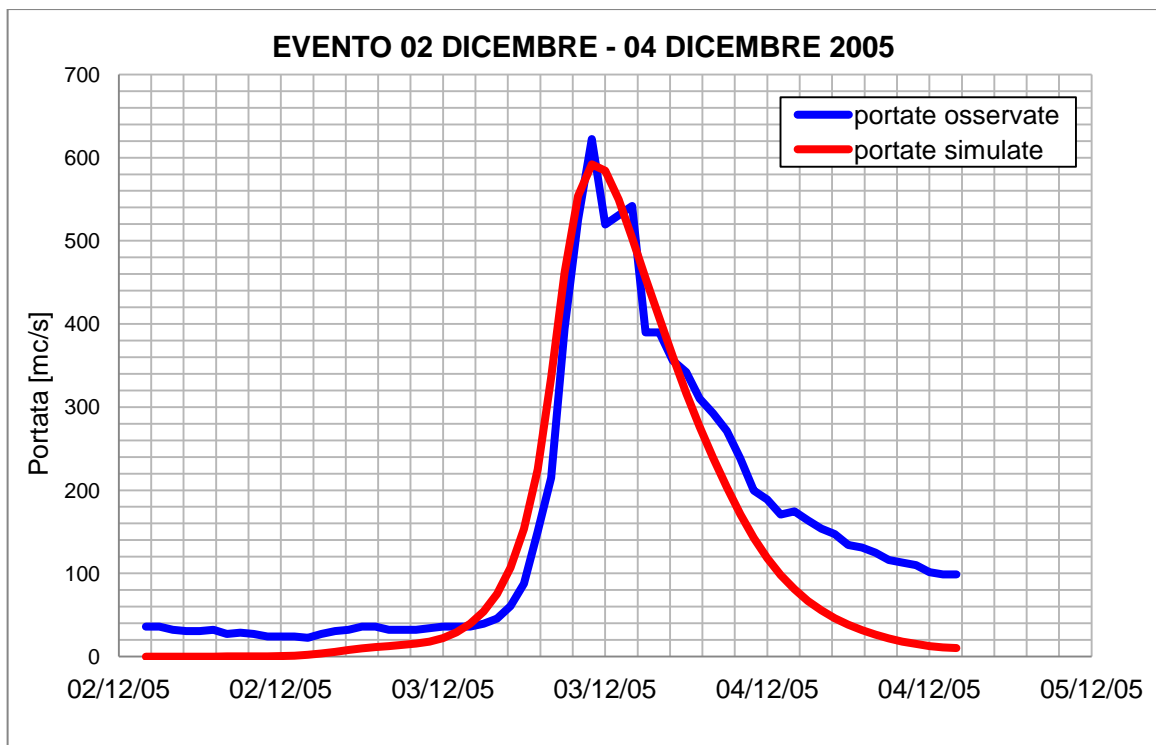


Figura 4.5.10 – Taratura evento 02 dicembre – 04 dicembre 2005.

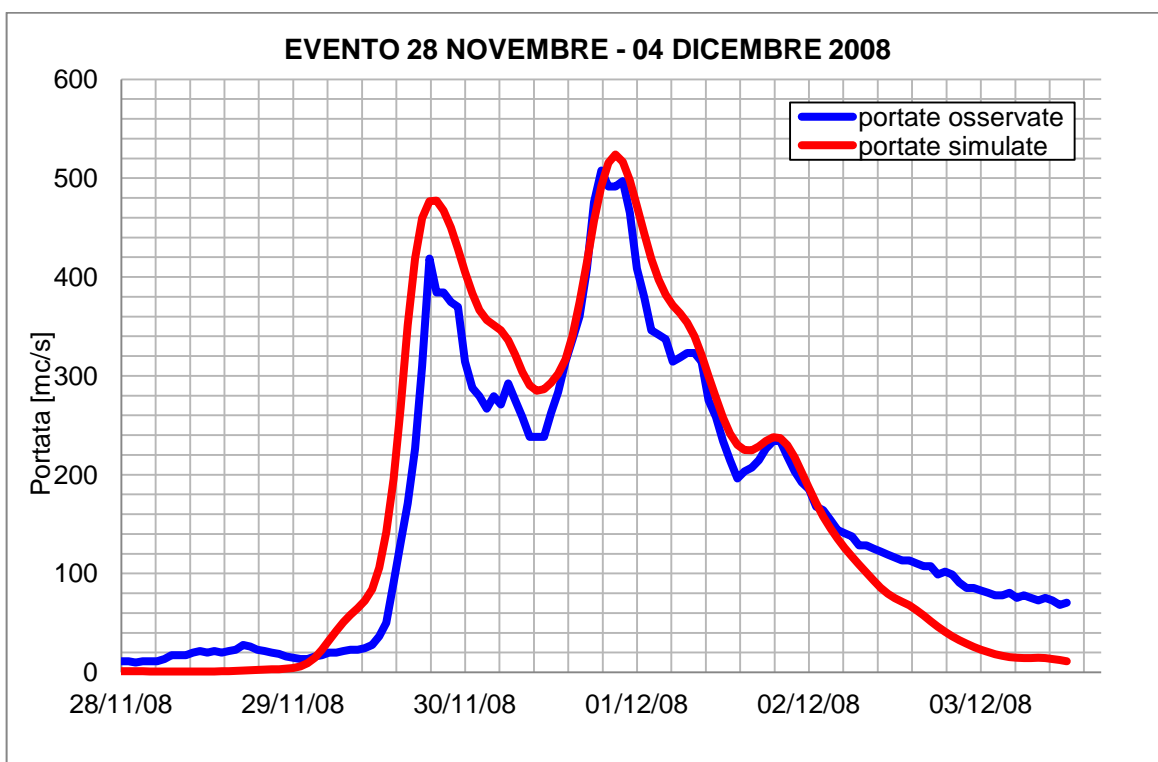


Figura 4.5.11 – Taratura evento 28 novembre – 04 dicembre 2008.

