

**Attività di studio finalizzate alla ricostruzione idrologica dell'evento di piena del 11-12 dicembre 2017 e all'aggiornamento dell'idrologia di piena del torrente Enza**

## RELAZIONE TECNICA

Parma, 1 agosto 2019

***Redatto da:***

***Arpae-SIMC Servizio Idrografia e Idrologia Regionale e Distretto Po***

## Sommario

1. Raccolta dati .....	10
1.1. Raccolta dati pluviometrici .....	14
1.2. Raccolta dati idrometrici.....	14
1.3. Informazioni generali sul bacino dell'Enza .....	15
2. Descrizione idrologica dell'evento dell'11-12 dicembre 2017 nei bacini dell'Emilia occidentale e centrale .....	18
2.1. Precipitazioni puntuali .....	18
2.2. Precipitazioni areali.....	21
2.3. Analisi delle precipitazioni .....	23
2.4. Idrometria .....	26
3. Elaborazioni statistiche.....	31
3.1. Analisi statistica dei dati pluviometrici .....	31
3.1.1. Distribuzione GEV .....	31
3.1.2. Distribuzione TCEV .....	35
3.1.3. Confronto dei risultati.....	42
3.2. Analisi statistica dei dati idrometrici.....	44
3.2.1. Distribuzione GEV delle portate al colmo di piena .....	44
3.2.2. Distribuzione TCEV delle portate al colmo .....	47
3.2.3. Confronto dei risultati.....	50
3.3. Analisi statistica con il metodo delle copule.....	52
4. Definizione degli idrogrammi di progetto .....	53
4.1. Dati disponibili .....	54

4.2.	Idrogrammi sintetici - SDH .....	54
4.3.	Idrogrammi da analisi bivariata portate al colmo – volumi.....	61
4.3.1.	Modello triangolare .....	65
4.3.2.	Modello del serbatoio lineare.....	66
4.3.3.	Modello di Nash .....	66
5.	Analisi relativa agli scenari di cambiamento climatico .....	68
5.1.	Precipitazioni.....	68
5.2.	Test di Student .....	69
5.2.1.	Analisi della varianza del campione mediante test F.....	70
5.2.2.	Analisi della distribuzione normale del campione mediante test di Shapiro-Wilk....	70
5.2.3.	Analisi della media del campione mediante test di Student. ....	71
5.3.	Effetti sui colmi di piena.....	72
5.4.	Idrogrammi e cambiamento climatico.....	76
6.	Prodotti consegnati.....	77
7.	Conclusioni.....	79
	Bibliografia .....	81

## Indice delle figure

<b>Figura 1. Stazioni pluviometriche ricadenti nel bacino dell'Enza (pallini gialli)</b> .....	11
<b>Figura 2. Stazioni idrometriche ricadenti nel bacino dell'Enza (triangolini rossi)</b> .....	12
<b>Figura 3. Sezioni fluviali oggetto di studio</b> .....	13
Figura 4. Andamento degli afflussi (istogramma) e dei deflussi medi mensili (linea continua) del fiume Enza a Vetto (periodo 2012-2016).....	17
Figura 5. Sezione idrometrica del torrente Enza a Vetto.....	17
Figura 6. Quadro di insieme regionale dei pluviogrammi orari delle stazioni interessate dalle precipitazioni.....	19
Figura 7. Diagramma di severità delle precipitazioni puntuali .....	21
Figura 8. Andamento delle precipitazioni areali orarie e del tempo di ritorno per finestra mobile di 1, 3, 6, 12 e 24 ore.....	23
Figura 9. Quadro di insieme dei pluviogrammi orari delle stazioni ricadenti nei bacini dell'Enza e limitrofi.....	24
Figura 10. Precipitazioni areali sul bacini dell'Enza chiuso a Vetto (rosso) ed a Sorbolo (Blu) .....	25
Figura 11. Portate di pioggia [m <sup>3</sup> /s] calcolate alle chiusure di Vetto (viola), Sorbolo (verde) e differenza tra le due (rosso).....	25
Figura 12. Idrogramma registrato alla stazione di Vetto (tratto dal sistema FEWS).....	27
Figura 13. Idrogramma registrato alla stazione di Sorbolo (tratto dal sistema FEWS) .....	27
Figura 14. Cartogramma probabilistico di Gumbel per la stazione di Enza a Vetto .....	29
Figura 15. Cartogramma probabilistico di Gumbel per la stazione di Enza a Vetto e Valle Termina Masdone .....	30
Figura 15 Composizione del foglio di lavoro "Dati" .....	33
Figura 16 Composizione del foglio di lavoro "GEV" .....	33
Figura 17 Composizione del foglio di lavoro "Consistenza" .....	34
Figura 18 del foglio di lavoro "Statistiche" .....	34

Figura 19. Esempi di cartogramma probabilistico per differenti durate di pioggia intensa e diverse stazioni pluviometriche.....	43
Figura 20. Stima della curva di crescita mediante distribuzione GEV .....	45
Figura 21. Distribuzioni GEV delle portate al colmo per la stazione di Vetto.....	45
Figura 22. Distribuzione TCEV: cartogramma probabilistico per differenti livelli di regionalizzazione, L1 ed L3 .....	49
Figura 23. Distribuzioni GEV (sinistra) e TCEV (destra): cartogramma probabilistico relativo alla sezione Enza a Vetto. ....	50
Figura 24. Confronto delle portate al colmo per assegnato tempo di ritorno alla sezione di Vetto e Termina Masdone, modello GEV e TCEV .....	51
Figura 25. Confronto tra coefficienti di riduzione campionari e funzioni analitiche.....	56
Figura 26. Confronto tra fattori di posizione osservati e funzioni analitiche .....	58
Figura 27 - SDH Enza a Vetto.....	59
Figura 28 - SDH Enza a Cedogno .....	59
Figura 29 - SDH Enza a Cerezzola .....	60
Figura 30 - SDH Enza a Guardasone .....	60
Figura 31 - SDH Enza a valle Termina Masdone.....	61
Figura 32. Idrogrammi ricostruiti da una copula $Q_c - V$ a valle della confluenza Termina – Masdone .....	67
Figura 33. Scenari RCP.....	68
Figura 34. Confronto tra TCEV in clima attuale e in condizioni di cambiamento climatico .....	76
Figura 35. Confronto idrogrammi di tipo SDH per la sezione a valle confluenza Termina - Masdone in condizioni attuali e di cambiamento climatico .....	77

## **Premessa**

Nel periodo gennaio 2018 – marzo 2019, Arpae SIMC Servizio Idrologia ha svolto le attività di studio finalizzate alla ricostruzione idrologica dell'evento di piena del 11-12 dicembre 2017 e all'aggiornamento dell'idrologia di piena del torrente Enza.

In particolare, sono state eseguite le seguenti attività:

- raccolta dei dati pluviometrici ed idrometrici;
- descrizione del bacino;
- descrizione e caratterizzazione dell'evento di piena dell'11-12 dicembre 2017;
- elaborazione statistica dei dati pluviometrici ed idrometrici raccolti;
- analisi delle proiezioni climatiche in termini pluviometrici ed idrometrici;
- definizione degli idrogrammi di progetto.

La raccolta dati ha riguardato le informazioni pluviometriche ed idrometriche ed ha consentito:

- l'aggiornamento al 2017 delle serie storiche di precipitazione intensa pubblicate;
- l'aggiornamento al 2017 delle serie storiche dei massimi annuali della portata al colmo di piena;
- l'aggiornamento delle scale di deflusso;
- l'analisi degli idrogrammi disponibili.

La descrizione e caratterizzazione dell'evento di piena dell'11-12 dicembre 2017 comprende:

- raccolta ed analisi delle osservazioni termo-pluviometriche ed idrometriche;
- raccolta ed analisi dei risultati modellistici;
- caratterizzazione statistica.

Le elaborazioni statistiche, necessarie per stimare le precipitazioni con assegnati tempi di ritorno, hanno compreso:

- analisi regionale della variabile precipitazione intensa, mediante determinazione della curva di crescita e stima del valore indice;
- aggiornamento delle statistiche puntuali delle piogge intense;
- aggiornamento delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica.

Le elaborazioni statistiche, necessarie per stimare la portata al colmo di piena con assegnato tempo di ritorno e le coppie di valori (portata al colmo, volume) con assegnato tempo di ritorno, hanno compreso:

- analisi regionale della variabile massime annuali di portata al colmo al colmo di piena;
- aggiornamento delle statistiche delle portate al colmo;
- studio congiunto di portate al colmo e volumi degli idrogrammi in corrispondenza del superamento di un' assegnata soglia.

Le attività relative alla definizione degli idrogrammi di progetto alle principali sezioni idrometriche individuate sono state eseguite applicando i seguenti approcci:

- metodo degli idrogrammi sintetici;
- metodo delle copule (portata al colmo, volume) e definizione degli idrogrammi corrispondenti.

Le attività relative alle proiezioni climatiche hanno riguardato:

- stima della variazione percentuale, tra il periodo osservato e l'orizzonte di proiezione climatica, della media delle precipitazioni massime annuali esorarie e giornaliere;
- stima della variazione del valore delle portate indice al colmo attraverso un metodo basato sulle variazioni delle precipitazioni desunte dalle proiezioni climatiche;
- calcolo degli idrogrammi di progetto.

Le informazioni pluviometriche ed idrometriche raccolte ed i risultati ottenuti nell'ambito del presente studio vengono consegnati in copia digitale.

Il presente studio è stato svolto in coerenza con il quadro di riferimento fornito dalla normativa, dagli strumenti di pianificazione, dai programmi e dagli accordi vigenti; le metodologie di calcolo e di analisi ivi adottate derivano dalla normativa tecnica, dagli standard internazionali e dalla letteratura scientifica disponibile; tutti gli strumenti utilizzati sono stati già testati con esito positivo nell'ambito di progetti in corso o già conclusi, secondo le metodologie in uso o in corso di implementazione, presso Arpae SIMC - Servizio Idrologia.

Il contenuto del presente studio corrisponde a quanto richiesto ad Arpae nell'ambito del Piano Operativo delle Attività concordato e la presente relazione finale ne descrive le attività svolte, i risultati conseguiti ed i prodotti forniti.

## 1. Raccolta dati

Nell'ambito delle attività svolte si è proceduto inizialmente alla raccolta dei dati pluviometrici ed idrometrici, aggiornati al 2017, provenienti dalle stazioni della rete idro-pluviometrica ricadenti nel bacino dell'Enza, Figura 1 e Figura 2. Si riporta inoltre la mappa delle sezioni poste lungo l'asta alla chiusura dei principali sottobacini dell'Enza: Vetto, Cedogno, Cerezzola, Guardasone, valle confluenza Termina-Masdone, Figura 3.









In particolare, i dati idrometrici raccolti sono riferiti alle stazioni di: Currada, Compiano, Lonza, Selvanizza sull'Enza, Selvanizza sul Cedra, Vetto e Sorbolo. Per tali stazioni, sono state utilizzate le serie storiche dei massimi annuali di portata al colmo di piena aggiornate al 2017, ai fini delle successive attività di elaborazione statistica e caratterizzazione dell'evento di piena del dicembre 2017. Inoltre, ai fini dell'analisi regionale sono stati utilizzati i dati idrometrici delle stazioni ricadenti nei bacini limitrofi del Secchia e Panaro, riportate nella stessa Tabella2.

Per quanto riguarda le serie storiche nelle stazioni idrometriche dell'Enza si riporta di seguito la Tabella 2, relativa alla consistenza della serie massime annuali di portata al colmo di piena utilizzate. A tal riguardo, si precisa che le osservazioni relative alla stazione di Enza a Sorbolo coprono il periodo 1926-2017, con numerosità campionaria pari a 35 anni, mentre la stazione di Enza a Vetto dispone di osservazioni che vanno dal 2008 al 2017, con numerosità campionaria pari a 10 anni. Le altre stazioni con numerosità inferiore a 15 anni risultano essere: Enza a Selvanizza, Cedra a Selvanizza, Lonza, Compiano, Currada.

I dati sono disponibili nel file "consegna\_colmi.xlsx", foglio di lavoro "Dati".

**Tabella 2. Consistenza delle stazioni idrometriche**

Bacino	Località	Area [km <sup>2</sup> ]	Quota media [m s.l.m.]	Inizio periodo	Fine periodo	Anni effettivi	Portata max [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Portata min [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Portata media [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
ENZA	<i>SORBOLO</i>	655	616	<i>1935</i>	<i>2017</i>	36	527	165	344
SECCHIA	<i>PONTE CAVOLA</i>	348	971	<i>1936</i>	<i>2017</i>	29	591	65	187
SECCHIA	<i>LUGO</i>	693	919	<i>2003</i>	<i>2017</i>	15	739	111	417
ENZA	<i>VETTO</i>	299	897	<i>2008</i>	<i>2017</i>	10	644	187	311
PANARO	<i>PONTE SAMONE</i>	584	939	<i>2004</i>	<i>2017</i>	12	667	127	413
ENZA	<i>SELVANIZZA CEDRA</i>	80	1042	<i>2008</i>	<i>2017</i>	7	292	61	130
ENZA	<i>SELVANIZZA ENZA</i>	85	1046	<i>2003</i>	<i>2008</i>	6	55	22	41
ENZA	<i>LOENZA</i>	61	755	<i>2003</i>	<i>2016</i>	10	114	11	48
ENZA	<i>COMPIANO</i>	101	568	<i>2004</i>	<i>2017</i>	14	80	8	45
ENZA	<i>CURRADA</i>	429	784	<i>2003</i>	<i>2009</i>	7	406	113	225

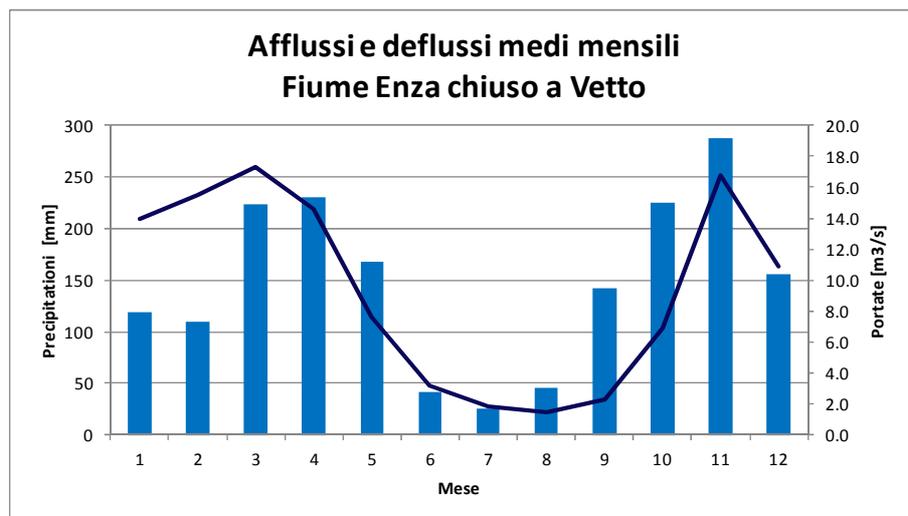
### 1.3. Informazioni generali sul bacino dell'Enza

Il bacino dell'Enza ha una superficie complessiva di circa 890 km<sup>2</sup>, di cui il 64% ricade in ambito montano. Nel bacino sono presenti alcuni laghi naturali, come il lago Verde, artificiali, come il lago Paduli, e piccoli invasi artificiali, che alimentano le centrali idroelettriche di Rigoso, Rimagna, Isola Palanzano e Selvanizza. Il torrente Enza nasce presso il passo del Giogo e il monte Palerà, in prossimità del crinale tosco-emiliano. Dalla sorgente fino a località Canossa il corso d'acqua si sviluppa in direzione Nord-Est, quindi prosegue verso valle prevalentemente in direzione Nord fino allo sbocco in pianura, raggiungendo una lunghezza di circa 100 Km. L'asta principale si può distinguere in due tratti: la parte dell'Alta Val d'Enza, in cui il torrente si incunea tortuosamente tra le rocce dell'Appennino, e la Val d'Enza in cui il torrente si dipana nel versante meridionale

della Pianura Padana. In pianura il corso d'acqua forma una vasta conoide avente apice a S. Polo, successivamente prosegue arginato fino alla confluenza nel fiume Po in prossimità di Brescello. Lungo il suo percorso, il torrente Enza riceve numerosi affluenti, i principali di sinistra sono i torrenti Cedra, Bardea, Termina e Masdona, quelli di destra i torrenti Liocca, Andrella, Lonza, Tassobbio e Cerezzola.

Il regime pluviale del bacino dell'Enza, di tipo sub-litoraneo appenninico, è contraddistinto da elevata piovosità nelle zone prossime al crinale mentre nella parte collinare e di pianura la piovosità è modesta. Il regime idrologico è di tipo torrentizio, con eventi di piena nei periodi autunnali e primaverili, di magra nel periodo invernale e di quasi secca nel periodo estivo. Le caratteristiche morfologiche e litologiche del bacino, la forma e l'acclività media dei versanti implicano ridotti tempi di corrivazione, con rapida formazione delle piene ed elevati valori delle portate al colmo.

Portando l'attenzione sul bacino dell' Enza chiuso a Vetto, con superficie di  $300 \text{ km}^2$ , il volume d'acqua che entra mediamente in un anno, sotto forma di precipitazioni piovose e nevose, è di circa 505 milioni di  $\text{m}^3$ , corrispondenti a 1685 mm di pioggia; mentre il deflusso medio annuo risulta di 290 milioni di  $\text{m}^3$  (55% dell'afflusso). Il restante 45% delle precipitazioni esce dal sistema infiltrandosi nel terreno o tornando in atmosfera per evapotraspirazione oppure viene prelevato per attività antropiche. La distribuzione media mensile delle precipitazioni e dei deflussi viene evidenziata in Figura 4; si possono osservare due stagioni piovose, primavera ed autunno, e due stagioni secche, inverno ed estate; in particolare nel trimestre estivo di norma cade solo il 10 % delle precipitazioni totali annue.



**Figura 4. Andamento degli afflussi (istogramma) e dei deflussi medi mensili (linea continua) del fiume Enza a Vetto (periodo 2012-2016)**



**Figura 5. Sezione idrometrica del torrente Enza a Vetto**

L'andamento mensile dei deflussi rispecchia, nel complesso, quello delle piogge; in particolare, il deflusso del trimestre estivo risulta di norma pari a circa il 5% del totale annuo. Una spiccata variabilità delle condizioni idrologiche si riscontra anche alla scala annuale: non sono rari anni con precipitazioni pari al doppio o alla metà della media.

Un'altra caratteristica del bacino è la concentrazione degli afflussi in eventi di breve durata: ad esempio, nell'evento meteorologico estremo di dicembre 2017, quasi un sesto del totale medio annuo di precipitazione è caduto in sole 48 ore. Le informazioni disponibili sul cambiamento climatico, riassunte nel piano nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici e nella Strategia regionale e nazionale di mitigazione ed adattamento per i cambiamenti climatici, mostrano per gli anni a venire una significativa probabilità di incremento delle durate dei periodi secchi e dell'evapotraspirazione potenziale. Con riferimento agli eventi di piena le proiezioni future mostrano una tendenza alla concentrazione dei deflussi in intervalli temporali più brevi, con conseguenti piene di maggior entità.

Infine, in Figura 5 si riporta un'immagine relativa alla sezione idrometrica del torrente Enza a Vetto (vista lato monte del ponte dove è ubicato l'idrometro).

## 2. Descrizione idrologica dell'evento dell'11-12 dicembre 2017 nei bacini dell'Emilia occidentale e centrale

L'evento di piena nel bacino dell'Enza del'11 e 12 dicembre 2017 è avvenuto in concomitanza con fenomeni meteo idrologici più estesi, sviluppatisi dal 10 al 12 dicembre, che hanno interessato i bacini occidentali e centrali della regione Emilia-Romagna, causando ingenti danni; nella giornata di domenica 10 dicembre si sono verificati fenomeni di pioggia che gela nelle colline del piacentino, parmense, reggiano, modenese e bolognese. Nelle giornate tra domenica 10 e lunedì 11, si segnalano piogge significative sui settori appenninici centro occidentali con cumulate di 300-500 mm in 36 ore. Nel corso dell'evento, in particolare tra le giornate dell'11 e 12 dicembre, le precipitazioni si sono estese anche ai sottobacini di valle, determinando significativi eventi di piena, di elevato volume, su tutti gli affluenti emiliani del Po e sul fiume Reno. In particolare, sono stati interessati i bacini del Trebbia, Taro, Parma, Enza e Secchia con superamenti dei livelli di riferimento L3 sui fiumi Aveto, Trebbia, Taro, Baganza, Parma, Enza e Secchia e dei livelli L2 su Arda, Ceno, Panaro e Reno; in alcune sezioni dei tratti terminali dei fiumi Parma, Enza e Secchia sono stati superati i livelli idrometrici massimi storici registrati dall'inizio della telemisura.

Infine, si segnala che si sono verificate rotture arginali del fiume Enza nel Comune di Brescello (RE) con allagamenti dell'abitato di Lentigione; inoltre, sono state registrate tracimazioni del fiume Parma nell'abitato di Colorno (PR).

### 2.1. Precipitazioni puntuali

Le precipitazioni hanno avuto inizio intorno alle 12:00 del 10 dicembre e sono terminate all'incirca alle 12:00 del 12 dicembre, per una durata complessiva di 48 ore.

Di seguito si riportano, in forma di tabelle e diagrammi, le precipitazioni che hanno caratterizzato l'evento. In Figura 6 si riporta il quadro di insieme regionale dei pluviogrammi orari registrati nelle stazioni pluviometriche in telemisura della rete gestita da Arpa, mentre nella successiva Figura 9 si riporta il quadro d'insieme dei pluviogrammi orari delle stazioni ricadenti nei bacini dell'Enza e limitrofi.

In Tabella 3 sono elencati i valori delle precipitazioni osservate dalle 12:00 del 10 dicembre alle 12:00 del 12 dicembre (totale 48 h) in alcune stazioni rappresentative dei bacini emiliani occidentali.

In Tabella 4 si riportano le precipitazioni puntuali massime osservate [mm] nelle durate 1, 3, 6, 12 e 24 [ore] ed i corrispondenti tempi di ritorno [anni] in alcune stazioni ricadenti nel bacino

dell'Enza, mentre in Figura 7, per le medesime stazioni della Tabella 4 , viene rappresentato il diagramma di severità delle precipitazioni puntuali osservate.

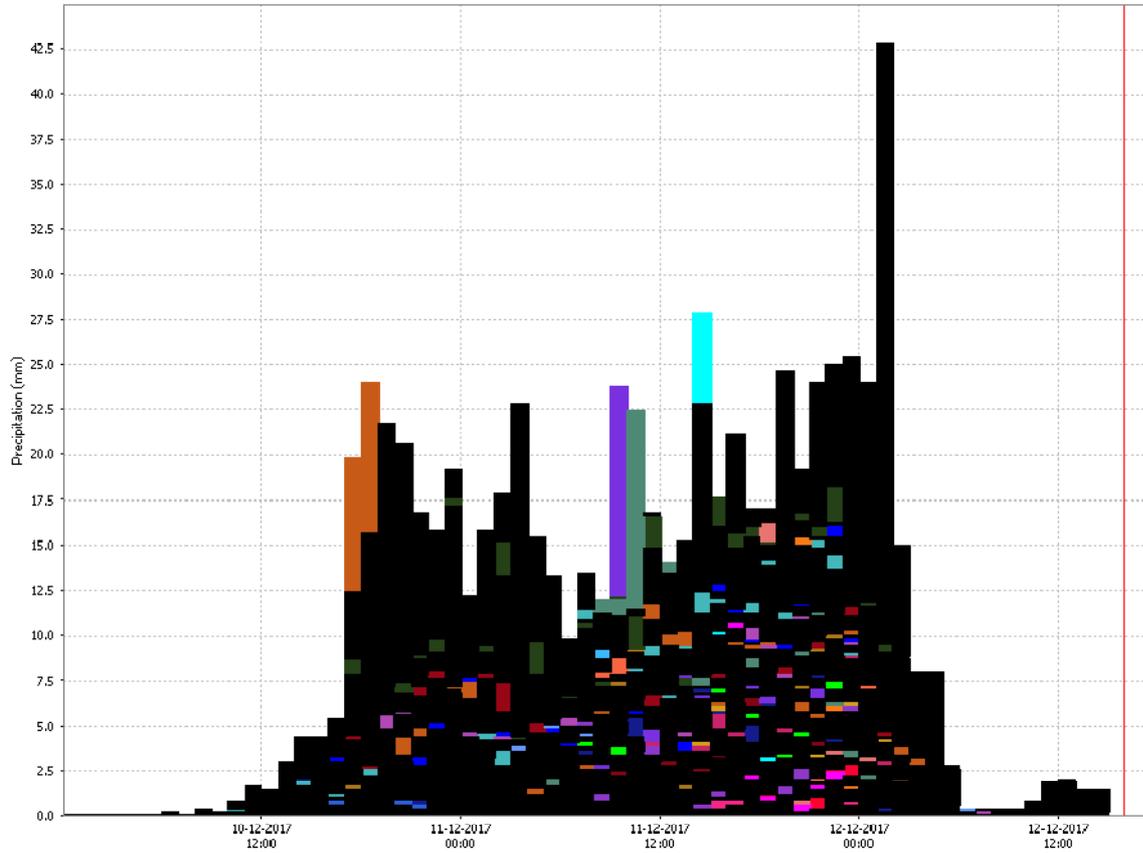


Figura 6. Quadro di insieme regionale dei pluviogrammi orari delle stazioni interessate dalle precipitazioni

Tabella 3. Precipitazioni osservate in alcuni pluviometri ricadenti nei bacini emiliani occidentali

Stazione	Bacino	10 dic (ore 12-24)	11 dic	12 dic (ore 00-12)	Totale h [mm]
Barbagelata	Aveto (Tebbia)	32,4	393,0	1,2	426,6
Diga del Brugneto	Brugneto (Tebbia)	24,8	269,8	5,8	300,4
Santa Maria del Taro	Taro	32,6	280,6	9,4	322,6
Tarsogno	Taro	51,2	237,8	20,0	309,0
Bosco di Corniglio	Parma	73,8	299,8	26,0	399,6
Marra	Parma	0,4	213,6	38,2	252,2
Lago Ballano	Enza	92,6	239,8	28,2	360,6
Collagna	Enza	81,2	201,6	42,8	325,6
Succiso	Enza	94,0	298,0	49,0	441,0
Febbio	Secchia	57,8	156,0	63,2	277,0
Pievepelago	Panaro	58,0	159,2	46,8	264,0

Tabella 4. Precipitazioni osservate massime [mm] e tempi di ritorno [anni] nelle durate 1, 3, 6, 12 e 24 ore

Stazione	Bacino	1 ora		3 ore		6 ore		12 ore		24 ore	
		Tempo di ritorno (anni)	Prec (mm)								
Lago Ballano	Enza	1.2	24.8	1.2	48.2	1.5	84.2	2.2	136.0	9.3	245.0
Neviano Arduini	Enza	3.0	26.0	3.0	36.6	3.9	48.6	2.0	50.8	1.2	50.8
Ramiseto	Enza	1.0	13.6	1.6	33.2	3.0	58.0	8.6	98.0	10.6	129.0
Succiso	Enza	1.3	24.2	3.0	59.4	3.6	92.2	7.1	160.2	26.8	298.4

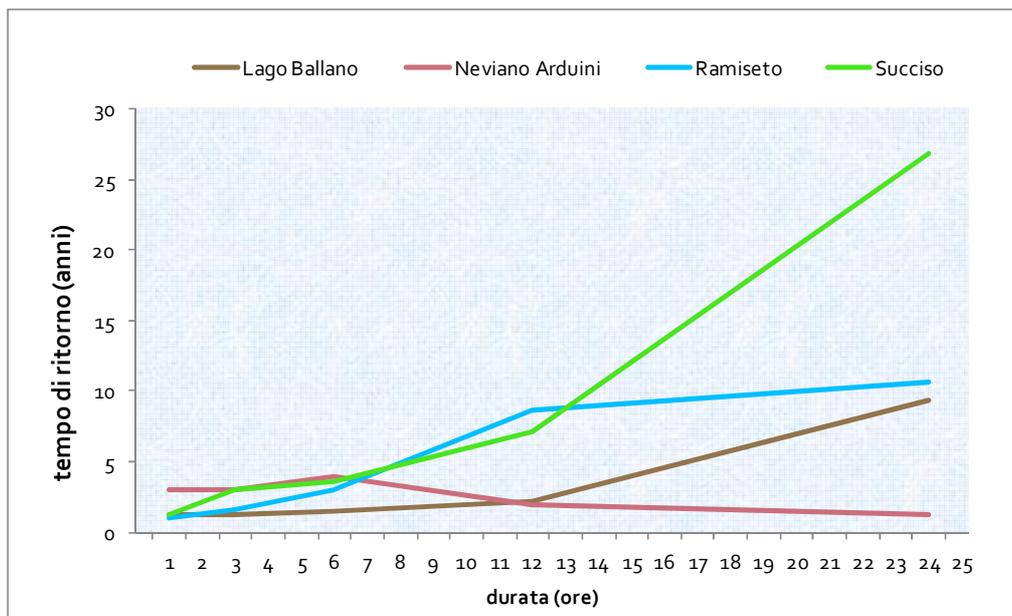


Figura 7. Diagramma di severità delle precipitazioni puntuali

## 2.2. Precipitazioni areali

Nell'ambito del presente studio è stata eseguita l'analisi delle precipitazioni areali, della quale sono di seguito riportate alcune informazioni che si ritengono particolarmente significative.

In particolare in Tabella 5 si riportano le altezze ed i corrispondenti volumi di afflusso registrati tra le 12:00 del 10 e le 12:00 del 12 dicembre 2017 relative ai bacini dei fiumi Trebbia, Taro, Parma, Enza, Secchia e Panaro chiusi alle sezioni montane, mentre nella successiva Tabella 6 si riportano le altezze ed i corrispondenti volumi di afflusso registrati tra le 12:00 del 10 e le 12:00 del 12 dicembre 2017 relativi agli stessi bacini chiusi alle sezioni di pianura.

**Tabella 5. Altezze e volumi di afflusso sui bacini dal Trebbia al Panaro chiusi alle sezioni montane**

Bacino	Superficie [km <sup>2</sup> ]	Stazione idrometrica	h [mm]	V [Mm <sup>3</sup> ]
<b>Trebbia</b>	653	Bobbio	235	153,5
<b>Taro</b>	349	Borgotaro	225	78,5
<b>Parma</b>	111	Corniglio	266	29,5
<b>Enza</b>	80	Selvanizza	275	22,0
<b>Secchia</b>	347	Ponte Cavola	196	68,0
<b>Panaro</b>	271	Ponte Val di Sasso	177	48,0

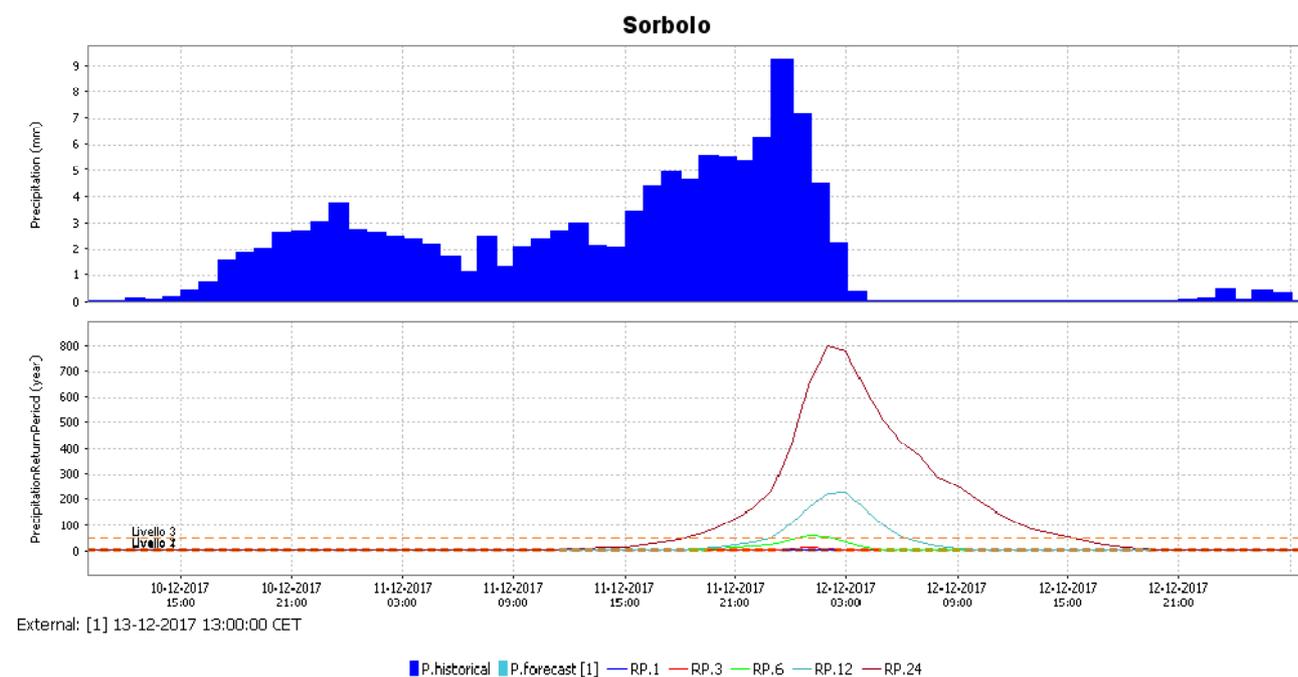
**Tabella 6. Altezze e volumi di afflusso sui bacini dal Trebbia al Panaro chiusi alle sezioni di pianura**

Bacino	Superficie [km <sup>2</sup> ]	Stazione idrometrica	h[mm]	V [Mm <sup>3</sup> ]
<b>Trebbia</b>	915	Rivergaro	181	165,6
<b>Taro</b>	711	Fornovo	138	98,1
<b>Parma</b>	297	Langhirano	157	46,6
<b>Parma</b>	624	Ponte Verdi	111	69,3
<b>Enza</b>	299	Vetto	207	61,5
<b>Enza</b>	655	Sorbolo	116	76,0
<b>Secchia</b>	694	Lugo	163	113,1
<b>Secchia</b>	1303	Rubiera SS9	100	130,3
<b>Panaro</b>	583	Ponte di Samone	147	85,7
<b>Panaro</b>	758	Spilamberto	119	90,2

Con riferimento al bacino dell'Enza chiuso alla sezione idrometrica di Sorbolo, nella Figura 8 si riportano:

- l'andamento della precipitazione oraria media areale;
- l'andamento del tempo di ritorno associato alle precipitazioni medie areali nelle durate 1, 3, 6, 12 e 24 ore;

Si osserva che il massimo tempo di ritorno della precipitazione media areale nella durata 12 ore è risultato pari a circa 200 anni, mentre il massimo tempo di ritorno corrispondete alla durata di 24 ore è risultato superiore a 500 anni.



**Figura 8. Andamento delle precipitazioni areali orarie e del tempo di ritorno per finestra mobile di 1, 3, 6, 12 e 24 ore.**

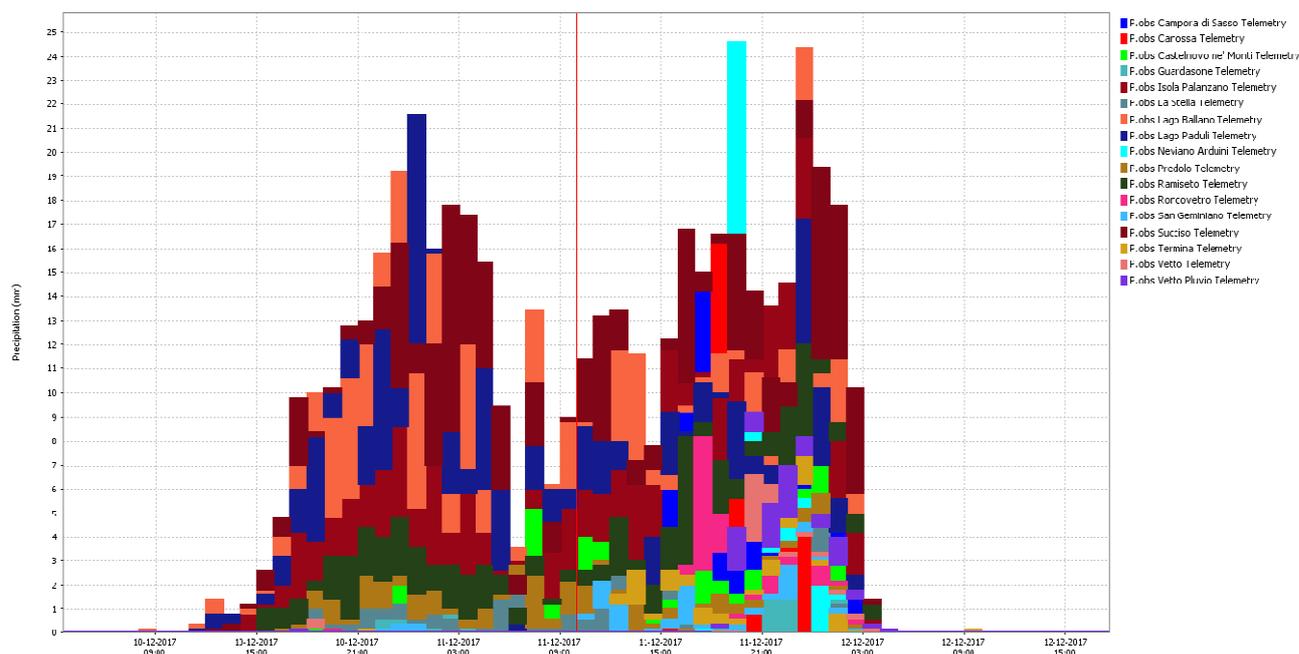
I tempi di ritorno associati agli afflussi sono stati calcolati secondo la metodologia riportata nell'Allegato 7 (De Michele et al. 2011).

### 2.3. Analisi delle precipitazioni

Ai fini della successiva analisi idrometrica, l'evento può essere distinto principalmente in due fasi. La fase 1, nella quale si sono osservati i primi picchi idrometrici, si è verificata tra le 12:00 del 10 dicembre e le 12:00 dell'11 dicembre ed ha interessato principalmente la parte montana del bacino dell'Enza.

La fase 2, nella quale si sono osservati i picchi idrometrici più significativi, si è verificata tra le 12:00 dell'11 e le 06:00 del 12 dicembre; in tale fase precipitazioni di considerevole intensità si sono estese alla porzione di valle del bacino dell'Enza, contribuendo, in tutte le sezioni di riferimento, all'ulteriore incremento dei livelli idrometrici generati dalle onde di piena in transito.

La Figura 9 riporta il quadro di insieme degli andamenti pluviometrici alle stazioni appartenenti alla rete idro-pluviometrica regionale ricadenti nei bacini dell'Enza e limitrofi.



**Figura 9. Quadro di insieme dei pluviogrammi orari delle stazioni ricadenti nei bacini dell'Enza e limitrofi**

In generale le precipitazioni maggiori si sono registrate ai pluviometri di testa del bacino a monte di Vetto, con valori puntuali cumulati sull'evento di circa 200-300 mm ed intensità massime dell'ordine di 20-24 mm/h. La parte residua di bacino, come detto, è stata sollecitata solamente nella seconda fase dell'evento, registrando puntualmente precipitazioni cumulate sull'evento di 50-60 mm, ma con intensità orarie puntuali paragonabili a quelle registrate nella porzione montana. In allegato 7 vengono forniti i dati di precipitazione a passo orario registrati durante l'evento.

Nella Figura 10 sono messi a confronto gli andamenti orari delle precipitazioni areali calcolate sui bacini chiusi rispettivamente a Vetto ed a Sorbolo; moltiplicando tali precipitazioni per la superficie del bacino, si ottengono le portate di pioggia orarie, Figura 11, definite come il volume affluito nell'unità di tempo sul bacino considerato ed espresse in m<sup>3</sup>/s.

Dall'analisi delle precipitazioni e delle portate di pioggia, si può affermare che il contributo dell'interbacino tra Vetto e Sorbolo può considerarsi praticamente nullo nella prima fase dell'evento, mentre diventa consistente nella seconda fase, risultando pari al 25-30% del totale in termini di portata di pioggia e pari al 30-35% in termini di volume.

Infine, nella Tabella 7 si riportano i valori registrati ai pluviometri in occasione del primo e del secondo scroscio.