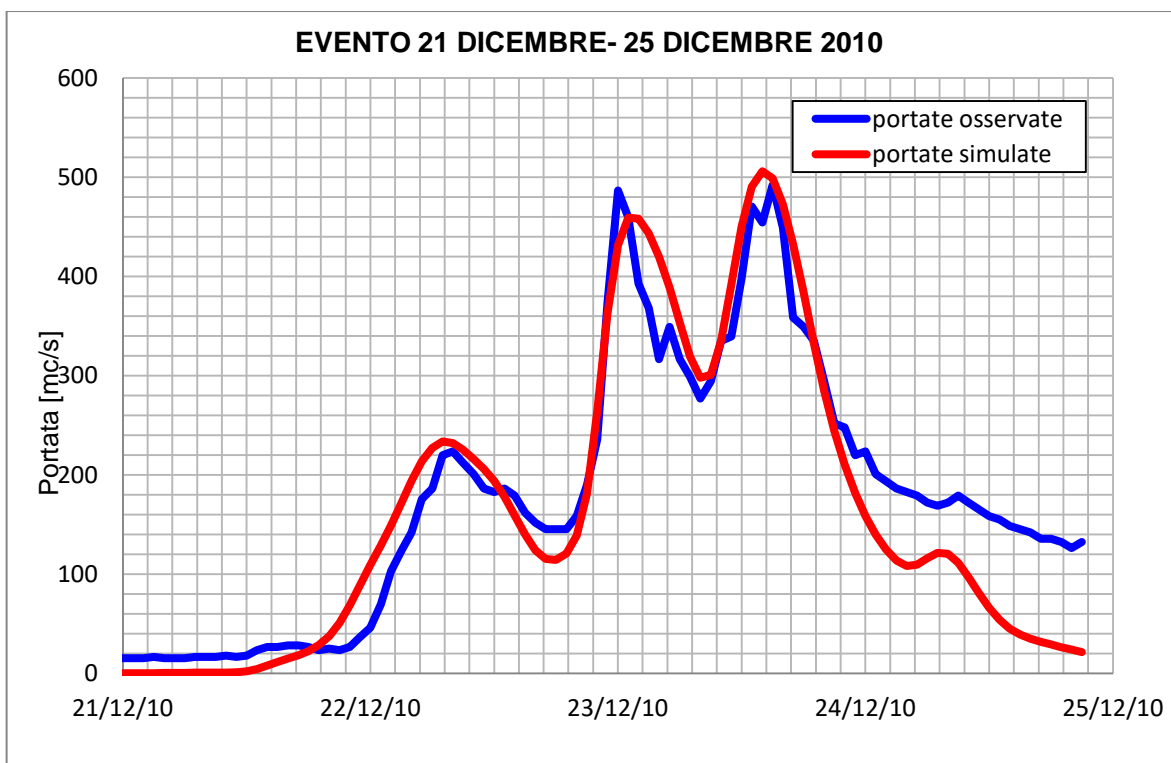


Figura 4.5.12 – Taratura evento 22 dicembre – 25 dicembre 2010.

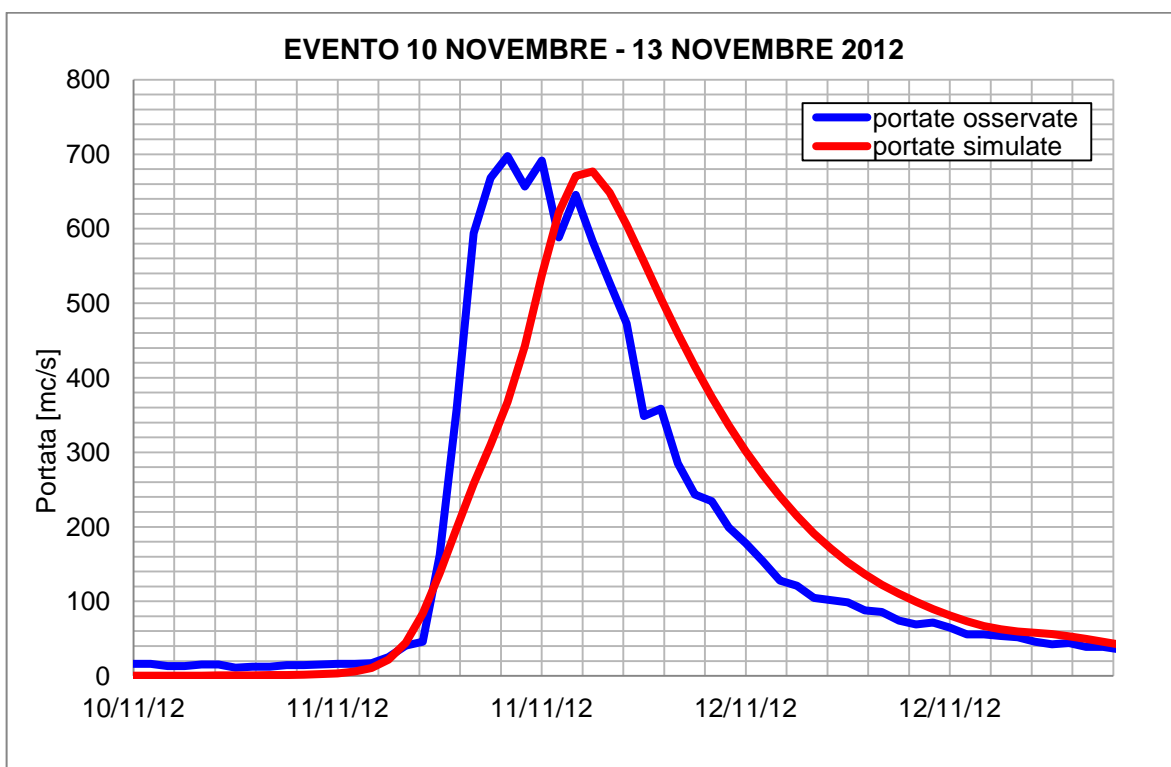


Figura 4.5.13 – Taratura evento 10 novembre – 13 novembre 2012.