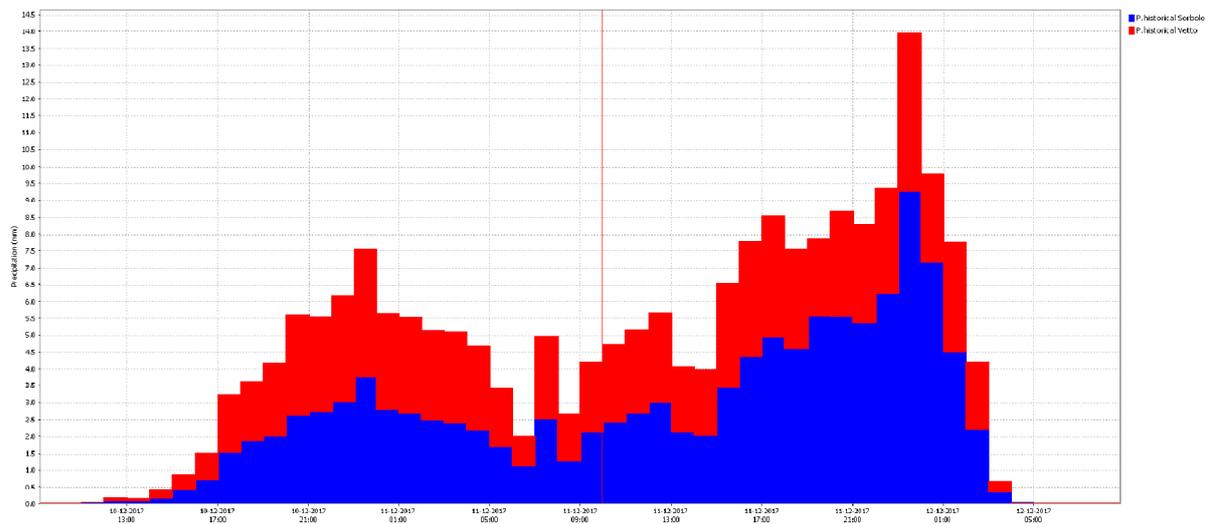


Figura 10. Precipitazioni areali sul bacini dell'Enza chiuso a Vetto (rosso) ed a Sorbolo (Blu)

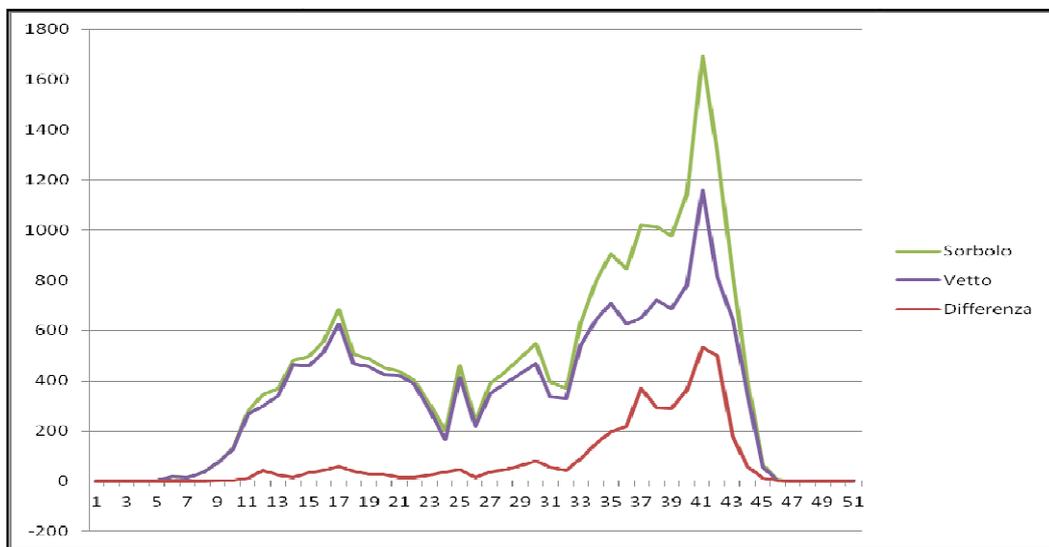


Figura 11. Portate di pioggia [ $m^3/s$ ] calcolate alle chiusure di Vetto (viola), Sorbolo (verde) e differenza tra le due (rosso)

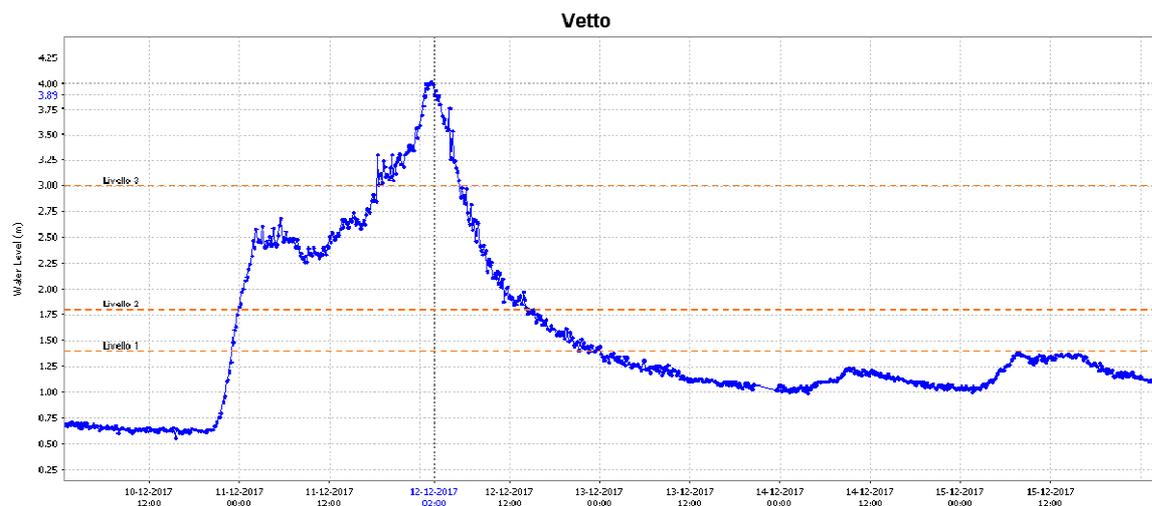
Tabella 7. Valori delle precipitazioni e dei massimi orari relativi al primo ed al secondo scroscio.

Bacino	Stazione	1° scroscio [mm]	2° scroscio [mm]	Totale evento [mm]	Massimo orario [mm/h]
<b>Monte</b>	Isola Palanzano	90.6	169.0	259.6	14.2
<b>Monte</b>	Lago Ballano	181.4	179.6	361.0	16.2
<b>Monte</b>	Lago Paduli	165.6	142.8	308.4	7.0
<b>Monte</b>	Ramiseto	50.2	114.4	164.6	7.4
<b>Monte</b>	Succiso	204.4	236.6	441.0	20.6
<b>Monte</b>	Vetto	0.6	26.6	27.2	4.6
<b>Monte</b>	Vetto Pluvio	0.2	46.0	46.2	24.4
<b>Valle</b>	Campora di Sasso	2.4	67.4	69.8	21.6
<b>Valle</b>	Canossa	0.0	38.0	38.0	24.6
<b>Valle</b>	Castelnovo Monti	12.4	54.0	66.4	5.8
<b>Valle</b>	Guardasone	3.0	19.2	22.2	12.0
<b>Valle</b>	La Stella	11.8	27.4	39.2	8.2
<b>Valle</b>	Neviano Arduini	0.0	50.8	50.8	4.6
<b>Valle</b>	Predolo	27.0	35.6	62.6	22.2
<b>Valle</b>	Roncovetro	1.0	33.8	34.8	7.4
<b>Valle</b>	San Geminiano	1.0	23.0	24.0	6.6
<b>Valle</b>	Termina	0.2	33.2	33.4	9.2

## 2.4. Idrometria

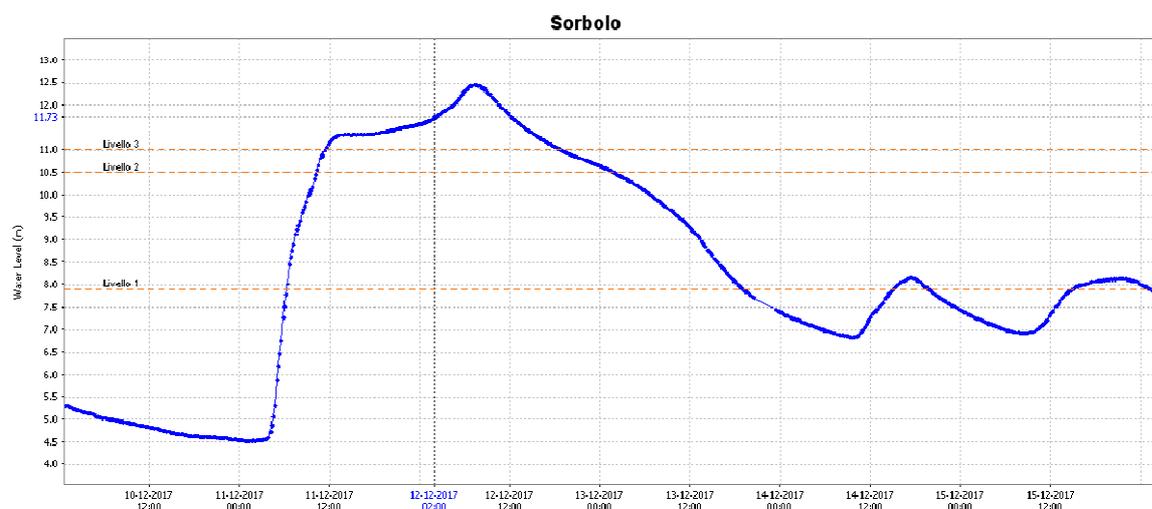
Nel presente paragrafo si riportano le principali caratteristiche dell'evento di piena, con riferimento alle sezioni idrometriche del fiume Enza a Vetto e Sorbolo.

In Figura 12 è rappresentato l'idrogramma osservato in corso di evento alla stazione di Vetto. Gli incrementi idrometrici hanno avuto inizio nel pomeriggio del 10 dicembre. Dopo un breve intervallo, durante il quale i livelli sono rimasti pressoché stabili, si è assistito ad un nuovo progressivo incremento a partire dal pomeriggio dell'11 dicembre, che ha portato a raggiungere il picco alle ore 01:30 locali.



**Figura 12. Idrogramma registrato alla stazione di Vetto (tratto dal sistema FEWS)**

Proseguendo verso valle nella sezione di Sorbolo, Figura 13, i primi incrementi si sono verificati nelle prime ore della mattina dell'11 dicembre. Dopo una fase sostanzialmente stabile, si è verificata una successiva risalita dei livelli, a partire dalle ultime ore dell'11 dicembre, fino al raggiungimento del valore di picco registrato alle ore 07:20 del 12 dicembre.



**Figura 13. Idrogramma registrato alla stazione di Sorbolo (tratto dal sistema FEWS)**

La Tabella 8, di seguito riportata, riassume alcune informazioni significative, relative alle sezioni di Vetto e Sorbolo, e le caratteristiche idrometriche del colmo di piena, comprese la stima della portata al colmo e la durata D del superamento del livello di riferimento L2. Si evidenzia:

- il superamento dei livelli idrometrici massimi storici;
- la notevole durata dei livelli idrometrici al di sopra della soglia di riferimento L2;

- l'uniformità della durata del superamento del livello L2 nelle stazioni di Vetto e Sorbolo.

**Tabella 8. Dati idrometrici significativi nelle sezioni di Vetto e Sorbolo.**

Sezione	zero idrometrico [m.s.m]	Ora (CET)	h max [m.s.z.i.]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H max storica [m.s.z.i.]	L1 [m]	L2 [m]	D>L2 [h]	L3 [m]
<b>Vetto</b>	311,97	01:30	4,02	644	3,04	1,40	1,80	38	3,00
<b>Sorbolo</b>	23,762	07:20	12,47	439	12,20	7,90	10,00	40	11,00

La stima della portata al colmo di piena è stata condotta sulla base dei dati, previsioni, informazioni storiche, "run" modellistici disponibili ed attraverso ulteriori analisi specifiche condotte nell'ambito del presente studio.

Dalle analisi statistiche è risultato che la stima del tempo di ritorno attribuibile all'evento osservato nel dicembre 2017, in termini di portata al colmo dell'Enza a Vetto, risulta di circa 200 anni se si considera la stima al livello 3, circa 400 anni se si utilizza la stima al livello 1. Con riferimento alla serie storica dei massimi annuali delle portate al colmo del fiume Enza a Vetto, che copre un periodo dal 2008 al 2016, la Figura 14 riporta la frequenza campionaria dei dati appartenenti alla serie storica (plotting position), il diagramma della distribuzione TCEV con livello di regionalizzazione L1 ed L3 ed il valore del tempo di ritorno/frequenza cumulata attribuibile alla portata stimata a Vetto in occasione dell'evento del dicembre 2017.

La stima al livello 3 del tempo di ritorno attribuibile all'evento del dicembre 2017, per una portata simulata al colmo di piena a valle della confluenza Termina e Masdone di circa 800 m<sup>3</sup>/s, risulta di circa 170 anni, così come rappresentato in figura 15.

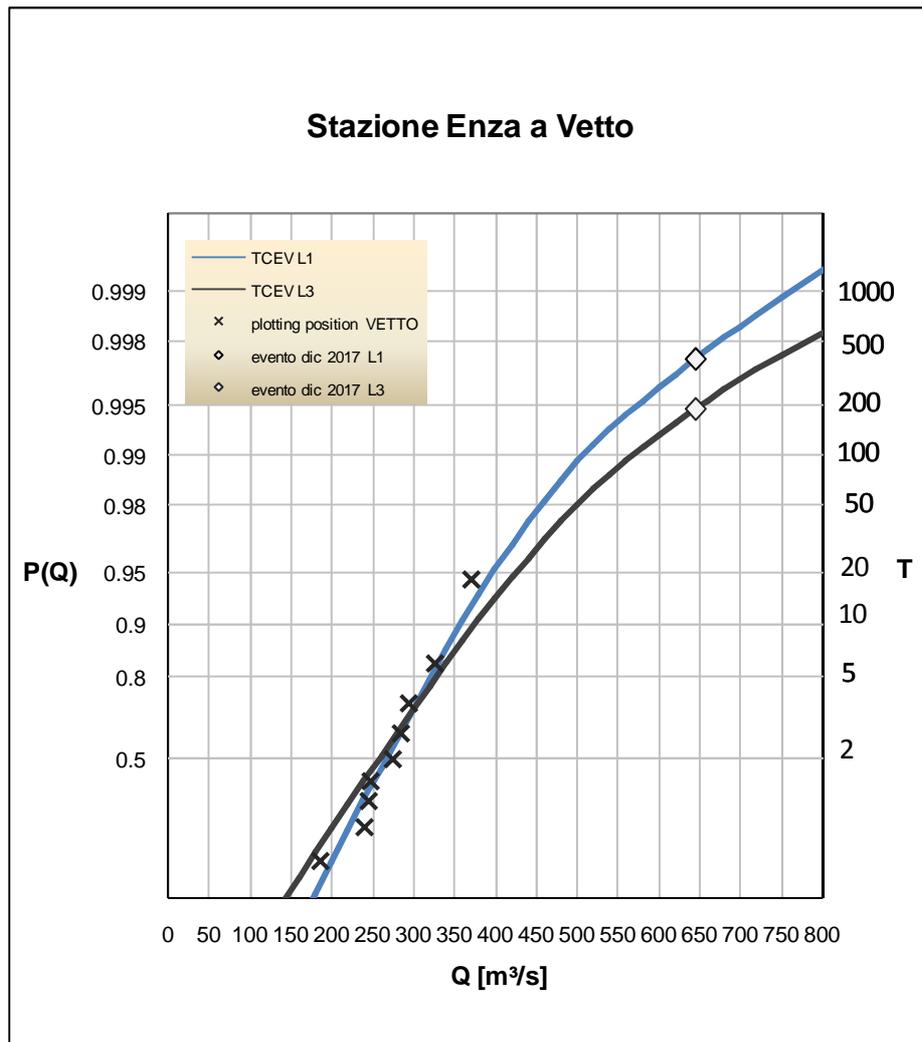


Figura 14. Cartogramma probabilistico di Gumbel per la stazione di Enza a Vetto

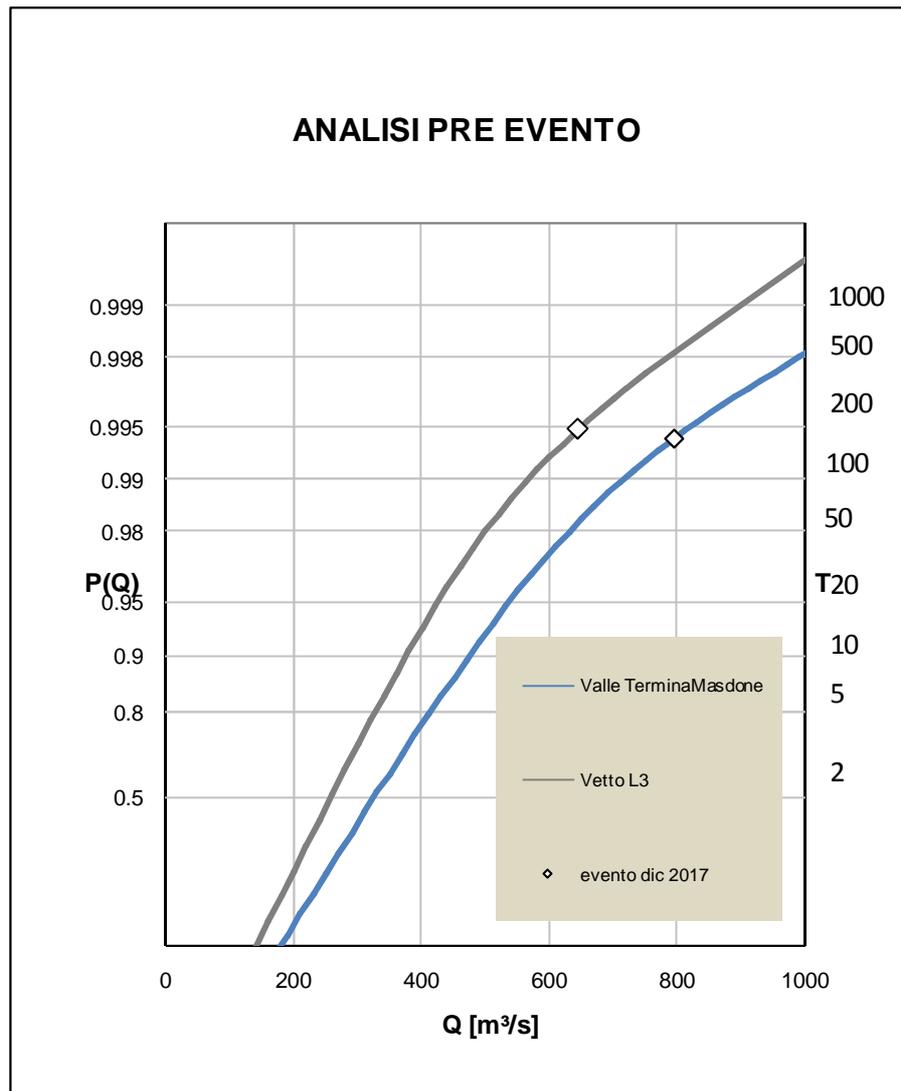


Figura 15. Cartogramma probabilistico di Gumbel per la stazione di Enza a Vetto e Valle Termina Masdone

Tabella 9. – Parametri della distribuzione TCEV per le stazioni idrometriche di Vetto e Valle confluenza Termina e Masdone per la stima del tempo di ritorno attribuibile all’evento osservato nel dicembre 2017

Stazione	Metodo	$\theta_1$	$\theta_2$	$\Lambda_1$	$\Lambda_2$	$\theta^*$	$\Lambda^*$
Vetto	L1	44.62	130.13	254.29	0.35	2.9163	0.0523
Vetto	L3	57.21	166.83	58.98	0.21	2.9163	0.0523
Valle confluenza Terminae Masdone	L3	72.24	210.66	58.98	0.21	2.9163	0.0523

### 3. Elaborazioni statistiche

#### 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 le seguenti fasi di lavoro:

- applicazione della distribuzione GEV (determinazione della curva di crescita e spazializzazione del valore indice, considerando stazioni aventi numerosità campionaria  $\geq 10$  anni; stima puntuale su campione avente numerosità  $\geq 15$  anni);
- applicazione della distribuzione TCEV, con un livello di regionalizzazione L1;
- confronto dei risultati.

##### 3.1.1. Distribuzione GEV

L'espressione della probabilità di non superamento  $F_X(x)$  attraverso la distribuzione GEV (Generalized Extreme Value; Jenkinson, 1955) è di seguito riportata:

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

dove X indica la variabile casuale "altezza di pioggia massima annuale" per fissata durata, espressa in mm e  $k < 0$ .

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

$$F_X(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{(x - \varepsilon)}{\alpha}\right]\right\} \quad (2)$$

I risultati ottenuti dall'applicazione della distribuzione GEV sono forniti sotto forma di schede e griglie. In particolare, nelle schede sono restituiti i risultati relativi a ciascun pluviometro in forma

tabellare; per le stazioni aventi numerosità  $\geq 15$  anni, sono posti a confronto i risultati ottenuti da stima puntuale e mediante tecniche di regionalizzazione.

La griglia di restituzione dei risultati dello studio ha passo 2 km e copre l'area di competenza dei bacini Enza e Crostolo; in particolare, essa è caratterizzata dai seguenti dettagli:

- X Minimum: 581000 m;
- X Maximum: 645000 m;
- X Spacing: 2000 m;
- Y Minimum: 4907000 m;
- Y Maximum: 4981000 m;
- Y Spacing: 2000 m.

Si consegnano i dati sulla base dei quali sono state effettuate le elaborazioni in formato excel. Il file "Statistiche P GEV\_2017.xlsx" si compone di 4 fogli di lavoro, da Figura 16 a Figura 19, nel seguito descritti:

- Foglio di lavoro "Dati";
- Foglio di lavoro "GEV";
- Foglio di lavoro "Consistenza";
- Foglio di lavoro "Statistiche"

Foglio di lavoro "Dati". Per ciascuna stazione ricadente nel territorio in esame contiene rispettivamente: le coordinate relative nel sistema di riferimento UTM ED50 [m]; la quota [m s.m.m.]; i dati [mm] riferiti ai singoli anni ed alle durate in esame; l'area considerata omogenea nello studio.

Foglio di lavoro "GEV". Per ciascuna stazione ricadente nel territorio in esame e per fissata durata (1, 3, 6, 12 e 24 ore, indicata dopo il nome serie) contiene: il periodo di osservazione; la media della serie storica disponibile; i parametri della GEV derivanti da stima puntuale. Nelle colonne P – R sono forniti i parametri della curva di crescita per fissata durata.

Foglio di lavoro "Consistenza": per ciascuna stazione ricadente nel territorio oggetto di studio, e per fissata durata (1, 3, 6, 12 e 24 ore, indicata dopo il nome serie) contiene il periodo cui si riferisce la serie storica.

Foglio di lavoro "Statistiche": contiene per la singola stazione ricadente nel territorio oggetto di studio, per fissata durata (1, 3, 6, 12 e 24 ore, con h indicante le ore), il periodo cui si riferisce la serie storica, la numerosità campionaria, i valori minimo, massimo, medio e la deviazione standard, in mm.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	AREA	Nome	Est	Nord	Elev	Anno	1h	3h	6h	12h	24h		
2	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1966	25	37.6	42	52.8	76		
3	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1967	23	26	43.4	49	67.2		
4	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1968	25	29.2	30.4	37.8	52		
5	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1969	18	28.8	31.4	38.8	45.4		
6	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1970	21	37.4	47.4	47.4	64.4		
7	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1971	35	39.2	39.2	39.2	67.2		
8	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1972	23	26.4	26.4	50.6	83.2		
9	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1973	23	38.4	52.4	90.6	95.8		
10	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1974	29	29.2	29.2	33.4	39.6		
11	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1975	18	28.2	32.4	62.6	73.2		
12	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1976	25	24.6	24.6	25.2	50.6		
13	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1978	18	29.4	31.4	46.2	53.6		
14	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1980	28	45	55	69.2	70		
15	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1981	22	27	37	45.4	85		
16	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1982	38	48.6	69.6	70.2	78.8		
17	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1983	17	17.2	17.2	19.6	36.4		
18	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1985	12	21.2	22.2	22.2	26		
19	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1986	33	41	49	51	54		
20	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	1988	21	26	27.4	36.2	36.8		
21	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	2004	33	57.6	67	85.6	91.2		
22	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	2005	17	29.8	36	56.8	69.6		
23	Enza_crostolo	BASILICAGOIANO	611432	4951275	113	2006	6.4	6.6	10	16.4	24.4		
24	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2003	21	21.2	28.4	39.4	55.2		
25	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2005	26	40.2	54.6	57.6	83.8		
26	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2006	56	70.4	70.4	70.4	70.4		
27	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2007	16	20.2	31.6	43.6	74.8		
28	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2008	18	32.4	43	65.6	96.6		
29	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2009	17	20.8	29.8	40	67.6		
30	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2010	21	23.6	27.8	42.2	51.2		
31	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2011	38	42.2	46	47.8	52		
32	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2012	24	26.8	29.6	47.4	49.2		
33	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2013	28	34.2	40.4	45.6	56		
34	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2014	19	26.2	37.2	51.2	58.8		
35	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2015	11	20.8	32.8	53.8	68.6		
36	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2016	22	22.8	25.2	26	34.4		
37	Enza_crostolo	CANOSSA	616481	4935972	516	2017	42	42.8	42.8	60.2	87.4		
38	Enza_crostolo	CASTELNOVOAGRO	624357	4965881	23	2007	19	22.8	24.4	36.4	53		
39	Enza_crostolo	CASTELNOVOAGRO	624357	4965881	23	2008	35	47.2	56.6	79.4	80.6		
40	Enza_crostolo	CASTELNOVOAGRO	624357	4965881	23	2009	38	37.8	37.8	38	43.2		
41	Enza_crostolo	CASTELNOVOAGRO	624357	4965881	23	2010	22	31.8	36.4	36.6	43.6		

Figura 16 Composizione del foglio di lavoro "Dati"

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
	Serie	Tipi	Data	Al	Media	GEV1	GEV2	GEV3	GEV4	GEV5	GEV6								
2	BASILICAGOIANO (12h)	Puntale	1966	2006	50.8	16.3871	38.6956	0	7.209009			Enza_crostolo (12h)	Areale	1927	2017	0.270552	0.820435	-0.07559	135.2044
3	BASILICAGOIANO (1h)	Puntale	1966	2006	24.6	6.33814	19.5143	0	0	0	0	Enza_crostolo (1h)	Areale	1927	2017	0.241628	0.839896	-0.00762	136.6254
4	BASILICAGOIANO (24h)	Puntale	1966	2006	76	17.767	50.6719	0	5.636364			Enza_crostolo (1h)	Areale	1927	2017	0.269028	0.821121	-0.09191	101.784
5	BASILICAGOIANO (3h)	Puntale	1966	2006	37.6	8.9974	26.5712	0	12.54845			Enza_crostolo (6h)	Areale	1927	2017	0.247483	0.836106	-0.07961	136.4189
6	BASILICAGOIANO (6h)	Puntale	1966	2006	42	12.5216	30.0724	0	6.363636										
7	CASTELNOVOMONTE (12h)	Puntale	1952	2016	72	10.667	44.5121	0	5.569231										
8	CASTELNOVOMONTE (1h)	Puntale	1952	2016	26	7.6952	20.0172	-0.0181677	3.876923										
9	CASTELNOVOMONTE (24h)	Puntale	1952	2016	62	13.8368	58.3862	0	6.107693										
10	CASTELNOVOMONTE (3h)	Puntale	1952	2016	38	8.50129	27.4841	-0.097819	7.492308										
11	CASTELNOVOMONTE (6h)	Puntale	1952	2016	55	8.20766	34.0911	-0.1296144	4.8										
12	ISOLAPALANZANO (12h)	Puntale	1927	2017	54	18.2521	61.4122	0	11.27202										
13	ISOLAPALANZANO (1h)	Puntale	1927	2017	26	7.90763	23.7024	-0.00912495	16.29864										
14	ISOLAPALANZANO (24h)	Puntale	1927	2017	62	21.8948	77.98	-0.1011969	23.93888										
15	ISOLAPALANZANO (3h)	Puntale	1927	2017	33	11.3451	35.5079	0	12.18506										
16	ISOLAPALANZANO (6h)	Puntale	1927	2017	42	13.8045	46.5122	0	11.80825										
17	LAGOBALLANO (12h)	Puntale	1982	2017	226.2	32.6608	124.466	0	2.04417										
18	LAGOBALLANO (1h)	Puntale	1982	2017	40.2	7.63819	32.2416	-0.2539918	7.041667										
19	LAGOBALLANO (24h)	Puntale	1982	2017	262.4	44.7385	155.701	0	2.041667										
20	LAGOBALLANO (3h)	Puntale	1982	2017	114.4	18.9076	59.1256	-0.1324431	2.416667										
21	LAGOBALLANO (6h)	Puntale	1982	2017	161.8	26.9208	89.9484	0	2.416667										
22	LAGOPADOLI (12h)	Puntale	1937	2017	106	27.509	95.2252	-0.176128	2.892857										
23	LAGOPADOLI (1h)	Puntale	1937	2017	41	8.83311	31.0531	-0.1261155	6.892856										
24	LAGOPADOLI (24h)	Puntale	1937	2017	115	37.7382	127.699	-0.1126789	9.464286										
25	LAGOPADOLI (3h)	Puntale	1937	2017	63	15.2255	52.6583	-0.1291706	6.229167										
26	LAGOPADOLI (6h)	Puntale	1937	2017	74	19.4832	70.2751	-0.1355256	10.22517										
27	LASTELLA (12h)	Puntale	2002	2017	30.8	13.6054	41.1459	0	3.541667										
28	LASTELLA (1h)	Puntale	2002	2017	21.4	6.60106	20.34	-0.3389910	0.416667										
29	LASTELLA (24h)	Puntale	2002	2017	37	16.8414	48.6472	-0.00932706	0.541667										
30	LASTELLA (3h)	Puntale	2002	2017	23.4	9.80778	26.7146	-0.207966	0.104167										
31	LASTELLA (6h)	Puntale	2002	2017	23	10.9509	32.0483	-0.1394777	2.354167										
32	MAROLA (12h)	Puntale	1930	1959	56	8.01895	44.345	0	1.29246										
33	MAROLA (1h)	Puntale	1930	1959	21	5.08382	21.6283	-0.0206874	7										
34	MAROLA (24h)	Puntale	1930	1959	67	12.8477	57.606	0	5.666667										
35	MAROLA (3h)	Puntale	1930	1959	44	5.95082	28.223	0	2.982456										
36	MAROLA (6h)	Puntale	1930	1959	56	7.10938	35.163	0	7										
37	MONTECHIARUGOLO (12h)	Puntale	1931	1964	38	10.8664	46.5931	0	1.838462										
38	MONTECHIARUGOLO (1h)	Puntale	1931	1964	32	7.43722	21.5216	-0.0814854	3.155555										
39	MONTECHIARUGOLO (24h)	Puntale	1931	1964	41	14.5014	58.3103	0	2.72077										
40	MONTECHIARUGOLO (3h)	Puntale	1931	1964	36	9.9152	29.1447	0	2.292857										
41	MONTECHIARUGOLO (6h)	Puntale	1931	1964	37	10.6926	36.6091	-0.10065117	6.911385										

Figura 17 Composizione del foglio di lavoro "GEV"

Figura 18 Composizione del foglio di lavoro "Consistenza"

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Tipologia	Serie	Nome	Variable	Dal	Al	Min	Max	Media	N	DevSt		
2	Puntuale	BASILICAGOIANO (1h)	BASILICAGOIANO	01h	1966	2006	6.4	38.0	23.17	22	7.53		
3	Puntuale	BASILICAGOIANO (3h)	BASILICAGOIANO	03h	1966	2006	6.6	57.6	31.56	22	11.01		
4	Puntuale	BASILICAGOIANO (6h)	BASILICAGOIANO	06h	1966	2006	10.0	69.6	37.30	22	15.01		
5	Puntuale	BASILICAGOIANO (12h)	BASILICAGOIANO	12h	1966	2006	16.4	90.6	47.55	22	19.66		
6	Puntuale	BASILICAGOIANO (24h)	BASILICAGOIANO	24h	1966	2006	24.4	95.8	60.93	22	20.56		
7	Puntuale	CASTELNOVOMONTI (1h)	CASTELNOVOMONTI	01h	1952	2016	9.6	60.4	24.24	52	9.26		
8	Puntuale	CASTELNOVOMONTI (3h)	CASTELNOVOMONTI	03h	1952	2016	16.8	76.2	33.30	52	11.93		
9	Puntuale	CASTELNOVOMONTI (6h)	CASTELNOVOMONTI	06h	1952	2016	20.4	76.2	40.00	52	11.86		
10	Puntuale	CASTELNOVOMONTI (12h)	CASTELNOVOMONTI	12h	1952	2016	31.8	78.4	50.67	52	12.67		
11	Puntuale	CASTELNOVOMONTI (24h)	CASTELNOVOMONTI	24h	1952	2016	43.2	115.0	65.59	52	15.80		
12	Puntuale	ISOLAPALANZANO (1h)	ISOLAPALANZANO	01h	1927	2017	11.0	62.4	28.34	68	10.14		
13	Puntuale	ISOLAPALANZANO (3h)	ISOLAPALANZANO	03h	1927	2017	19.0	88.6	42.06	69	14.14		
14	Puntuale	ISOLAPALANZANO (6h)	ISOLAPALANZANO	06h	1927	2017	30.6	98.8	54.53	69	16.70		
15	Puntuale	ISOLAPALANZANO (12h)	ISOLAPALANZANO	12h	1927	2017	33.8	172.6	71.96	69	23.54		
16	Puntuale	ISOLAPALANZANO (24h)	ISOLAPALANZANO	24h	1927	2017	41.2	226.6	93.04	69	32.51		
17	Puntuale	LAGOBALLANO (1h)	LAGOBALLANO	01h	1982	2017	23.8	84.0	39.18	32	14.20		
18	Puntuale	LAGOBALLANO (3h)	LAGOBALLANO	03h	1982	2017	38.8	146.0	72.93	32	27.40		
19	Puntuale	LAGOBALLANO (6h)	LAGOBALLANO	06h	1982	2017	51.0	191.2	105.49	32	32.50		
20	Puntuale	LAGOBALLANO (12h)	LAGOBALLANO	12h	1982	2017	77.6	226.2	143.32	32	38.31		
21	Puntuale	LAGOBALLANO (24h)	LAGOBALLANO	24h	1982	2017	105.0	317.6	181.53	32	53.15		
22	Puntuale	LAGOPADULI (1h)	LAGOPADULI	01h	1937	2017	17.2	102.0	37.40	63	13.77		
23	Puntuale	LAGOPADULI (3h)	LAGOPADULI	03h	1937	2017	35.0	229.4	63.66	64	26.98		
24	Puntuale	LAGOPADULI (6h)	LAGOPADULI	06h	1937	2017	43.8	279.0	84.51	64	33.45		
25	Puntuale	LAGOPADULI (12h)	LAGOPADULI	12h	1937	2017	57.8	368.2	116.67	63	47.51		
26	Puntuale	LAGOPADULI (24h)	LAGOPADULI	24h	1937	2017	74.6	452.6	154.19	63	58.80		
27	Puntuale	LASTELLA (1h)	LASTELLA	01h	2002	2017	15.2	67.8	27.37	16	13.82		
28	Puntuale	LASTELLA (3h)	LASTELLA	03h	2002	2017	15.6	69.4	34.89	16	15.51		
29	Puntuale	LASTELLA (6h)	LASTELLA	06h	2002	2017	21.0	72.4	40.05	16	15.48		
30	Puntuale	LASTELLA (12h)	LASTELLA	12h	2002	2017	23.4	85.0	49.05	16	16.16		
31	Puntuale	LASTELLA (24h)	LASTELLA	24h	2002	2017	30.4	98.0	58.52	16	19.78		
32	Puntuale	MAROLA (1h)	MAROLA	01h	1930	1959	14.4	43.0	24.67	20	6.33		
33	Puntuale	MAROLA (3h)	MAROLA	03h	1930	1959	21.5	47.0	31.66	19	6.83		
34	Puntuale	MAROLA (6h)	MAROLA	06h	1930	1959	22.7	56.0	39.27	21	7.96		
35	Puntuale	MAROLA (12h)	MAROLA	12h	1930	1959	26.0	63.0	48.57	19	9.04		
36	Puntuale	MAROLA (24h)	MAROLA	24h	1930	1959	41.6	91.0	64.73	21	13.73		
37	Puntuale	MONTECHIARUGOLO (1h)	MONTECHIARUGOLO	01h	1931	1964	14.0	58.0	26.19	27	10.11		
38	Puntuale	MONTECHIARUGOLO (3h)	MONTECHIARUGOLO	03h	1931	1964	17.3	66.0	34.87	28	11.85		
39	Puntuale	MONTECHIARUGOLO (6h)	MONTECHIARUGOLO	06h	1931	1964	25.5	82.4	43.09	26	13.21		
40	Puntuale	MONTECHIARUGOLO (12h)	MONTECHIARUGOLO	12h	1931	1964	33.0	82.6	52.87	26	12.66		
41	Puntuale	MONTECHIARUGOLO (24h)	MONTECHIARUGOLO	24h	1931	1964	40.0	104.5	66.72	26	16.97		

Figura 19 del foglio di lavoro "Statistiche"

### 3.1.2. Distribuzione TCEV

L'espressione della probabilità di non superamento  $F_X(x)$  attraverso la distribuzione TCEV (Two-Component Extreme Value; Rossi et al., 1984) è di seguito riportata:

$$F_X(x) = \exp\{-\Lambda_1 \exp(-x/\theta_1) - \Lambda_2 \exp(-x/\theta_2)\} \quad x \geq 0 \quad (3)$$

dove  $X$  indica la variabile casuale "altezza di pioggia massima annuale" per fissata durata, espressa in mm.

La distribuzione TCEV ipotizza che i massimi annuali che compongono una data serie storica non provengano tutti dalla stessa popolazione, ma da due diverse popolazioni legate a differenti fenomeni meteorologici. Questa ipotesi si basa sul fatto che numerose serie storiche dei massimi annuali, siano essi piogge o portate al colmo, presentano uno o più valori (outliers) nettamente maggiori degli altri e tali appunto da sembrare non provenienti dalla medesima popolazione.

Il modello a doppia componente TCEV ingloba in un'unica formulazione i due meccanismi di formazione delle grandezze prese in considerazione (pioggia intensa in questo caso), ovvero quella che viene chiamata componente primaria e la componente straordinaria; esso può essere scomposto nelle due componenti di Gumbel che lo interpretano.

La stima dei parametri ( $\Lambda_1$ ,  $\theta_1$ ,  $\Lambda_2$  e  $\theta_2$ ) di una distribuzione TCEV a partire da una singola serie storica è affetta da incertezza, particolarmente riguardo alla componente straordinaria. Le tecniche di regionalizzazione, a mezzo delle quali viene ridotta l'incertezza grazie al gran numero di dati utilizzati, bilanciando la variabilità spaziale e la variabilità campionaria, diventano quindi di un certo interesse per ottenere affidabili stimatori di parametri e, quindi, un affidabile stimatore di piogge e portate di progetto.

Al fine di applicare adeguatamente le tecniche di regionalizzazione, è utile fare riferimento, anziché alla  $X$ , alla variabile standardizzata:

$$Y = \frac{X}{\theta_1} - \ln \Lambda_1$$

la cui funzione di distribuzione cumulata è fornita dall'espressione:

$$F_Y(y) = \exp[-\exp(-y) - \Lambda_* \exp(-y/\theta_*)] \quad (4)$$

avendo posto:

$$\theta_* = \theta_2 / \theta_1$$

$$\Lambda_* = \Lambda_2 / \Lambda_1^{1/\theta_*}$$

Per ciascuna delle cinque durate di precipitazione in esame sono stati ricavati i parametri della distribuzione TCEV da applicare alle serie storiche incluse nell'analisi, come di seguito illustrato.

Il metodo di stima adottato si ferma al primo livello di regionalizzazione L1 (stima mista), ovvero si identifica nella zona denominata "Enza-Crostolo", di cui si allega lo shapefile corrispondente, l'area omogenea nella quale il coefficiente di asimmetria  $\gamma_1$  risulta costante, e quindi risultano costanti i parametri  $\Lambda_*$  e  $\theta_*$ . La variabile standardizzata Y risulta in tal caso identicamente distribuita. Una volta stimati  $\Lambda_*$  e  $\theta_*$  a partire dalla serie standardizzata composta da tutti i dati disponibili nell'area omogenea, i parametri  $\theta_1$ ,  $\Lambda_1$  e, di conseguenza,  $\theta_2$  e  $\Lambda_2$  si ricavano sulla base della singola serie storica.

Si consegnano i risultati dell'analisi statistica TCEV piogge, mediante il file "Statistiche P TCEV\_2017.xlsx", composto di 5 fogli, uno per ciascuna durata in esame. Di seguito, dalla Tabella 10 alla Tabella 14, sono riportati gli stessi risultati contenuti nel file sopra detto.

Tabella 10. Parametri della distribuzione TCEV applicata alle piogge intense di durata unitaria, relative alle stazioni ricadenti nei bacini Enza e Crostolo.