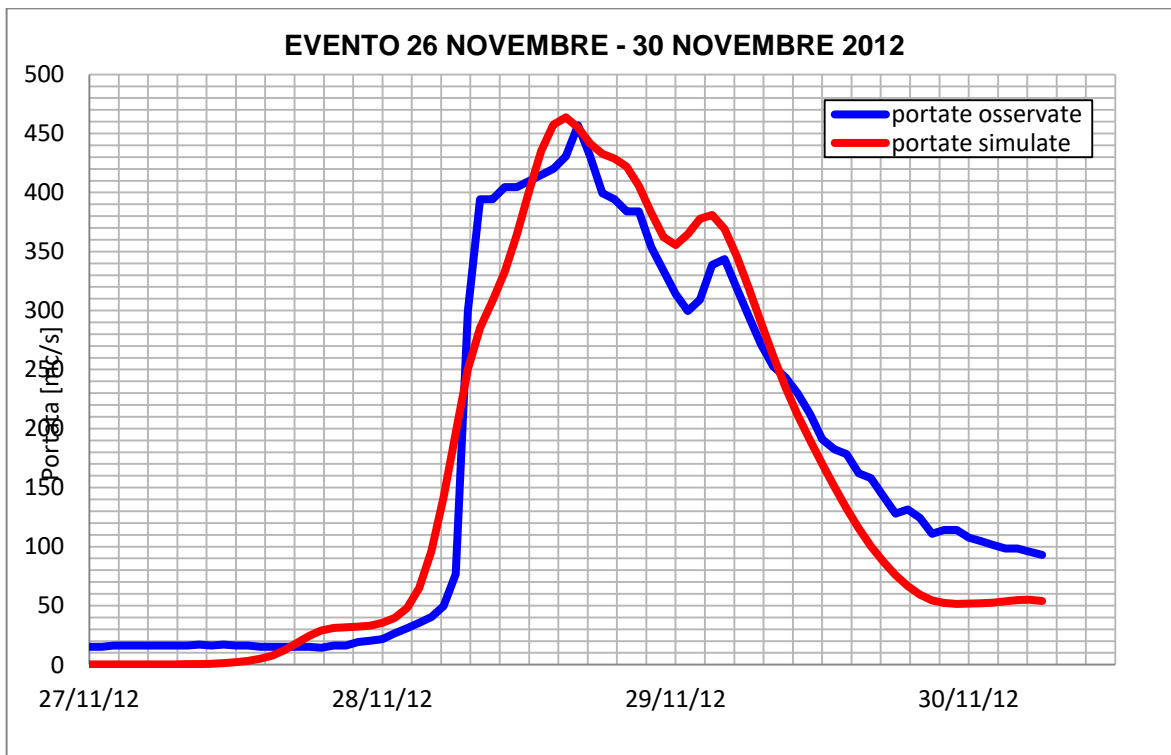


Figura 4.5.14 – Taratura evento 27 novembre – 30 novembre 2012.

Evento	CN medio (SCS)	R (Clark)	% bacino impermeabile
02 dicembre – 04 dicembre 2005	86	5,0	10
28 novembre – 04 dicembre 2008	72	9,0	10
21 dicembre – 25 dicembre 2010	80	4,0	10
10 novembre – 13 novembre 2012	72	8,5	10
26 novembre – 30 novembre 2012	80	6,5	10

Tabella 4.5.8 – Parametri di taratura.

I dati di CN riportati in Tabella 4.5.8, ricavati per gli eventi di piena gravosi individuati ai fini della taratura, confermano le assunzioni effettuate con riferimento ai dati di uso del suolo della Regione Emilia – Romagna, tenuto conto della variabilità dovuta alle diverse condizioni di umidità del suolo che caratterizzano il bacino prima di ogni evento di piena.

Sulla base delle considerazioni sopra esposte si è pertanto proceduto alla definizione dei parametri di input del modello afflussi-deflussi (CN, percentuale superficie impermeabile, costante di invaso di Clark), con riferimento ad una durata di pioggia di 12 ore, corrispondente al tempo di corrivazione del bacino, ed al valore della portata al colmo con tempo di ritorno 100 anni stimata mediante *analisi di frequenza di tipo regionale* applicando, i modelli *RoI-TCEV* e *RoI-GEV*, così come descritto nel Capitolo 2 della presente relazione. Per il bacino oggetto di studio è stato adottato un valore medio di CNII pari circa a 74 e sono stati assunti valori di R compresi tra 8 e 9.

Calcolo degli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno

In Tabella 4.5.9 sono riassunti i valori delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno (20 – 50 – 100 – 200 – 500 - 1000 anni), nel caso di precipitazione di durata 12 ore, calcolati con il modello idrologico afflussi-deflussi.

METODOLOGIA DI CALCOLO	Q(Tr20) [m ³ /s]	Q(Tr50) [m ³ /s]	Q(Tr100) [m³/s]	Q(Tr200) [m ³ /s]	Q(Tr500) [m ³ /s]	Q(Tr1000) [m ³ /s]
Modello A-D	1.305	1.566	1.767	1.974	2.258	2.481
Modello ROI-TCEV	1.271	1.567	1.795	2.025	2.330	2.555
Modello ROI-GEV	1.234	1.515	1.742	1.983	2.327	2.607

Tabella 4.5.9 – Portate al colmo (durata pioggia 12 ore) all’ingresso del manufatto di laminazione.

Nella successiva Figura 4.5.15 sono rappresentati gli idrogrammi di piena, per tempi di ritorno di 20 – 50 – 100 – 200 – 500 - 1000 anni, nel caso di precipitazione di durata 12 ore, calcolati con il codice HEC-HMS.