Parametri	$\theta_* = 2.1296$		$\Lambda_* = 0.2163$	
	$\theta_1$	$\Lambda_1$	$\theta_2$	$\Lambda_2$
<b>Basilicogiano</b>	5.872	29.063	12.504	1.052
<b>Canossa</b>	6.551	17.751	13.952	0.835
<b>Castelnovoagro</b>	7.095	21.535	15.109	0.914
<b>Castelnovomonti</b>	6.016	22.039	12.811	0.924
<b>Cavriagoargo</b>	6.164	20.402	13.127	0.891
<b>Gainagoagro</b>	10.137	14.558	21.588	0.761
<b>Isolapalanzano</b>	6.865	24.758	14.619	0.976
<b>LagoBallano</b>	6.822	101.273	14.529	1.891
<b>LagoPaduli</b>	8.025	39.786	17.091	1.220
<b>LaStella</b>	5.891	30.462	12.545	1.076
<b>Marola</b>	4.247	134.857	9.044	2.164
<b>MonteChiarugolo</b>	6.144	26.470	13.084	1.007
<b>NevianoArduini</b>	3.516	225.055	7.487	2.752
<b>Poviglio</b>	7.842	11.257	16.700	0.674
<b>Predolo</b>	5.235	24.294	11.149	0.967
<b>QuattroCastella</b>	6.684	23.784	14.235	0.958
<b>Ramiseto</b>	4.941	127.380	10.522	2.106
<b>ReggioEmilia</b>	7.195	13.757	15.322	0.741
<b>ReggioEmiliaUrb</b>	5.497	33.318	11.707	1.122
<b>Roncovetro</b>	7.945	10.357	16.919	0.648
<b>Selvanizza</b>	5.833	33.833	12.421	1.130
<b>Succiso</b>	7.478	33.784	15.926	1.130
<b>Vezzano</b>	8.588	10.521	18.289	0.653

**Tabella 11. Parametri della distribuzione TCEV applicata alle piogge intense di durata 3 ore, relative alle stazioni ricadenti nei bacini Enza e Crostolo**

Parametri	$\theta_* = 3.1876$		$\Lambda_* = 0.0582$	
	$\theta_1$	$\Lambda_1$	$\theta_2$	$\Lambda_2$
<b>Basilicogiano</b>	8.585	22.185	27.366	0.154
<b>Canossa</b>	6.918	38.647	22.052	0.183
<b>Castelnovoagro</b>	7.120	52.216	22.696	0.201
<b>Castelnovomonti</b>	7.949	31.396	25.337	0.172
<b>Cavriagoargo</b>	9.797	12.759	31.230	0.129
<b>Gainagoagro</b>	9.718	29.353	30.978	0.168
<b>Isolapalanzano</b>	11.024	25.482	35.139	0.161
<b>LagoBallano</b>	17.650	29.041	56.260	0.167
<b>LagoPaduli</b>	13.977	42.502	44.553	0.189
<b>LaStella</b>	9.435	18.129	30.074	0.144
<b>Marola</b>	5.323	214.821	16.969	0.314
<b>MonteChiarugolo</b>	9.238	24.468	29.446	0.159
<b>NevianoArduini</b>	6.131	79.852	19.542	0.230
<b>Poviglio</b>	9.759	14.290	31.109	0.134
<b>Predolo</b>	8.238	22.169	26.258	0.154
<b>QuattroCastella</b>	9.953	18.017	31.725	0.144
<b>Ramiseto</b>	9.281	43.571	29.583	0.190
<b>ReggioEmilia</b>	9.560	14.168	30.472	0.134
<b>ReggioEmiliaUrb</b>	7.858	29.050	25.048	0.167
<b>Roncovetro</b>	8.679	16.811	27.664	0.141
<b>Selvanizza</b>	9.151	26.622	29.171	0.163
<b>Succiso</b>	13.799	28.293	43.985	0.166
<b>Vetto</b>	7.627	26.706	24.311	0.163
<b>Vezzano</b>	9.8971	17.024	31.548	0.142

Tabella 12. Parametri della distribuzione TCEV applicata alle piogge intense di durata 6 ore, relative alle stazioni ricadenti nei bacini Enza e Crostolo

Parametri	$\theta_* = 3.1069$		$\Lambda_* = 0.0656$	
	$\theta_1$	$\Lambda_1$	$\theta_2$	$\Lambda_2$
<b>Basilicogiano</b>	11.705	13.593	36.366	0.152
<b>Canossa</b>	7.281	87.552	22.620	0.277
<b>Castelnovoagro</b>	8.983	39.153	27.908	0.214
<b>Castelnovomonti</b>	7.933	73.303	24.645	0.261
<b>Cavriagoargo</b>	8.070	46.840	25.072	0.226
<b>Gainagoagro</b>	10.650	29.057	33.087	0.194
<b>Isolapalanzano</b>	13.022	36.985	40.459	0.210
<b>LagoBallano</b>	25.343	36.062	78.738	0.208
<b>LagoPaduli</b>	18.261	45.917	56.734	0.225
<b>LaStella</b>	12.073	15.491	37.508	0.158
<b>Marola</b>	6.204	314.893	19.275	0.418
<b>MonteChiarugolo</b>	9.222	51.877	28.652	0.234
<b>NevianoArduini</b>	9.092	40.332	28.249	0.216
<b>Poviglio</b>	11.498	15.846	35.724	0.160
<b>Predolo</b>	6.735	110.710	20.924	0.298
<b>QuattroCastella</b>	8.266	72.358	25.680	0.260
<b>Ramiseto</b>	8.408	237.362	26.124	0.381
<b>ReggioEmilia</b>	10.196	20.905	31.679	0.175
<b>ReggioEmiliaUrb</b>	5.609	324.146	17.425	0.422
<b>Roncovetro</b>	8.290	48.638	25.756	0.229
<b>Selvanizza</b>	11.911	24.209	37.008	0.183
<b>Succiso</b>	19.026	33.549	59.112	0.203
<b>Vetto</b>	7.124	75.244	22.133	0.264
<b>Vezzano</b>	9.2259	46.5979	28.664	0.226

Tabella 13. Parametri della distribuzione TCEV applicata alle piogge intense di durata 12 ore, relative alle stazioni ricadenti nei bacini Enza e Crostolo

Parametri	$\theta_* = 3.5390$		$\Lambda_* = 0.0306$	
	$\theta_1$	$\Lambda_1$	$\theta_2$	$\Lambda_2$
<b>Basilicogiano</b>	15.328	12.494	54.247	0.062
<b>Canossa</b>	9.052	130.813	32.036	0.121
<b>Castelnovoagro</b>	8.054	135.922	28.501	0.123
<b>Castelnovomonti</b>	9.877	94.914	34.954	0.111
<b>Cavriagoargo</b>	8.162	253.066	28.886	0.146
<b>Gainagoagro</b>	16.898	12.737	59.802	0.063
<b>Isolapalanzano</b>	17.344	33.340	61.381	0.082
<b>LagoBallano</b>	29.872	68.079	105.716	0.101
<b>LagoPaduli</b>	26.883	35.855	95.139	0.084
<b>LaStella</b>	12.599	27.548	44.589	0.078
<b>Marola</b>	7.050	583.497	24.951	0.185
<b>MonteChiarugolo</b>	9.868	119.099	34.924	0.118
<b>NevianoArduini</b>	8.409	232.774	29.759	0.143
<b>Poviglio</b>	13.284	20.676	47.013	0.072
<b>Predolo</b>	7.513	192.156	26.587	0.135
<b>QuattroCastella</b>	8.175	330.880	28.931	0.158
<b>Ramiseto</b>	11.838	147.577	41.896	0.125
<b>ReggioEmilia</b>	12.339	24.091	43.666	0.075
<b>ReggioEmiliaUrb</b>	9.671	91.883	34.226	0.110
<b>Roncovetro</b>	7.662	254.823	27.114	0.146
<b>Selvanizza</b>	14.233	31.535	50.370	0.081
<b>Succiso</b>	26.701	38.273	94.495	0.086
<b>Vetto</b>	8.297	140.466	29.364	0.124
<b>Vezzano</b>	10.8731	63.4401	38.480	0.099

Tabella 14. Parametri della distribuzione TCEV applicata alle piogge intense di durata 24 ore, relative alle stazioni ricadenti nei bacini Enza e Crostolo

Parametri	$\theta_* = 1.9868$		$\Lambda_* = 0.0996$	
	$\theta_1$	$\Lambda_1$	$\theta_2$	$\Lambda_2$
<b>Basilicogiano</b>	16.029	25.125	31.847	0.505
<b>Canossa</b>	13.257	74.011	26.340	0.869
<b>Castelnovoagro</b>	7.394	749.178	14.691	2.787
<b>Castelnovomonti</b>	11.287	158.214	22.425	1.274
<b>Cavriagoargo</b>	11.606	144.279	23.059	1.216
<b>Gainagoagro</b>	16.080	24.435	31.948	0.498
<b>Isolapalanzano</b>	21.348	36.279	42.414	0.607
<b>LagoBallano</b>	41.437	44.861	82.328	0.676
<b>LagoPaduli</b>	35.088	36.199	69.712	0.606
<b>LaStella</b>	15.419	24.988	30.635	0.503
<b>Marola</b>	10.707	237.229	21.272	1.562
<b>MonteChiarugolo</b>	13.235	86.823	26.294	0.942
<b>NevianoArduini</b>	9.177	705.376	18.233	2.704
<b>Poviglio</b>	12.230	58.165	24.299	0.770
<b>Predolo</b>	9.337	213.149	18.551	1.480
<b>QuattroCastella</b>	10.026	473.526	19.919	2.212
<b>Ramiseto</b>	11.676	483.395	23.197	2.235
<b>ReggioEmilia</b>	18.287	14.141	36.333	0.378
<b>ReggioEmiliaUrb</b>	8.817	419.639	17.518	2.082
<b>Roncovetro</b>	10.625	135.641	21.109	1.179
<b>Selvanizza</b>	18.108	31.725	35.977	0.567
<b>Succiso</b>	38.874	22.928	77.234	0.482
<b>Vetto</b>	8.246	763.318	16.384	2.813
<b>Vezzano</b>	19.1225	25.7434	37.993	0.511

### 3.1.3. Confronto dei risultati

Per la stima dei parametri delle distribuzioni di probabilità dei massimi annuali delle precipitazioni o delle portate occorre considerare che si possono presentare due casi:

- A) si dispone di una serie campionaria di valori della variabile considerata (precipitazione intensa, portata al colmo di piena); in tal caso la stima dei parametri può essere: puntuale, nel caso in cui tutti i parametri risultano stimati su base locale a partire dalle serie storica disponibile alla stazione di interesse; regionale nel caso in cui tutti i parametri vengono stimati su base regionale); mista, quando parte dei parametri risultano stimati su base regionale, parte su base locale;
- B) manca la serie campionaria; in tale caso non c'è alternativa ad una stima regionale, basata sulle serie storiche disponibili all'interno della regione nella quale ricade la sezione di interesse.

Ai fini della scelta della distribuzione di probabilità più appropriata, si raccomanda un'accurata disamina del contesto e dei dati relativi alla stazione presa in considerazione.

Di seguito, in Figura 20, si forniscono alcuni esempi di cartogramma probabilistico, per fissata durata, per alcune delle stazioni pluviometriche prese in esame; in essi sono diagrammati la frequenza campionaria e le funzioni di distribuzione cumulata ottenute attraverso i due modelli probabilistici utilizzati GEV e TCEV.

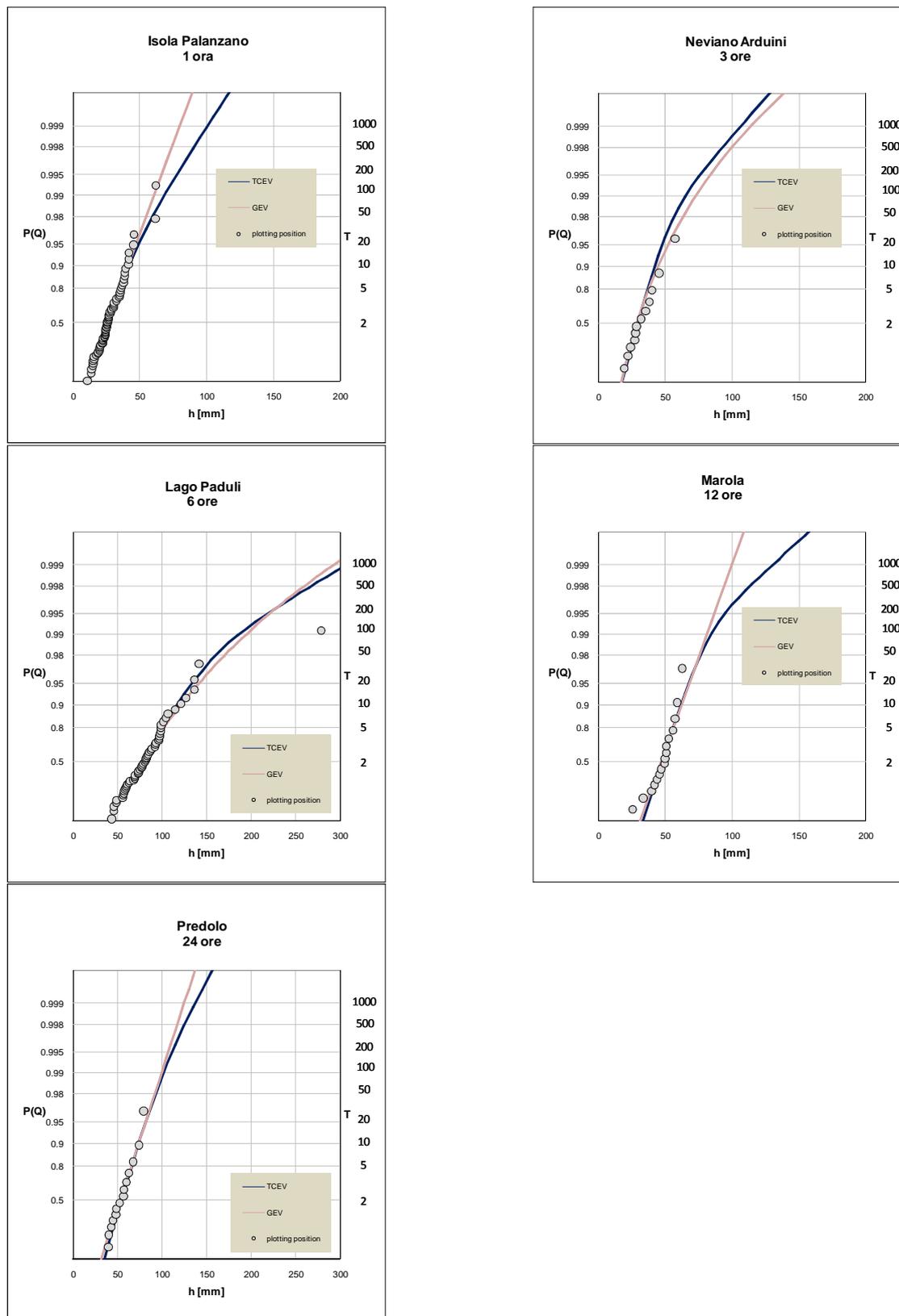


Figura 20. Esempi di cartogramma probabilistico per differenti durate di pioggia intensa e diverse stazioni pluviometriche

## 3.2. Analisi statistica dei dati idrometrici

Sull'area di interesse e con riferimento ai massimi annuali delle portate al colmo di piena si è provveduto all'aggiornamento delle corrispondenti serie storiche e delle statistiche descrittive, attraverso le seguenti fasi di lavoro:

- stima del valore indice della variabile massimo annuale della portata al colmo di piena e calcolo della curva di crescita, mediante modello GEV;
- calcolo della distribuzione di probabilità TCEV con livello di regionalizzazione L1 ed L3;
- analisi e confronto dei risultati.

### 3.2.1. Distribuzione GEV delle portate al colmo di piena

La stima della curva di crescita è stata condotta sul campione adimensionalizzato delle portate al colmo di piena, composto dalle serie storiche relative alle seguenti sezioni: Lonza, Compiano, Ponte Samone, Vetto, Lugo, Ponte Cavola.

La successiva Figura 21 riporta la frequenza campionaria ed il diagramma della distribuzione GEV relativa al campione adimensionale. I parametri stimati con l'analisi regionale sono i seguenti:  $\epsilon = 0.772$ ;  $\alpha = 0.396$ ;  $k = 0.000$

La successiva Figura 22, con riferimento alla stazione Enza a Vetto, riporta la frequenza campionaria ed il diagramma della distribuzione GEV, ricavata mediante stima puntuale e regionale. I parametri corrispondenti sono riportati in Tabella 15.

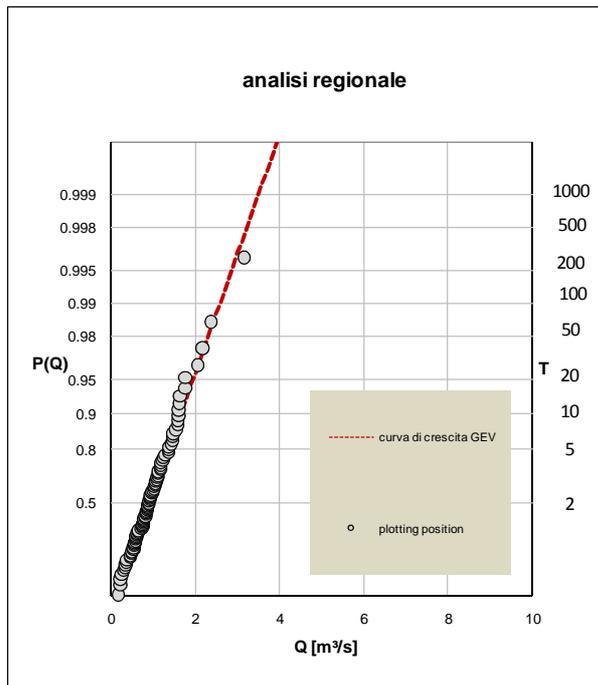


Figura 21. Stima della curva di crescita mediante distribuzione GEV

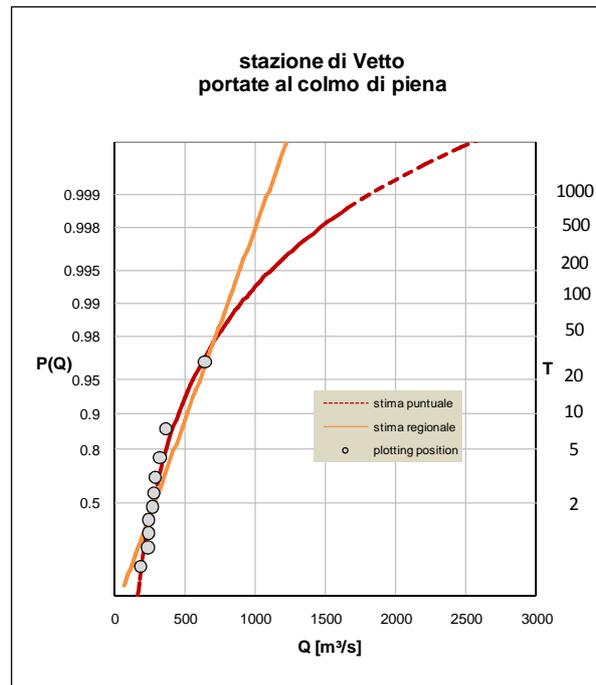


Figura 22. Distribuzioni GEV delle portate al colmo per la stazione di Vetto

Tabella 15. – Parametri della distribuzione GEV per la stazione di Vetto

GEV	Stima puntuale	Regionalizzata
$\epsilon$	245.892	239.9
$\alpha$	63.665	123.1
$k$	-0.314	0.000

Successivamente sono state prese in considerazione le sezioni idrometriche elencate in Tabella 16.

**Tabella 16. Caratteristiche delle sezioni idrometriche prese in considerazione nel presente studio**

Sezione	A, area (Km <sup>2</sup> )
<b>Vetto</b>	299
<b>Valle Tassobbio</b>	417
<b>Cerezzola</b>	458
<b>Guardasone</b>	481
<b>Valle confluenza Termina e Masdone</b>	602

Per le sezioni non strumentate, la portata indice è stata stimata, a partire dal valore calcolato a Vetto (sezione strumentata) tramite la formula empirica di Gherardelli-Marchetti (Maione, 1999) ottenendo i valori elencati nella Tabella 17.

**Tabella 17. Valori della portata indice ottenuti per le sezioni non strumentate oggetto del presente studio**

Sezione	Qindice, m <sup>3</sup> /s
<b>Valle confluenza Tassobbio</b>	347
<b>Cerezzola</b>	359
<b>Guardasone</b>	364
<b>Valle confluenza Termina e Masdone</b>	393

Per ciascuna di tali sezioni non strumentate, a partire dai valori della portata indice e dai parametri della curva di crescita, si è proceduto alla stima dei parametri della distribuzione di probabilità GEV, elencati in Tabella 18

**Tabella 18. – Parametri della distribuzione GEV per le sezioni non strumentate oggetto del presente studio**

GEV	Valle confluenza Tassobbio	Cerezzola	Guardasone	Valle confluenza Termina Masdone
<b>ε</b>	268.1	276.6	281.1	303.0
<b>α</b>	137.5	141.9	144.2	155.4
<b>k</b>	0.000	0.000	0.000	0.000

### 3.2.2. Distribuzione TCEV delle portate al colmo

Analogamente a quanto riportato nell'analisi statistica delle precipitazioni, anche nel caso delle portate si ha una migliore interpretazione probabilistica di serie caratterizzate dalla presenza di outliers con il modello a doppia componente denominato TCEV.

I valori di portata al colmo di piena per assegnato tempo di ritorno alla sezione di Vetto sono stati ottenuti mediante una distribuzione a doppia componente con una stima al 1° livello di regionalizzazione (L1).

Dapprima sono stati stimati i parametri  $\Lambda_*$  e  $\theta_*$  sulla base del campione composto dalle serie storiche relative alle seguenti sezioni: Lonza, Compiano, Ponte Samone, Vetto, Lugo, Ponte Cavola. Successivamente sono stati stimati i parametri  $\Lambda_1$  e  $\theta_1$  puntualmente per le singole serie storiche; i parametri  $\Lambda_2$  e  $\theta_2$  risultano infine dipendere da quelli già calcolati.

E' stata poi condotta una stima al 3° livello di regionalizzazione (L3); a tal riguardo sono stati stimati i parametri  $\Lambda_*$  e  $\theta_*$  sempre sulla base del campione composto dalle serie storiche relative alle seguenti sezioni: Lonza, Compiano, Ponte Samone, Vetto, Lugo, Ponte Cavola. Successivamente è stato stimato il parametro  $\Lambda_1$  regionale per una sottoarea omogenea che presenta un valore del coefficiente di variazione costante.

In particolare, si è scelta un'area nell'intorno di Enza a Vetto e stimato il coefficiente di variazione costante da attribuire a tale area, utilizzando le stazioni di Enza a Vetto e le due stazioni con numerosità campionaria minore di 10 corrispondenti all'Enza a Selvanizza e Cedra a Selvanizza.

Il valore di  $\Lambda_1$  ottenuto per tale zona è stato esteso anche alle stazioni non strumentate: Valle confluenza Tassobbio, Cerezzola, Guardasone, Valle confluenza Termina e Masdone. Il parametro  $\theta_1$ , secondo la teoria della distribuzione TCEV, risulta funzione del valore indice e del parametro  $\Lambda_1$ , secondo l'espressione:

$$\mu = \theta_1 \cdot (\ln(\Lambda_1) + \gamma_\varepsilon) - \theta_1 \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^j \cdot \Lambda_1^j}{j!} \cdot \Gamma\left(\frac{j}{\theta_*}\right) \quad (5)$$

con  $\gamma_\varepsilon=0.5772$  costante di Eulero.

Si ricava pertanto il valore di  $\theta_1$  regionale per la stazione di Vetto e per le stazioni non strumentate in esame. I parametri  $\Lambda_2$  e  $\theta_2$  risultano infine dipendenti da quelli già calcolati. Per le stazioni non strumentate si utilizzano i valori di portata indice riportati in Tabella 17.

Nella Figura 23, con riferimento alla serie storica dei massimi annuali delle portate al colmo di piena per la stazione di Vetto, sono rappresentati la frequenza campionaria ed il diagramma della distribuzione TCEV ottenuta con le due differenti modalità di stima dei parametri sopra descritte. Si fornisce tale confronto per mostrare la robustezza del metodo adottato (L3), che può essere pertanto esteso alle sezioni non strumentate, i cui risultati sono riportati in Tabella 19.

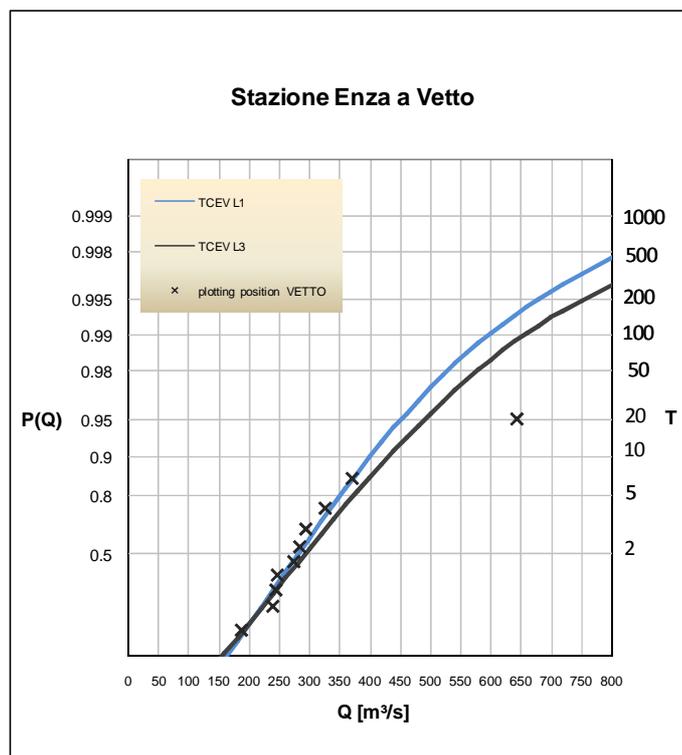


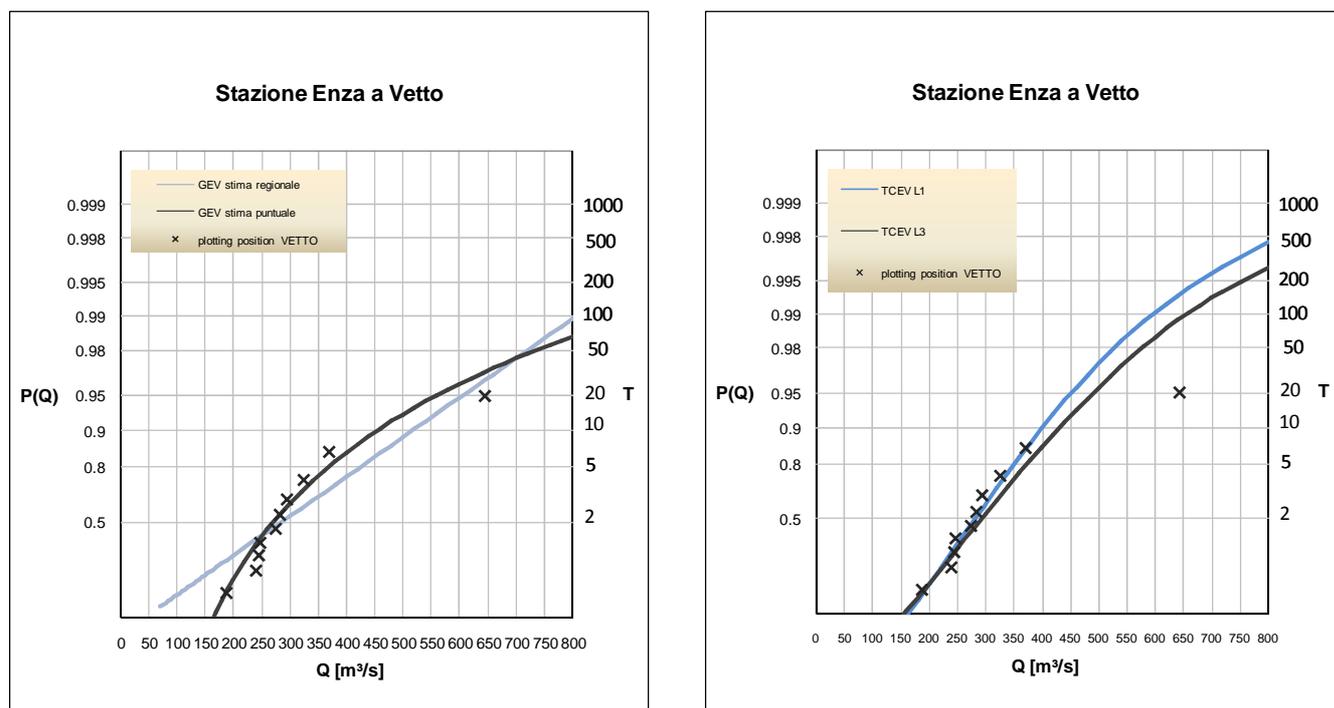
Figura 23. Distribuzione TCEV: cartogramma probabilistico per differenti livelli di regionalizzazione, L1 ed L3

Tabella 19. – Parametri della distribuzione TCEV, per le stazioni idrometriche considerate nello Studio

Stazione	Metodo	$\theta_1$	$\theta_2$	$\Lambda_1$	$\Lambda_2$	$\theta^*$	$\Lambda^*$
<b>Vetto</b>	L3	67.36	196.43	49.67	0.20	2.9163	0.0523
<b>Valle confluenza Tassobio</b>	L3	75.26	219.47	49.67	0.20	2.9163	0.0523
<b>Cerezzola</b>	L3	77.65	226.44	49.67	0.20	2.9163	0.0523
<b>Guardasone</b>	L3	78.92	230.17	49.67	0.20	2.9163	0.0523
<b>Valle confluenza Termina e Masdone</b>	L3	85.05	248.04	49.67	0.20	2.9163	0.0523

### 3.2.3. Confronto dei risultati

Con riferimento alla serie storica dei massimi annuali delle portate al colmo di piena relative alla sezione di Enza a Vetto, in Figura 24, sono messi a confronto i diagrammi delle funzioni di distribuzione cumulata ottenute attraverso le distribuzioni probabilistiche GEV e TCEV sopra descritte. Nel pannello di sinistra si evidenzia l'andamento della distribuzione GEV, applicata a livello puntuale e regionale. Nel pannello di destra, si leggono le stime mediante distribuzione TCEV, con i due livelli di regionalizzazione adottati. Si può notare uno scostamento tra i quantili forniti dalla due distribuzioni a partire dal Tempo di ritorno di 10 anni.



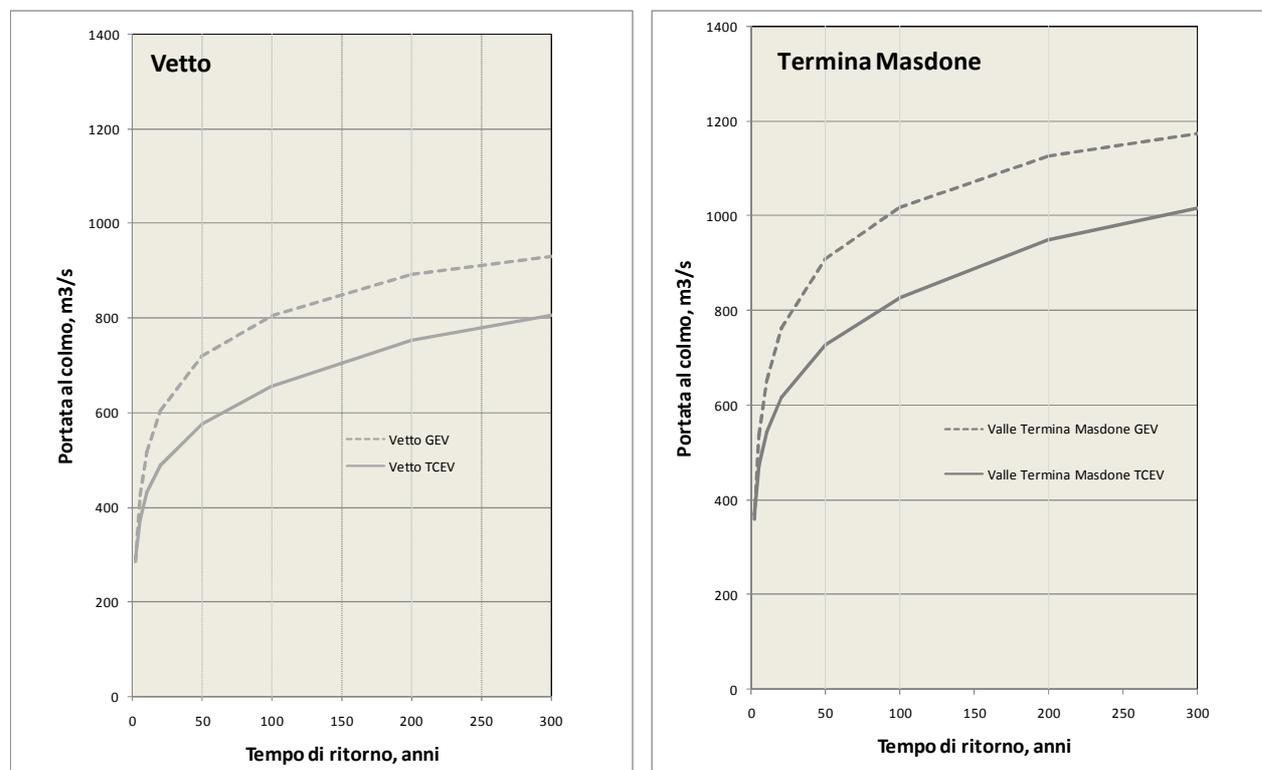
**Figura 24. Distribuzioni GEV (sinistra) e TCEV (destra): cartogramma probabilistico relativo alla sezione Enza a Vetto.**

Occorre qui ribadire la maggiore adeguatezza della struttura gerarchica della distribuzione TCEV nelle applicazioni di regionalizzazione necessarie per ottenere un affidabile stimatore delle grandezze di progetto, tenuto conto della variabilità spaziale e campionaria delle serie storiche disponibili nel bacino dell'Enza.

**Tabella 20. Stima delle portate al colmo di piena per assegnato tempo di ritorno mediante distribuzione GEV e TCEV applicata alle sezione di Enza a Vetto ed a quelle non strumentate**

T	P	Enza a Vetto		Valle confluenza Tassobio		Cerezola		Guardasone		Valle TerminaMasdone	
		GEV regionale	TCEV L3	GEV regionale	TCEV L3	GEV regionale	TCEV L3	GEV regionale	TCEV L3	GEV regionale	TCEV L3
2	0.5	285	292	318	327	329	337	334	342	360	369
5	0.8	425	374	474	418	489	431	497	438	536	472
10	0.9	517	431	577	481	596	496	606	505	653	544
20	0.95	605	489	676	547	698	564	709	573	765	618
50	0.98	720	576	805	644	830	664	844	675	909	728
100	0.99	806	655	901	732	929	756	944	768	1018	828
200	0.995	892	753	996	841	1028	868	1045	882	1126	951
500	0.998	1005	911	1122	1018	1158	1050	1177	1067	1269	1150
1000	0.999	1090	1042	1218	1164	1256	1201	1277	1221	1376	1316

Dall'analisi dei risultati si evince che lo scarto percentuale dei valori di portata al colmo stimati mediante GEV rispetto a quelli stimati mediante TCEV, per tempi di ritorno compresi tra 10 e 200 anni, è pari a circa 20%. In figura seguente si rappresentano i quantili T-ennali stimati mediante le due distribuzioni.



**Figura 25. Confronto delle portate al colmo per assegnato tempo di ritorno alla sezione di Vetto e Termina Masdone, modello GEV e TCEV**

### 3.3. Analisi statistica con il metodo delle copule

La teoria delle copule si basa sul teorema di Sklar (Sklar, 1959), secondo il quale, sotto determinate ipotesi, è possibile pervenire alla funzione di distribuzione multivariata di una n-pla di variabili aleatorie a partire dalle distribuzioni marginali delle singole variabile e da una opportuna funzione copula (Salvadori et al., 2007). Di seguito si riporta l'espressione analitica del teorema di Sklar, nel caso si consideri una coppia di variabili aleatorie X ed Y; la funzione di distribuzione cumulata congiunta  $F_{XY}$  si esplicita nel seguente modo:

$$F_{XY} = \text{Prob} \{X \leq x, Y \leq y\} = C(F_X(x), F_Y(y)) \text{ con } x, y \in \mathfrak{R}$$

dove:

$F_{XY}$  è la funzione di distribuzione congiunta di X e Y

$F_X(x)$  e  $F_Y(y)$  sono le funzioni di distribuzione marginali delle variabili aleatorie X ed Y

$C: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  è la funzione Copula

La probabilità di un evento di piena fluviale può essere studiato attraverso un'analisi bivariata, basata appunto sulla teoria delle copule; infatti, l'idrogramma di piena associato a tale evento può essere analizzato in termini di portata al colmo e di volume sopra una determinata soglia, da studiare congiuntamente e pervenire al cosiddetto periodo di ritorno secondario dell'evento, come descritto nel paragrafo 4.3 successivo.

#### 4. Definizione degli idrogrammi di progetto

L'analisi e la definizione dei valori di portata al colmo risulta spesso un'informazione limitata per tutti i problemi riguardanti la protezione idraulica del territorio, soprattutto ogni qual volta i volumi in gioco rivestano un ruolo significativo, come ad esempio nel dimensionamento di invasi, opere di controllo delle piene o nella definizione di profili a valle di casse di espansione o laminazione; in questi casi infatti giocano un ruolo fondamentale non solo i volumi complessivi dell'onda di piena, ma anche la loro distribuzione temporale.

Affrontare questo tipo di problemi rende quindi necessario non solo poter stimare in modo consistente i valori di portata e volume attesi, ma anche la definizione di un idrogramma in grado di valutare adeguatamente l'andamento delle portate nel tempo.

Per rispondere a queste esigenze, ai fini di pianificazione e studio, come previsto nel Piano Operativo delle Attività (POA), si sono analizzate differenti metodologie per la definizione di idrogrammi di progetto con assegnato tempo di ritorno.

Principalmente i metodi di letteratura presi in considerazione sono due:

- **Generazione degli idrogrammi sintetici di tipo SDH - Synthetic Design Hydrographs** (Tomirotti M., Mignosa P. – A methodology to derive synthetic design hydrographs for river floods);
- **Analisi bivariata di portata al colmo e volume e definizione degli idrogrammi mediante modelli idrologici o geometrici** (De Michele C., Salvadori G., Canossi M., Petaccia A., Rosso R. – Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway).

L'utilizzo di vari approcci, in particolare l'analisi bivariata delle coppie portate al colmo e volumi, genera una serie di possibili idrogrammi per ogni tempo di ritorno analizzato. Il risultato è costituito quindi da più idrogrammi di progetto statisticamente plausibili.

Come richiesto nel POA, le attività svolte sono consistite nella determinazione degli idrogrammi di piena di progetto per assegnati tempi di ritorno (20, 50, 100, 200 e 500 anni) relativi ad alcune sezioni fluviali poste lungo l'asta in corrispondenza di sezioni strumentate o punti di particolare interesse alla chiusura dei principali sottobacini dell'Enza. In particolare si sono elaborati gli idrogrammi alle seguenti sezioni:

- Vetto;
- Cedogno;
- Cerezzola;
- Guardasone;

- Valle confluenza Termina e Masdone.

Infine, in relazione agli scenari di cambiamento climatico e di cambiamento dell'uso del suolo, sono state analizzate le possibili variazioni indotte sugli idrogrammi di piena di progetto.

#### 4.1. Dati disponibili

Per l'analisi delle sezioni oggetto di studio si sono raccolti i dati relativi agli idrogrammi disponibili nelle sezioni di monitoraggio, in particolare per le stazioni idrometriche di Vetto e Sorbolo. Per le altre sezioni, ove non erano disponibili serie storiche adeguate si è provveduto ad estendere le informazioni mediante l'applicazione del modello idrologico/idraulico Mike11–NAM e Mike11–HD, calibrato per l'intero bacino del fiume Enza, imponendo come condizione di monte le portate osservate alla sezione idrometrica di Vetto. La simulazione ha quindi permesso di ricostruire gli idrogrammi per tutte le sezioni di riferimento per il periodo 2008 – 2017.

#### 4.2. Idrogrammi sintetici - SDH

Un primo approccio seguito per la costruzione degli idrogrammi di progetto con assegnato tempo di ritorno è stata la generazione di idrogrammi sintetici SDH (Tomirotti M., Mignosa P. – A methodology to derive synthetic design hydrographs for river floods).

Definita una sezione idrometrica di interesse, nella quale sia disponibile una serie sufficientemente lunga e completa di registrazioni di idrogrammi di piena, il primo passo per la definizione dell'idrogramma sintetico è costituito dall'analisi della curva di riduzione di piena per gli eventi più significativi.

In via generale la curva di riduzione risulta funzione del tempo di ritorno e può essere ottenuta definendo il rapporto di riduzione  $\varepsilon_D(T)$  tra la portata media per assegnata durata e la portata al colmo, ovvero:

$$\varepsilon_D(T) = \frac{\overline{Q}_D(T)}{Q_0(T)} \quad (6)$$

dove:

$\varepsilon_D(T)$  – fattore di riduzione [–]

$Q_0(T)$  – portata al colmo istantanea [m<sup>3</sup>/s]

$\overline{Q}_D(T)$  – portata media di assegnata durata D [m<sup>3</sup>/s]

T – tempo di ritorno [anni]

Nell'ipotesi che  $\varepsilon_D(T)$  possa essere considerato indipendente dal tempo di ritorno (NERC, 1975), esso si riduce al rapporto tra le medie ovvero:

$$\varepsilon_D = \frac{\mu(\overline{Q_D})}{\mu(Q_0)} \quad (7)$$

dove:

$\varepsilon_D$  – fattore di riduzione [–]

$\mu(\overline{Q_D})$  – media delle massime portate medie di assegnata durata D [m<sup>3</sup>/s]

$\mu(Q_0)$  – media delle portate al colmo [m<sup>3</sup>/s]

D – durata di riferimento [ore]

Il valore della massima portata media, con i soliti significati dei simboli, è ottenuto come:

$$\overline{Q_D} = \max \left( \frac{1}{D} \cdot \int_{t-D}^D Q(\tau) d\tau \right) \quad (8)$$

Il rapporto di riduzione  $\varepsilon_D$  può essere espresso in funzione della durata D mediante formule parametriche da tarare sulla base dei valori campionari. In particolare, si sono considerate le seguenti formulazioni:

$$\varepsilon_D = \sqrt{\frac{\theta}{2D} \cdot \left[ 2 + e^{-\frac{4D}{\theta}} - \frac{3\theta}{4D} \left( 1 - e^{-\frac{4D}{\theta}} \right) \right]} \quad (\text{Bacchi, 1992}) \quad (9)$$

dove:

$\varepsilon_D$  – fattore di riduzione [–]

$\theta$  – parametro della curva di riduzione [ore]

D – durata di riferimento [ore]

$$\varepsilon_D = (1 + \beta \cdot D)^{-\gamma} \quad (\text{NERC, 1975}) \quad (10)$$

dove:

$\varepsilon_D$  – fattore di riduzione [–]

$\beta$  – parametro della curva di riduzione [ $\text{ore}^{-1}$ ]

$\gamma$  – parametro della curva di riduzione [–]

D – durata di riferimento [ore]

La stima dei parametri per le equazioni (9) e (10) è stata effettuata minimizzando lo scarto quadratico medio sulla base dei dati campionari e per le durate rappresentative dei fenomeni di piena nelle sezioni considerate. Tali durate risultano quindi comprese tra 0, corrispondente alla portata istantanea, ed un valore  $D_f$ , sufficientemente lungo in grado di contenere adeguatamente i tempi caratteristici degli eventi osservati.