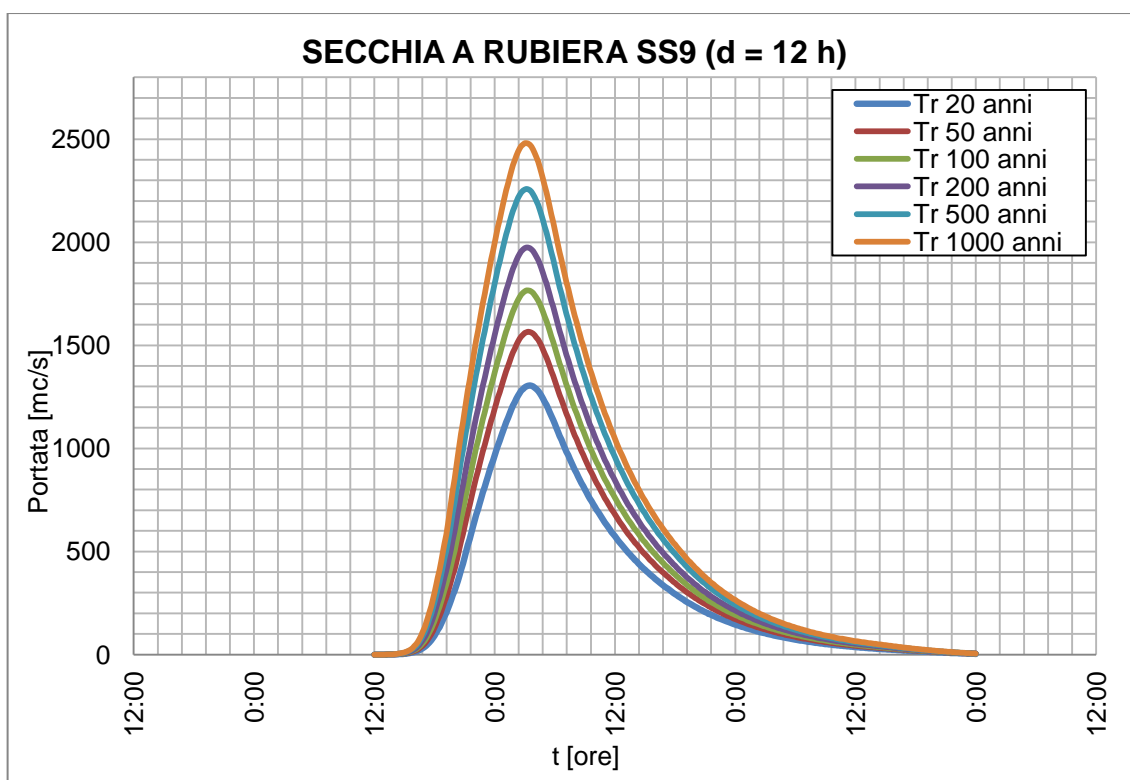


Tabella 4.5.15 – Idrogrammi di piena ad ingresso cassa (d =12 ore).

Nella successiva Figura 4.5.16 sono rappresentati gli idrogrammi di piena, per tempi di ritorno di 20 – 50 – 100 – 200 – 500 - 1000 anni, nel caso di precipitazione di durata 24 ore, calcolati con il codice HEC-HMS.

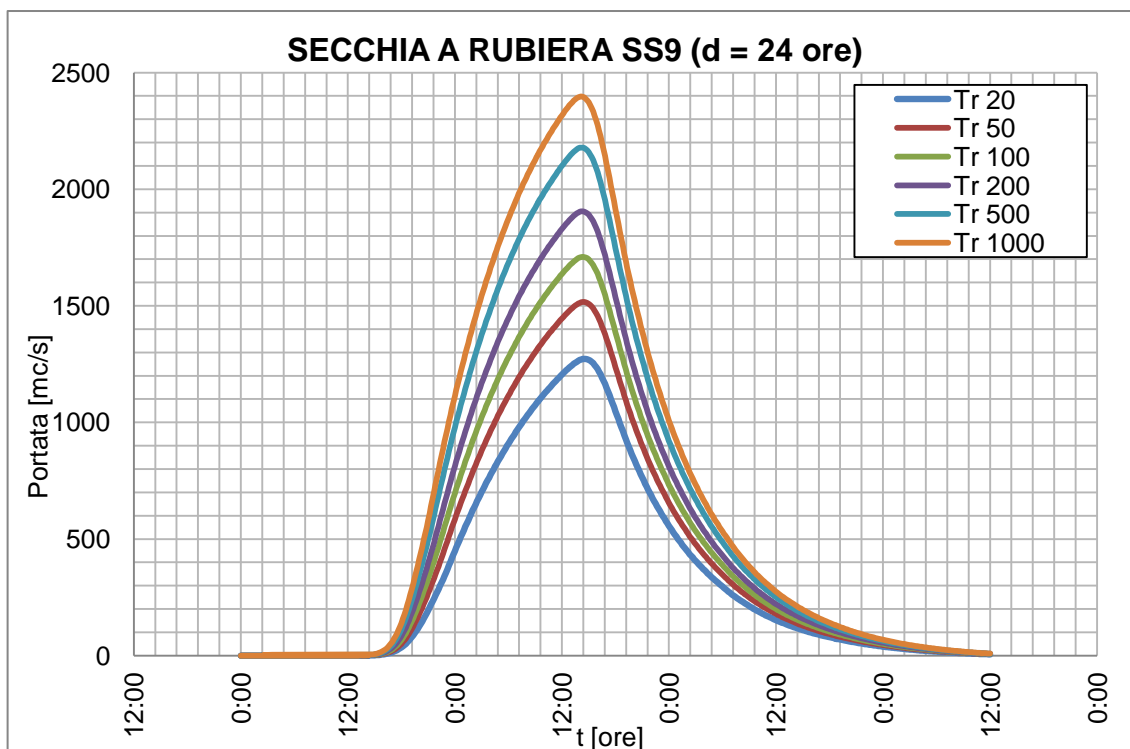


Tabella 4.5.16 – Idrogrammi di piena ad ingresso cassa (d =24 ore).