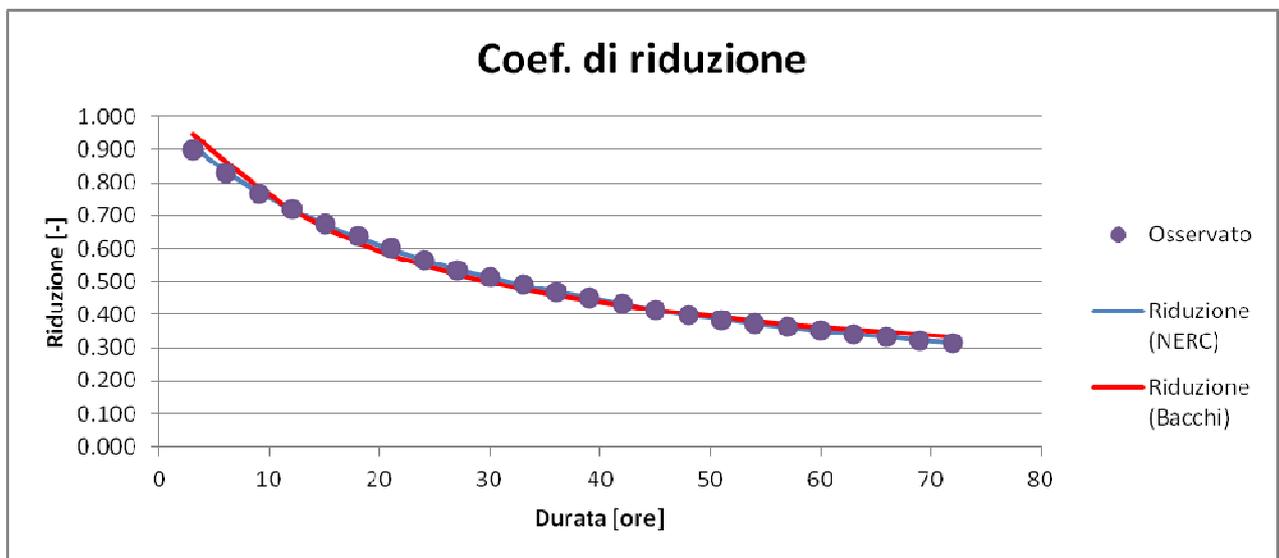


Figura 26. Confronto tra coefficienti di riduzione campionari e funzioni analitiche

Una volta ottenuta la funzione analitica di  $\varepsilon_D$ , l'equazione della curva di riduzione dei colmi risulta così definita:

$$\overline{Q_D}(T) = Q_0(T) \cdot \varepsilon_D \quad (11)$$

Essa si basa dunque sulla distribuzione di probabilità delle portate al colmo  $Q_0(T)$  derivante dalla trattazione statistica dei massimi annuali descritta nei precedenti paragrafi e dalla funzioni di esaurimento stimate.

Per definire la forma dell'idrogramma è necessario inoltre definire la posizione  $r_D$  della portata al colmo all'interno della finestra temporale di assegnata durata  $D$ , definita come rapporto di posizione del picco, variabile tra 0 e 1, rispetto alla finestra temporale considerata.

Procedendo in modo analogo a quanto fatto per la curva di riduzione è possibile trovare funzioni analitiche in grado di rappresentare adeguatamente la variazione della posizione rispetto alla durata. In questo caso si sono valutate due possibili formulazioni a 2 e 4 parametri così definite:

$$r_D(D) = a + b \cdot D \quad (12)$$

$$r_D(D) = a + \frac{b}{c+D^d} \quad (13)$$

dove:

$r_D(D)$  – rapporto di posizione [–]

$a, b, c, d$  – parametri [...]

$D$  – durata di riferimento [ore]

L'analisi degli eventi osservati ha permesso di calcolare i vari parametri e definire le equazioni che meglio rappresentavano i valori osservati in funzione dello scarto quadratico medio.

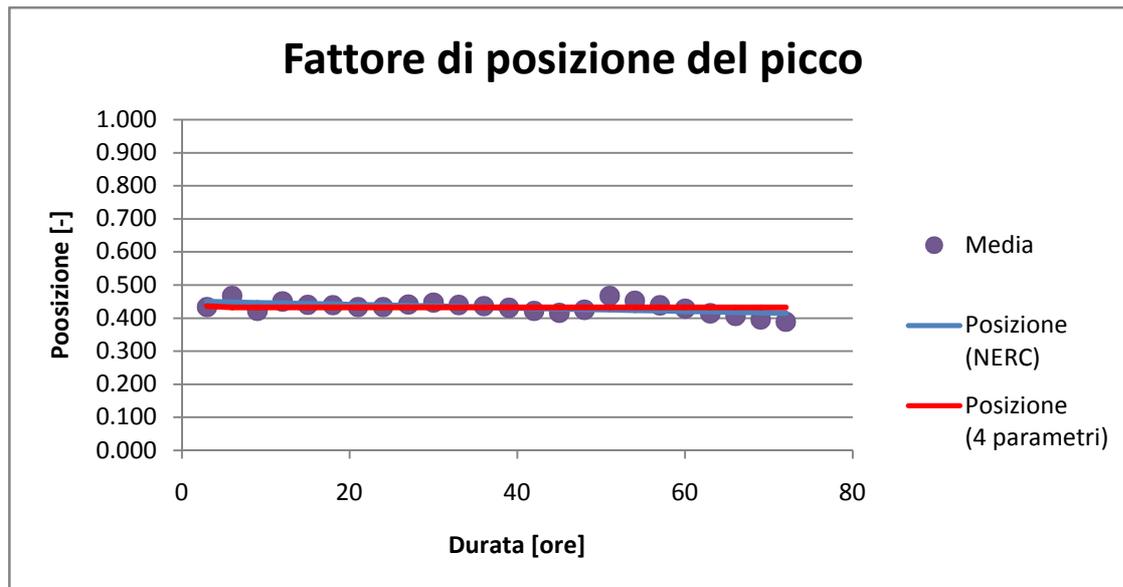


Figura 27. Confronto tra fattori di posizione osservati e funzioni analitiche

Note le funzioni di riduzione e posizione del picco è stato quindi possibile elaborare gli idrogrammi sintetici per assegnati tempi di ritorno attraverso l'espressione dei rami, imponendo sia la posizione del picco e sia che la massima portata media in ciascuna durata coincida con quella ottenuta dalla curva di riduzione delle portate, ovvero:

$$\int_{-r_D D}^0 Q(\tau; T) d\tau = r_D \bar{Q}_D(T) D \quad ; \quad \int_0^{(1-r_D)D} Q(\tau; T) d\tau = (1 - r_D) \bar{Q}_D(T) D \quad (14)$$

differenziando quindi rispetto alla durata D si ottiene:

ramo ascendente:

$$Q(t; T) = \frac{\frac{d}{dD}(r_D \bar{Q}_D(T) D)|_{D=D(t)}}{\frac{d}{dD}(r_D D)|_{D=D(t)}} \quad \text{dove} \quad t = -r_D D \quad \text{per} \quad -r_D D \leq t \leq 0 \quad (15)$$

ramo discendente:

$$Q(t; T) = \frac{\frac{d}{dD}((1-r_D) \bar{Q}_D(T) D)|_{D=D(t)}}{\frac{d}{dD}((1-r_D) D)|_{D=D(t)}} \quad \text{dove} \quad t = (1 - r_D) D \quad \text{per} \quad 0 \leq t \leq (1 - r_D) D \quad (16)$$

Sostituendo infine  $Q_D(T)$  con il relativo valore ottenuto dal rapporto di riduzione e derivando le due equazioni, si ottengono gli andamenti dei rami ascendenti e discendenti dell'idrogramma.

La metodologia sopra esposta è stata applicata a tutte le sezioni idrometriche oggetto di studio, ottenendo quindi gli idrogrammi per assegnato tempo di ritorno.

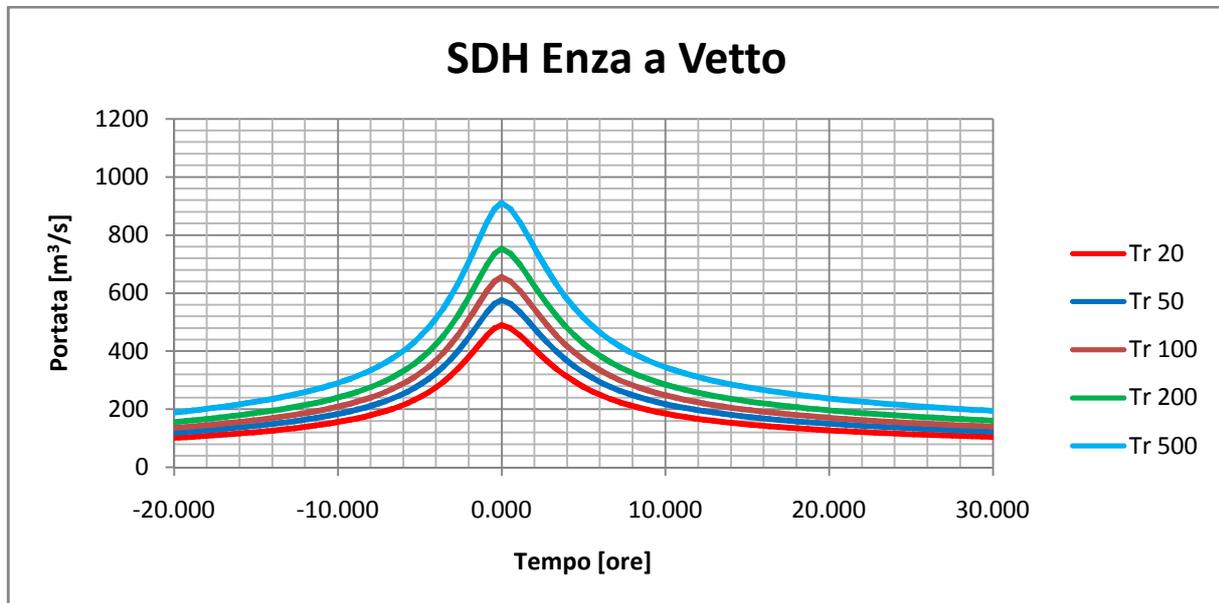


Figura 28 - SDH Enza a Vetto

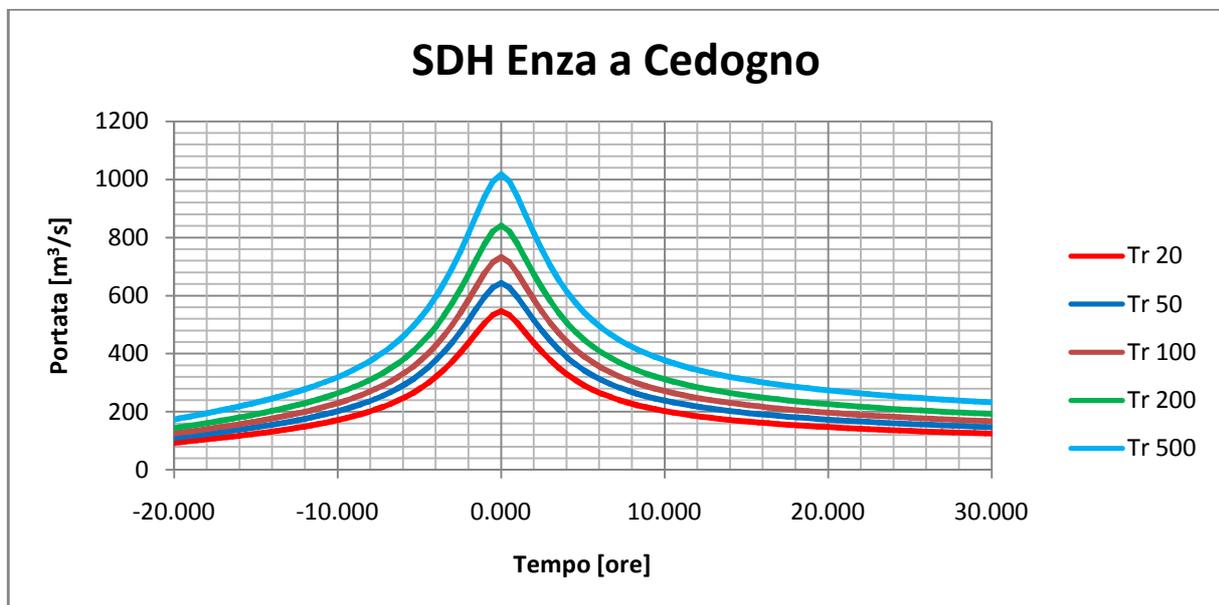


Figura 29 - SDH Enza a Cedogno

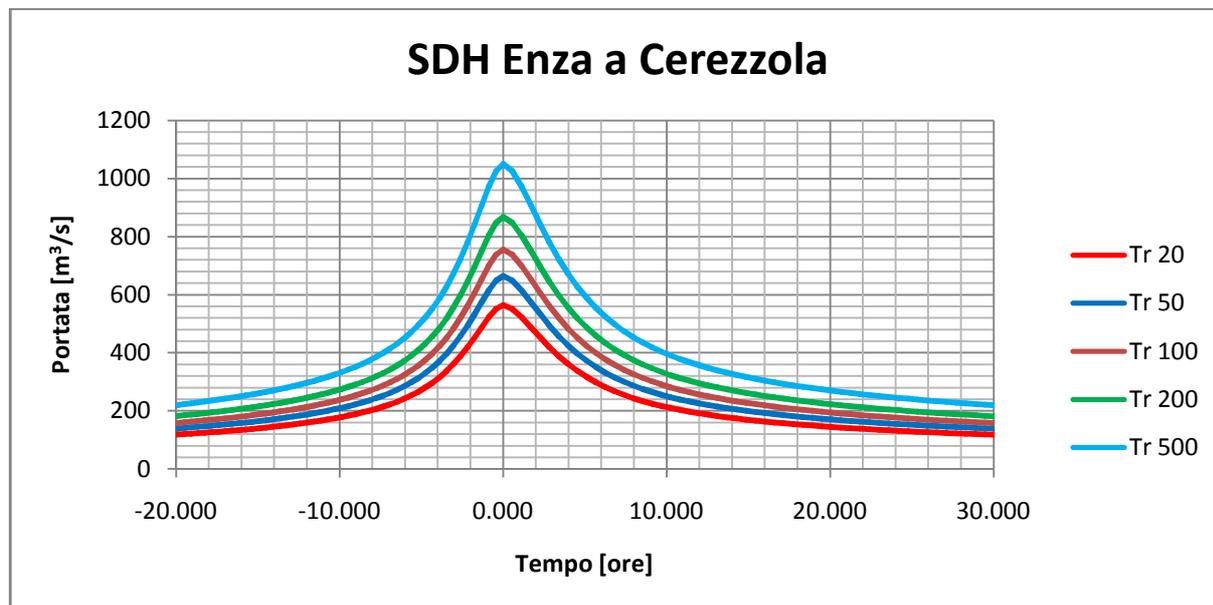


Figura 30 - SDH Enza a Cerezzola

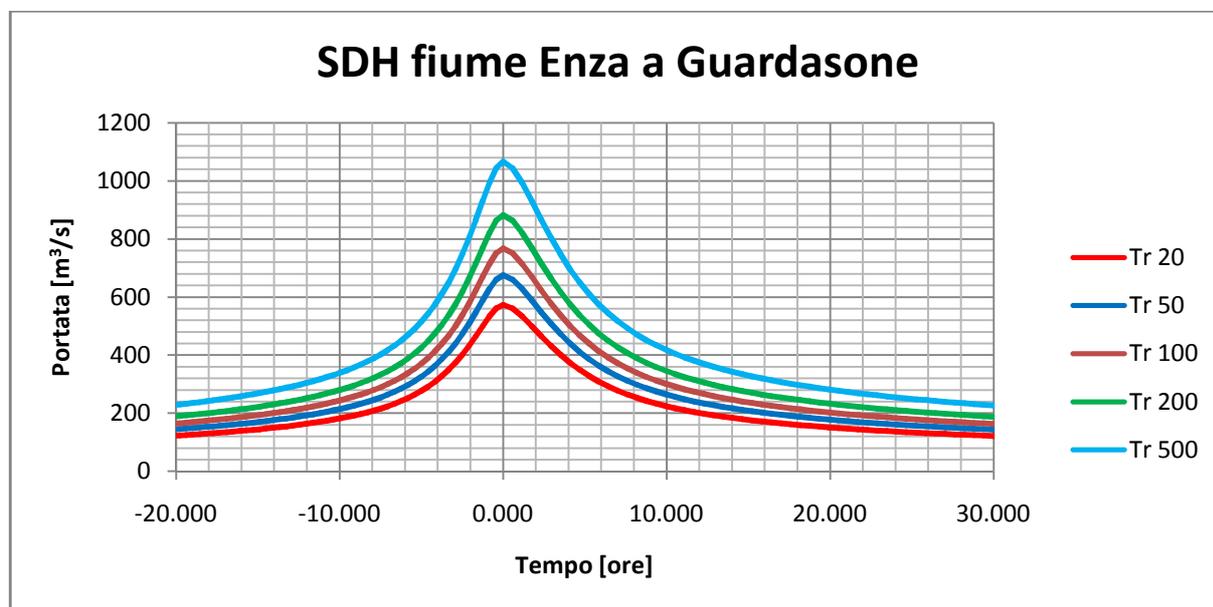


Figura 31 - SDH Enza a Guardasone

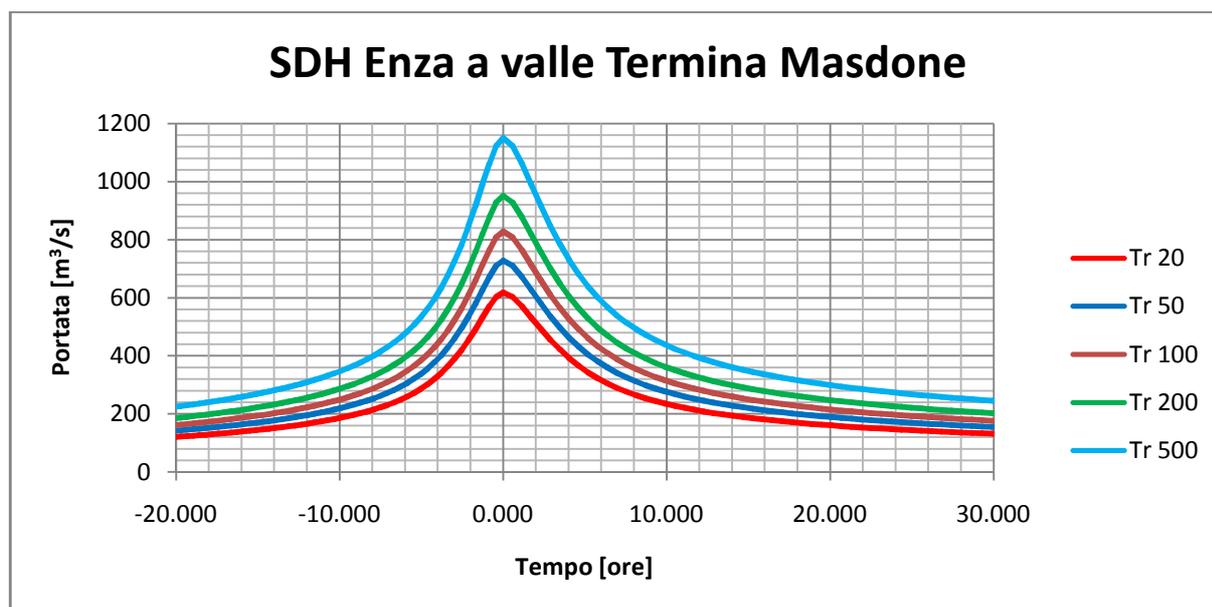


Figura 32 - SDH Enza a valle Termina Masdone

#### 4.3. Idrogrammi da analisi bivariata portate al colmo – volumi

Come per gli idrogrammi sintetici SDH del paragrafo precedente, per le varie sezioni oggetto di studio si è proceduto all'analisi della distribuzione congiunta delle portate al colmo e dei volumi utilizzando il metodo delle copule descritto al paragrafo 3.3.