Nella successiva Tabella 4.5.10 sono riportati i volumi che caratterizzano gli idrogrammi di piena, per tempi di ritorno di 20 – 50 – 100 – 200 – 500 - 1000 anni, calcolati con il codice HEC-HMS.

DURATA PRECIPITAZIONE	V(TR20) [Mm ³]	V(TR50) [Mm ³]	V(TR100) [Mm ³]	V(TR200) [Mm ³]	V(TR500) [Mm ³]	V(TR1000) [Mm ³]
12 ore	72	87	99	111	128	141
24 ore	103	125	142	160	184	204

Tabella 4.5.10 – Volumi degli idrogrammi di piena all'ingresso del manufatto di laminazione.

5. CONFRONTO RISULTATI

Nella successiva Tabella 5.1 è riportato il confronto, in termini di volumi sottesi dall'idrogramma di piena, tra i risultati ottenuti nel presente studio e i risultati individuati negli altri studi a disposizione.

STUDIO	V(TR20) [Mm ³]	V(TR50) [Mm ³]	V(TR100) [Mm ³]	V(TR200) [Mm ³]	V(TR500) [Mm ³]	V(TR1000) [Mm ³]
Arpae – d=12 ore	72	87	99	111	128	141
Arpae – d=24 ore	103	125	142	160	184	204
Susin	-	-	-	-	-	-
POLIMI	-	132	147	162	-	-
ADBPO – d=12 ore	82	-	111	120	135	-
ADBPO – d=24 ore	102	-	129	142	161	-

Tabella 5.1 – Confronto volumi degli idrogrammi di piena..

Nella successiva Tabella 5.2 è riportato il confronto in termini di volumi sottesi dall'idrogramma di piena sopra la soglia di 750 m³/s, corrispondente alla portata di progetto del tratto arginato a valle della cassa di espansione, tra i risultati ottenuti nel presente studio e i risultati individuati negli altri studi a disposizione.

STUDIO	V(TR20) [Mm ³]	V(TR50) [Mm ³]	V(TR100) [Mm ³]	V(TR200) [Mm ³]	V(TR500) [Mm ³]	V(TR1000) [Mm ³]
Arpae – d=12 ore	13	22	30	39	51	62
Arpae – d=24 ore	19	34	46	60	80	96
Susin	-	-	24	-	-	-
POLIMI	-	12	18	25	-	-
ADBPO – d=12 ore	13	-	34	41	53	-
ADBPO – d=24 ore	19	-	42	52	69	-

Tabella 5.2 – Confronto volumi degli idrogrammi di piena sopra soglia (750 m³/s).

Nelle successive Figure 5.1-5.5 è riportato il medesimo confronto, in forma grafica, per tempi di ritorno fino a 500 anni. Si specifica come, in Figura 5.1, l'idrogramma di piena calcolato dal Politecnico di Milano si riferisca ad un tempo di ritorno di 25 anni.

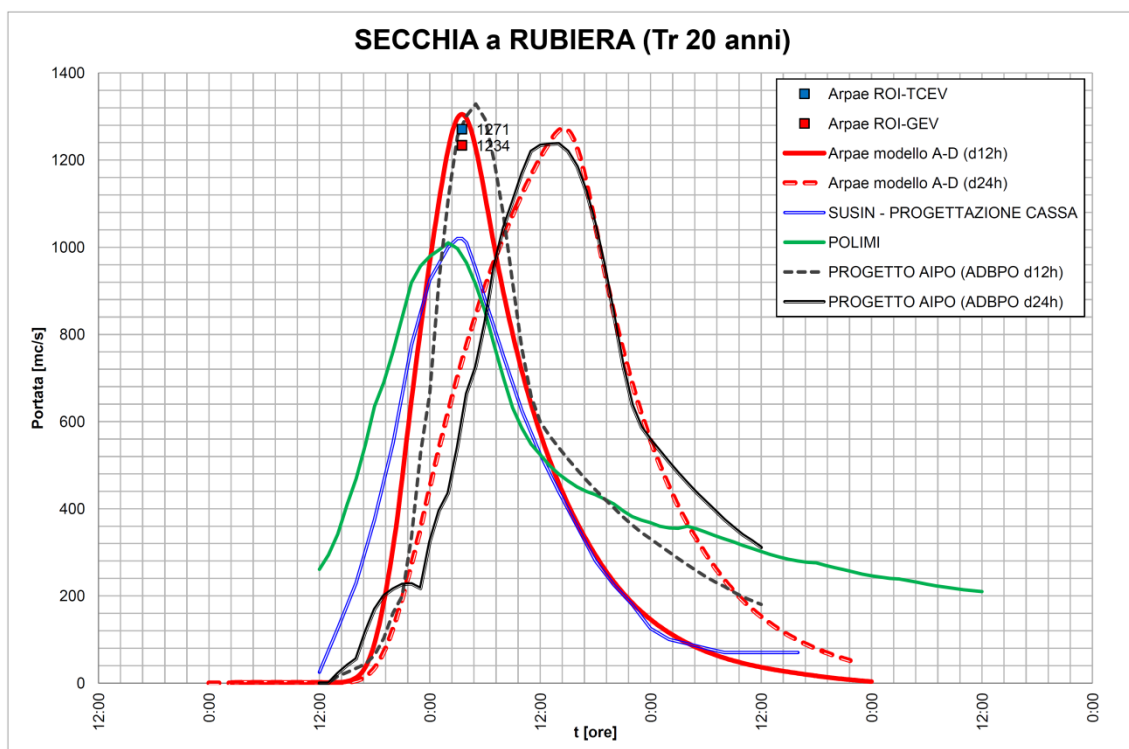


Figura 5.1 – Confronto idrogrammi di piena (Tr 20 anni).

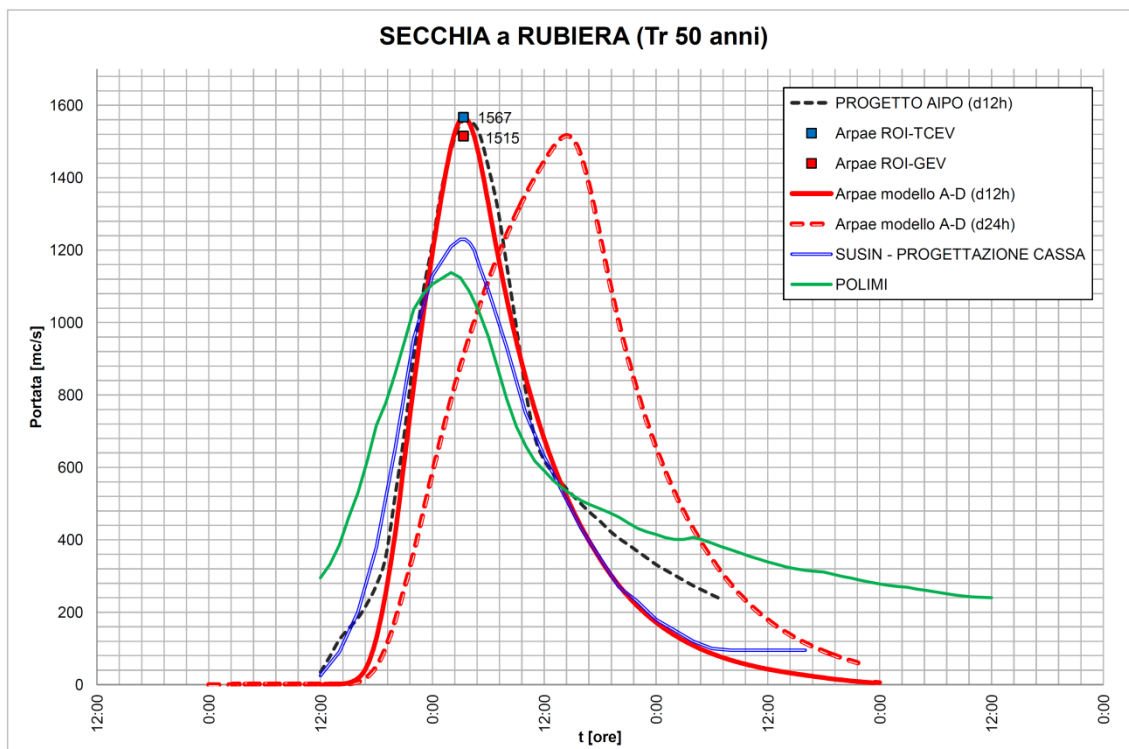


Figura 5.2 – Confronto idrogrammi di piena (Tr 50 anni).

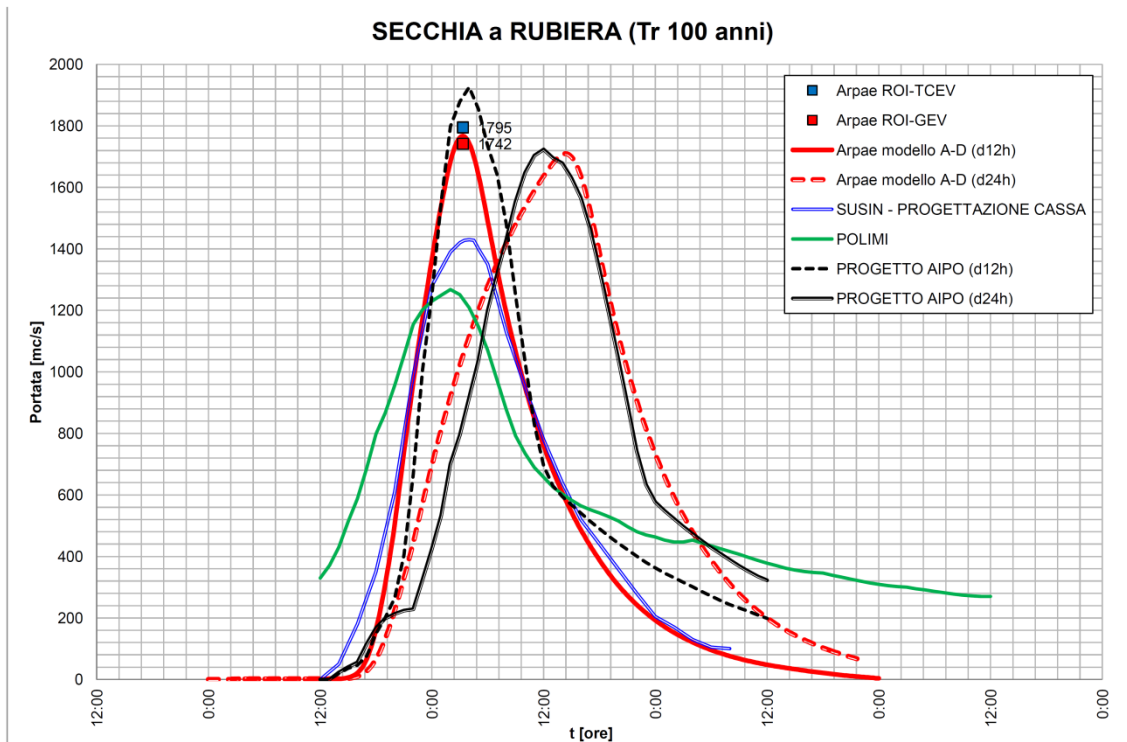


Figura 5.3 – Confronto idrogrammi di piena (Tr 100 anni).

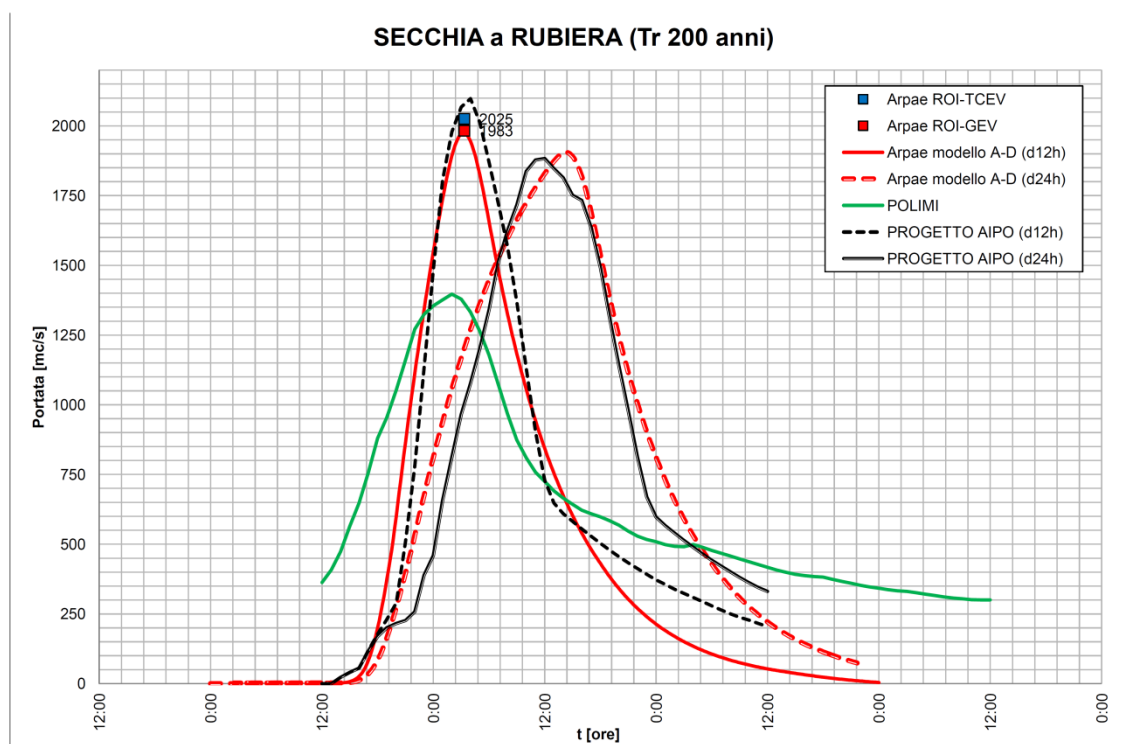


Figura 5.4 – Confronto idrogrammi di piena (Tr 200 anni).

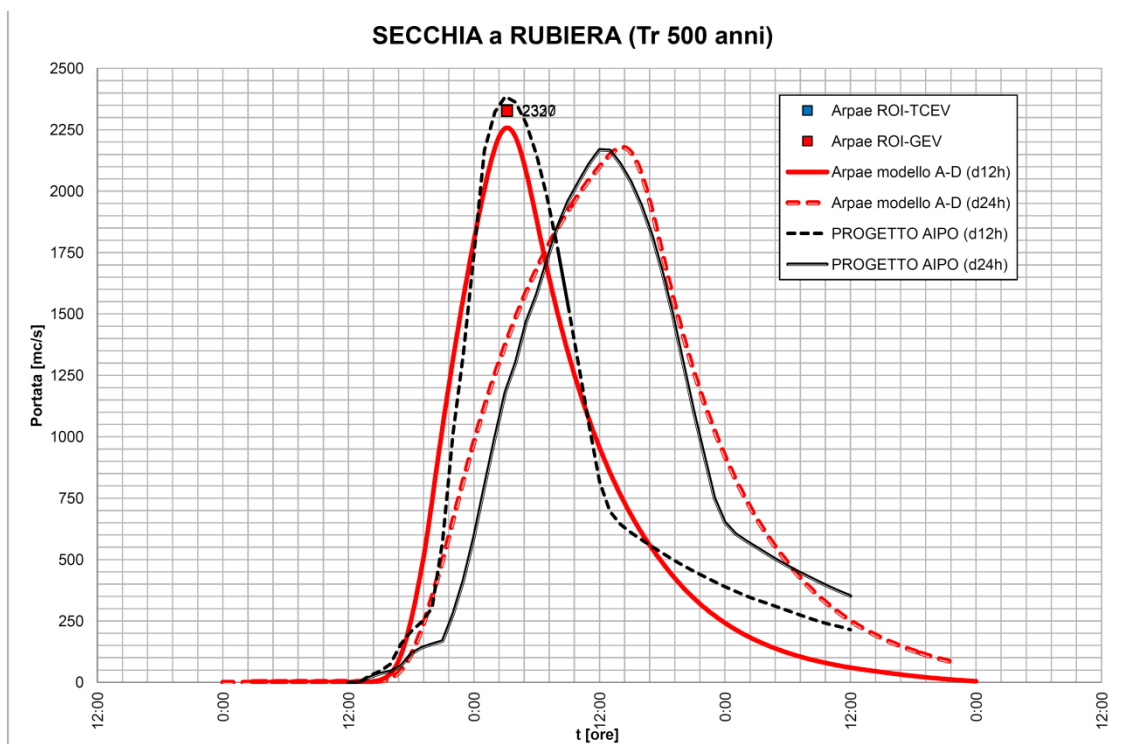


Figura 5.5 – Confronto idrogrammi di piena (Tr 500 anni).

I risultati presentati nelle precedenti tabelle e figure evidenziano che gli idrogrammi di piena, stimati mediante modello idrologico afflussi – deflussi dallo scrivente ufficio, confermano, in sostanza, le valutazioni condotte nello “*Studio idrologico ed idraulico del sistema fluviale asta del Secchia – Cassa di espansione di Rubiera a monte della città di Modena*”, commissionato dall’Autorità di Bacino del Fiume Po a Beta Studio s.r.l. nel quadro dell’attività 3-2-1 del P.A.I. “*Definizione delle portate di piena di riferimento*” e successivamente adottato a base del progetto dell’Agenzia Interregionale per il Fiume Po “*MO-E-1357 – Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell’adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa di espansione esistente; MO-E-1273 – Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia nel Comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero – RER – Parte A)*”.

6. CONCLUSIONI

Nell'ambito del presente studio, descritto nei precedenti capitoli, è stata effettuata la **valutazione degli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno (20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni) in corrispondenza della sezione di ingresso della cassa di espansione ubicata sull'asta del fiume Secchia, nel Comune di Rubiera (RE).**

Premesso che:

- in data 08.02.2013 è stata emanata la Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri recante *“Indirizzi operativi per l'Istituzione dell'Unità di Comando e Controllo del bacino del fiume Po ai fini del governo delle piene, nonché modifiche ed integrazioni alla Direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri del 27 febbraio 2004 e successive modificazioni”*, pubblicata il 26.04.2013 sulla G.U. n°97;
- ai sensi della suesposta Direttiva, L'AIPo, con il supporto della struttura di ARPA-SIMC di Parma, Centro di competenza per la modellistica idrologica, garantisce il funzionamento del sistema di modellistica idrologica e idraulica (**FEWS PO – Flood Early Warning System Po**);
- il sistema FEWS PO è un sistema per la gestione di dati e modellistica in tempo reale, che è stato sviluppato ai fini della previsione idrologica e idraulica, in supporto ai sistemi di allertamento e di governo delle piene. Il sistema integra attualmente tre catene modellistiche idrologico-idrauliche operative in tempo reale (MIKE-NAM÷MIKE-HD, **HEC-HMS**÷HEC-RAS, TOPKAPI÷SOBEK);
- con Determinazione Dirigenziale n. 827 del 15.10.2019 è stato approvato l'”*Accordo di collaborazione, ai sensi dell'art. 15 della L. n. 241/1990 e s.m.i., tra l'Agenzia interregionale per il fiume Po e l'Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia della regione Emilia Romagna, Struttura Idro-Meteo-Clima per l'aggiornamento delle analisi idrologiche per la gestione operativa dei manufatti di laminazione a supporto del sistema FEWS-PO*”;
- l'oggetto del suesposto accordo di collaborazione consiste nell'**aggiornamento delle analisi idrologiche degli eventi di piena temibili** nei bacini di Parma, Crostolo, **Secchia** e Panaro, tutti interessati da casse di espansione soggette alla normativa dighe, al fine di implementare nel sistema FEWS-PO le regole di gestione dei manufatti di laminazione delle piene, sia in tempo reale che in tempo differito;
- nell'ambito del suesposto accordo di collaborazione, con Determinazione Dirigenziale n. 156 del 19.02.2020 si è determinato di affidare al Prof. Ing. Armando

Brath la fornitura di un servizio di ingegneria per il supporto all'aggiornamento delle analisi idrologiche in oggetto. Nell'ambito della fornitura in oggetto, in particolare, è stata condotta **un'analisi statistica dei massimi annuali delle portate al colmo** disponibili in corrispondenza di un set di stazioni idrometriche ubicate nel territorio regionale, effettuata con analisi di frequenza di tipo regionale, mediante applicazione della metodologia "**RoI**" (**Region of influence**), tesa alla valutazione delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno (20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni) in corrispondenza delle sezioni in ingresso alle casse di espansione presenti sulle aste dei torrenti Parma, Crostolo, **Secchia** e Panaro;

- che la stima delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno del Fiume Secchia è stata effettuata in corrispondenza della stazione idrometrica di Secchia a Rubiera SS9, considerata con buona approssimazione coincidente con la sezione di ingresso al manufatto di laminazione;

lo scrivente ufficio ha condotto delle indagini, volte a definire gli idrogrammi di piena, per differenti tempi di ritorno (20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni), all'ingresso del manufatto di laminazione ubicato sull'asta del Fiume Secchia in località Rubiera.

La stima degli idrogrammi di piena è stata effettuata in corrispondenza della stazione idrometrica di Secchia a Rubiera SS9, in coerenza con quanto condotto nell'analisi idrologica predisposta dal Prof. Ing. Armando Brath.

L'analisi idrologica è stata articolata secondo le seguenti fasi:

- c) aggiornamento delle statistiche di pioggia intensa in corrispondenza delle stazioni pluviometriche rappresentative ubicate nell'area di interesse e confronto con i metodi definiti dall'Autorità di Bacino del Fiume Po (*Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica*) e dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche (*Progetto per la Valutazione delle Piene in Italia*);
- d) stima degli idrogrammi di piena prevedibili alla sezione di chiusura di interesse in caso di eventi con tempo di ritorno 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni, mediante applicazione del codice di calcolo HEC-HMS e confronto con i risultati di studi pregressi.

Alla luce delle valutazioni effettuate, si evidenzia come i risultati dello studio idrologico predisposto dallo scrivente ufficio confermino sostanzialmente le valutazioni condotte nello *“Studio idrologico ed idraulico del sistema fluviale asta del Secchia – Cassa di espansione di Rubiera a monte della città di Modena”*, commissionato dall’Autorità di Bacino del Fiume Po a Beta Studio s.r.l. nel quadro dell’attività 3-2-1 del P.A.I. *“Definizione delle portate di piena di riferimento”* e successivamente adottato a base del progetto dell’Agenzia Interregionale per il Fiume Po *“MO-E-1357 – Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia a comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell’adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa di espansione esistente; MO-E-1273 – Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del fiume Secchia nel Comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero – RER – Parte A”*.

In conclusione si sottolinea, come pure richiesto dalla *“Direttiva Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all’interno delle fasce A e B”* emessa dall’Autorità di Bacino del Fiume Po nel piano del Piano stralcio per l’assetto idrogeologico (P.A.I.), l’importanza di prevedere nel tempo l’esecuzione di regolari interventi di pulizia e manutenzione delle opere idrauliche, in modo da eliminare eventuali accumuli di e depositi di sedimenti che potrebbero formarsi riducendo le sezioni utili di deflusso.