Il campione utilizzato è composto dalle coppie dei massimi annuali delle portate al colmo di piena e il relativo volume, inteso come l'integrale dell'idrogramma compreso tra il superamento e rientro di un valore di soglia. I dati disponibili ricoprono il periodo 2008-2017 (Tabella 21). La funzione copula utilizzata appartiene alla famiglia "Gumbel-Hougaard", una copula da valori estremi in cui il parametro  $\Theta$  della funzione copula è stimato usando il Tau di Kendal, Tabella 22. Infine è stato calcolato la probabilità congiunta e il relativo tempo di ritorno secondario (tempo di ritorno di Kendall) con la funzione di Kendall (KENDALL MEASURE, by Salvadori et al., 2007). Si riportano qui per chiarezza le seguenti relazioni, rimandando per approfondimenti alla bibliografia sopra citata.

$$T_{KEN2} = \frac{1}{1 - K_C(t_{KEN2})} \quad (17)$$

$$\Leftrightarrow K_C(t_{KEN2}) = 1 - \frac{1}{T_{KEN2}} \quad (18)$$

$$\Leftrightarrow t_{KEN2} = K_C^{-1}\left(1 - \frac{1}{T_{KEN2}}\right) \quad (19)$$

**Tabella 21 Stazione di Vetto: campione di dati per l'analisi con il metodo delle copule.**

Anno	Qc [m <sup>3</sup> /s]	VOL [m <sup>3</sup> ]
2008	240.04	1.00E+07
2009	294.76	1.40E+07
2010	246.69	2.30E+07
2011	283.11	6.43E+06
2012	370.16	1.32E+07
2013	273.87	1.59E+06
2014	244.64	1.72E+07
2015	187.03	5.85E+06
2016	325.24	1.33E+07
2017	644.22	4.60E+07

**Tabella 22 Stazione di Vetto: valori dei parametri Tau e Teta.**

Parametro	Valore
Tau [ τ ]	0.289
Teta [ Θ ]	1.406

Successivamente, per i tempi di ritorno di 20, 50, 100, 200 e 500 anni, sono state calcolate tabelle per assegnato livello di probabilità congiunto (level curve), il valore della variabile Kc di Kendal, i relativi tempi di tempo di ritorno: T<sub>or</sub>, T<sub>and</sub> e T<sub>Kendall</sub> “tempo di ritorno congiunto “ o “secondario”, i quantili (u, v) delle singole variabili (Qc, Vol), infine i tempi di ritorno delle singole distribuzioni (Tu e Tv), nonché il valore stimato delle variabili, ricavati invertendo le distribuzioni marginali delle singole variabile: per il volume la distribuzione GEV, per la portata al colmo la distribuzione TCEV. A titolo esemplificativo si riportano in Tabella 23 i risultati corrispondenti ad un tempo di ritorno secondario pari a 100 anni.

**Tabella 23. Stazione di Vetto: tabella per tempo di ritorno secondario 100 anni e relativi valori delle variabili dell'analisi congiunta.**

level curve	kc	TOR	Tkendall	Tand	u	Tu	v	Tv	Qc	Vol
-	-	[anni]	[anni]	[anni]	-	[anni]	-	[anni]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> ]
<b>0.97</b>	0.99	30	100	971	0.97	30	1.00	795	526.90	1.40E+08
<b>0.97</b>	0.99	30	100	554	0.97	31	1.00	424	527.85	1.15E+08
<b>0.97</b>	0.99	30	100	362	0.97	31	1.00	258	529.45	9.81E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	247	0.97	32	0.99	159	532.76	8.38E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	201	0.97	33	0.99	120	536.22	7.63E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	176	0.97	35	0.99	99	539.82	7.13E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	160	0.97	36	0.99	85	543.60	6.77E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	149	0.97	38	0.99	75	547.57	6.48E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	142	0.97	39	0.99	68	551.74	6.25E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	137	0.98	41	0.98	62	556.14	6.06E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	134	0.98	43	0.98	57	560.78	5.90E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	132	0.98	45	0.98	54	565.71	5.76E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	131	0.98	47	0.98	50	570.95	5.63E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	131	0.98	50	0.98	48	576.54	5.53E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	132	0.98	53	0.98	45	582.54	5.43E+07

<b>0.97</b>	0.99	30	100	134	0.98	56	0.98	44	588.99	5.34E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	136	0.98	60	0.98	42	595.97	5.26E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	139	0.98	64	0.98	40	603.56	5.19E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	144	0.99	69	0.97	39	611.88	5.12E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	150	0.99	75	0.97	38	621.07	5.06E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	157	0.99	82	0.97	36	631.29	5.01E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	166	0.99	90	0.97	35	642.80	4.95E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	177	0.99	100	0.97	35	655.92	4.91E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	192	0.99	113	0.97	34	671.10	4.86E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	211	0.99	129	0.97	33	688.99	4.83E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	236	0.99	150	0.97	32	710.59	4.79E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	271	0.99	180	0.97	32	737.46	4.76E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	325	1.00	226	0.97	31	772.30	4.73E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	412	1.00	301	0.97	31	820.14	4.70E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	585	1.00	451	0.97	31	892.12	4.68E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	1089	1.00	902	0.97	30	1022.70	4.67E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	2073	1.00	1805	0.97	30	1157.26	4.66E+07
<b>0.97</b>	0.99	30	100	4953	1.00	4511	0.97	30	1336.77	4.66E+07

Queste tabelle sono state successivamente utilizzate per la definizione degli idrogrammi equiprobabili, estraendo n coppie di portate al colmo e volumi per ogni tempo di ritorno e definendo gli idrogrammi con tre diverse metodologie:

- Modello triangolare;
- Modello del serbatoio lineare;
- Modello di Nash.

#### 4.3.1. Modello triangolare

In questo caso l'idrogramma viene definito geometricamente assimilandone la forma ad un triangolo di volume e portata massima noti. In questo caso la durata dell'evento risulta determinata e pari a:

$$T_b = \frac{2 \cdot V}{Q_c} \quad (20)$$

dove:

V - volume idrogramma [m<sup>3</sup>]

T<sub>b</sub> – durata [ore]

Q<sub>c</sub> – portata al colmo [m<sup>3</sup>/s]

Mentre la definizione della posizione del picco viene definita, con i soliti significati, pari a:

$$T_p = \frac{3V}{4Q_c} = \frac{T_b}{2.67} \quad (21)$$

quindi l'idrogramma corrispondente q(t) risulta:

$$q(t) = \begin{cases} 1.335 \cdot \frac{Q_{\max}}{V} t & 0 \leq t \leq T_p \\ 1.6 \cdot Q_{\max} - 0.8 \cdot \frac{Q_{\max}^2}{V} t & T_p \leq t \leq T_b \end{cases} \quad (22)$$

#### 4.3.2. Modello del serbatoio lineare

In questo caso l'idrogramma si ottiene imponendo alle equazioni dei serbatoi lineari il rispetto di volume e portata al colmo e può quindi essere espresso dalle equazioni:

$$q(t) = \begin{cases} \frac{V}{t_0} (1 - e^{-t/k}) & 0 \leq t \leq t_0 \\ \frac{V}{t_0} [e^{-(t-t_0)/k} - e^{-t/k}] & t \geq t_0 \end{cases} \quad (23)$$

dove:

$t_0$  – tempo [ore]

$V$  – volume idrogramma [ $m^3$ ]

$k$  – parametro serbatoio lineare [ore]

il tempo  $t_0$  può essere ricavato risolvendo la seguente equazione trascendente:

$$\frac{t_0 Q_{\max}}{V} = 1 - e^{-\left(\frac{t_0}{k}\right)} \quad (24)$$

La stima del parametro  $k$  del serbatoio lineare è stata effettuata analizzando gli eventi osservati e simulati per le stazioni di riferimento relativamente al periodo 2009-2017.

#### 4.3.3. Modello di Nash

In analogia col serbatoio lineare, anche in questo caso l'idrogramma si ottiene imponendo alle equazioni del modello di Nash il vincolo di rispetto del volume e portata al colmo, ovvero:

$$q(t) = \begin{cases} \frac{V}{t_0} \int_0^t \frac{1}{k \cdot \Gamma(n)} \left( \frac{t-\xi}{k} \right)^{n-1} e^{-(t-\xi)/k} d\xi & 0 \leq t \leq t_0 \\ \frac{V}{t_0} \int_0^{t_0} \frac{1}{k \cdot \Gamma(n)} \left( \frac{t-\xi}{k} \right)^{n-1} e^{-(t-\xi)/k} d\xi & t \geq t_0 \end{cases} \quad (25)$$

dove:

$t_0$  – tempo [ore]

$V$  – volume idrogramma [m<sup>3</sup>]

$k$  – costante di tempo del serbatoio [ore]

$n$  – numero di serbatoi [–]

La stima dei parametri  $n$  e  $k$  del modello di Nash è stata ricavata dall'analisi degli eventi osservati e simulati per il periodo 2009-2017

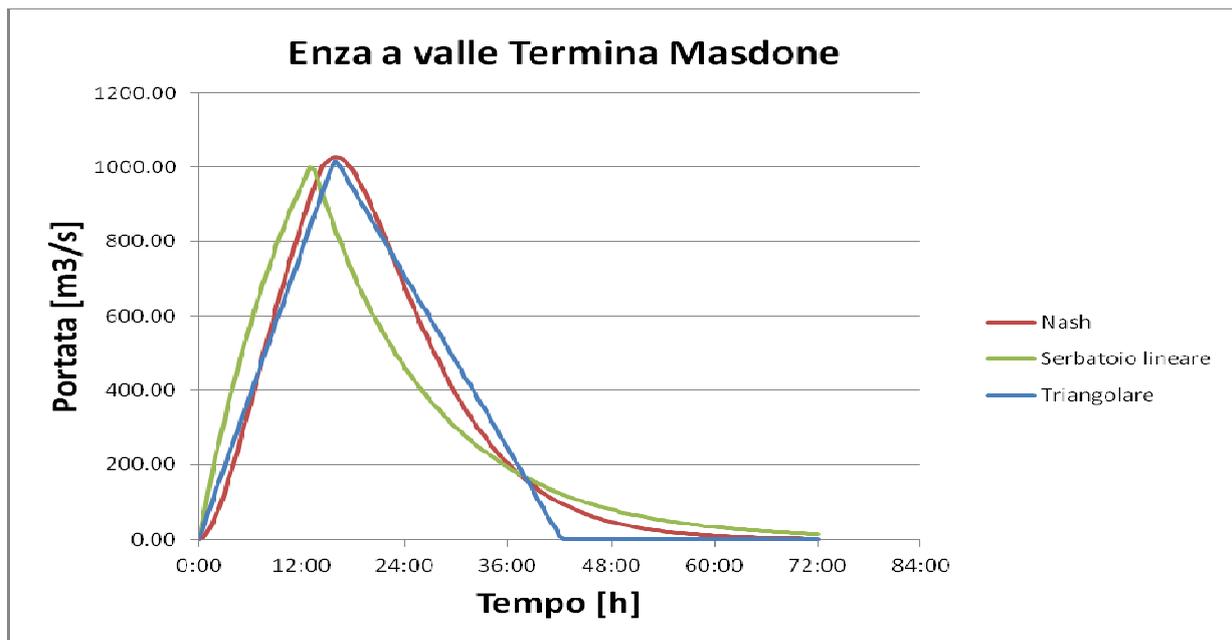


Figura 33. Idrogrammi ricostruiti da una copula  $Q_c - V$  a valle della confluenza Termina – Masdone

## 5. Analisi relativa agli scenari di cambiamento climatico

In relazione agli scenari di cambiamento climatico, sono state raccolte le proiezioni di precipitazione al 2100, ottenute dal modello climatico regionale COSMO CLM guidato dal modello globale CMCC-CM, ed ulteriormente trattate per ridurre l'errore sistematico. Le simulazioni sono riferite allo scenario RCP 4.5 (Representative Concentration Path), che ipotizza la stabilizzazione della forzante radiativa entro il 2100, Figura 34, attraverso l'utilizzo di strategie per la riduzione dell'emissione di gas serra.

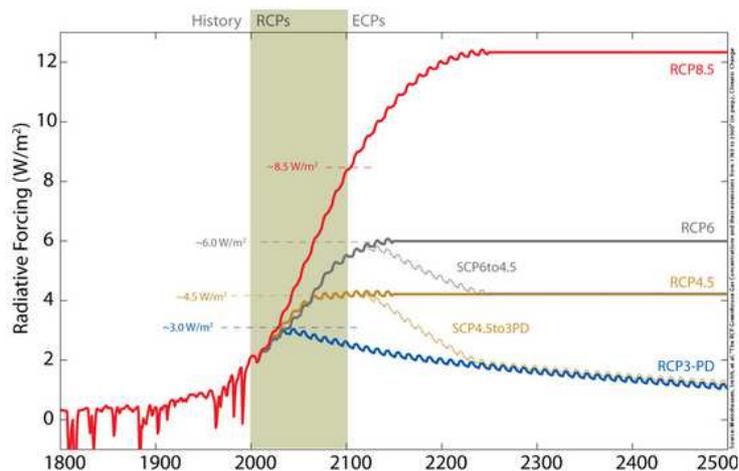


Figura 34. Scenari RCP

I risultati relativi alle celle di calcolo ricadenti nel bacino dell'Enza sono stati utilizzati per valutare le variazioni in termini di valore atteso dell'altezza di pioggia intensa e gli effetti sui colmi di piena.

### 5.1. Precipitazioni

Si è fatto riferimento al periodo 2008-2017 corrispondente alla serie storica delle portate al colmo utilizzata per la regionalizzazione nel bacino idrografico dell'Enza. Si è pertanto calcolata la media corrispondente agli afflussi esarari alla sezione di Termina-Masdone. Analizzando poi il periodo relativo alle proiezioni climatiche (2018 -2099), con media mobile su finestra di 30 anni, si è calcolato il massimo relativo a questo periodo, che si verifica nel trentennio 2062-2091. Il confronto di quest'ultimo valore rispetto a quello calcolato sul periodo osservato fornisce uno scarto percentuale di circa il 19%, Tabella 24. Tale fattore è stato preso in considerazione come

variazione climatica in proiezione per la stazione valliva posta all'ingresso delle casce di espansione, sezione di Termina-Masdone.

**Tabella 24. Analisi degli afflussi esaorari**

Variabile	P, mm
<b>Massima media in proiezione</b>	31.4
<b>media osservato</b>	26.4
<b><math>\sigma</math> %</b>	19

L'analisi statistica delle serie di precipitazione osservate e simulate, basata sul test di Student, ha supportato la stima effettuata degli impatti dei cambiamenti climatici sugli idrogrammi di progetto, così come riportato di seguito.

## 5.2. Test di Student

Una delle modalità di impiego del test di Student è quella finalizzata al confronto fra le medie di due campioni; esso permette di verificare se i valori attesi di due sottoserie separate siano o meno significativamente differenti. Assumendo che i due campioni siano indipendenti l'uno dall'altro in quanto riguardanti due periodi disgiunti, i requisiti sono:

- le due popolazioni hanno uguale varianza
- le due popolazioni seguono una distribuzione normale.

Nelle tabelle 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3 si riportano le verifiche dei suddetti requisiti, risultando una significativa differenza per la precipitazione esaoraria, pari a circa il 20%, ma non per quella giornaliera. Pertanto, si desume un importante impatto dei cambiamenti climatici sulla ridistribuzione delle intensità di precipitazione oraria, restando invece statisticamente invariati i totali giornalieri.

### 5.2.1. Analisi della varianza del campione mediante test F

	Dati di afflusso esorario massimo annuale	Dati di afflusso giornaliero massimo annuale
<b>Dataset1</b>	2011-2017 (n=10)	2011-2017 (n=7)
<b>Dataset2</b>	2062-2091 (il trentennio che fornisce il massimo valore atteso in proiezione su una finestra mobile di 30 anni)	2047-2076 (il trentennio che fornisce il massimo valore atteso in proiezione su una finestra mobile di 30 anni)
<b>Ipotesi</b>	H0: le varianze dei due set di dati in esame non differiscono significativamente	H0: le varianze dei due set di dati in esame non differiscono significativamente
<b>Elaborazione</b>	p-value = 0.6852	p-value = 0.274
<b>Risultato</b>	p-value>0.05 → accetto l'ipotesi → le varianze dei due set di dati in esame non differiscono significativamente	p-value>0.05 → accetto l'ipotesi → le varianze dei due set di dati in esame non differiscono significativamente

### 5.2.2. Analisi della distribuzione normale del campione mediante test di Shapiro-Wilk

	Dati di afflusso esorario massimo annuale	Dati di afflusso giornaliero massimo annuale
<b>Dataset1</b>	Dataset1: 2011-2017 (n=10)	Dataset1: 2011-2017 (n=7)
<b>Ipotesi</b>	H0: i dati seguono una distribuzione normale	H0: i dati seguono una distribuzione normale
<b>Elaborazione</b>	p-value = 0.3349	p-value = 0.255
<b>Risultato</b>	p-value>0.05 → accetto l'ipotesi → la distribuzione dei dati non è significativamente differente da una	p-value>0.05 → accetto l'ipotesi → la distribuzione dei dati non è significativamente differente da una

	normale	normale
<b>Dataset2</b>	2062-2091 (il trentennio che fornisce il massimo valore atteso in proiezione su una finestra mobile di 30 anni)	2047-2076 (il trentennio che fornisce il massimo valore atteso in proiezione su una finestra mobile di 30 anni)
<b>Risultato</b>	se il campione ha una lunghezza almeno di 30, si può ignorare la distribuzione dei dati ed utilizzare i test parametrici quale il test t-Student.	se il campione ha una lunghezza almeno di 30, si può ignorare la distribuzione dei dati ed utilizzare i test parametrici quale il test t-Student.

### 5.2.3. Analisi della media del campione mediante test di Student.

	Dati di afflusso esaorario massimo annuale	Dati di afflusso giornaliero massimo annuale																																										
<b>Dataset1</b>	2011-2017 (n=10)	2011-2017 (n=7)																																										
<b>Dataset2</b>	2062-2091 (il trentennio che fornisce il massimo valore atteso in proiezione su una finestra mobile di 30 anni)	2047-2076 (il trentennio che fornisce il massimo valore atteso in proiezione su una finestra mobile di 30 anni)																																										
<b>Ipotesi</b>	H0: la differenza tra le medie non è significativa	H0: la differenza tra le medie non è significativa																																										
<b>Elaborazioni</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dataset</th> <th>1</th> <th>2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Numerosità campione</td> <td>10</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>Media</td> <td>26.4130</td> <td>31.4363</td> </tr> <tr> <td>Dev. standard</td> <td>6.9953</td> <td>8.0526</td> </tr> <tr> <td><b>t</b></td> <td colspan="2"><b>1.7603</b></td> </tr> <tr> <td>gradi di libertà</td> <td colspan="2">38</td> </tr> <tr> <td><b>P (livello di significatività)</b></td> <td colspan="2"><b>0.0864</b></td> </tr> </tbody> </table>	Dataset	1	2	Numerosità campione	10	30	Media	26.4130	31.4363	Dev. standard	6.9953	8.0526	<b>t</b>	<b>1.7603</b>		gradi di libertà	38		<b>P (livello di significatività)</b>	<b>0.0864</b>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dataset</th> <th>1</th> <th>2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Numerosità campione</td> <td>7</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>Media</td> <td>36.1457</td> <td>44.9460</td> </tr> <tr> <td>Dev. standard</td> <td>8.6221</td> <td>13.3849</td> </tr> <tr> <td><b>t</b></td> <td colspan="2"><b>1.6514</b></td> </tr> <tr> <td>gradi di libertà</td> <td colspan="2">35</td> </tr> <tr> <td><b>P (livello di significatività)</b></td> <td colspan="2"><b>0.1076</b></td> </tr> </tbody> </table>	Dataset	1	2	Numerosità campione	7	30	Media	36.1457	44.9460	Dev. standard	8.6221	13.3849	<b>t</b>	<b>1.6514</b>		gradi di libertà	35		<b>P (livello di significatività)</b>	<b>0.1076</b>	
Dataset	1	2																																										
Numerosità campione	10	30																																										
Media	26.4130	31.4363																																										
Dev. standard	6.9953	8.0526																																										
<b>t</b>	<b>1.7603</b>																																											
gradi di libertà	38																																											
<b>P (livello di significatività)</b>	<b>0.0864</b>																																											
Dataset	1	2																																										
Numerosità campione	7	30																																										
Media	36.1457	44.9460																																										
Dev. standard	8.6221	13.3849																																										
<b>t</b>	<b>1.6514</b>																																											
gradi di libertà	35																																											
<b>P (livello di significatività)</b>	<b>0.1076</b>																																											
<b>Risultato</b>	p-value <0.1 → rifiuto l'ipotesi → la differenza tra le medie è significativa	p-value >0.1 → accetto l'ipotesi → la differenza tra le medie non è significativa ed è dovuta al caso																																										

Conseguentemente a tali risultati, gli idrogrammi in proiezione climatica sono stati generati rielaborando i valori di portata al colmo di piena e lasciando invariati i volumi complessivi.

### 5.3. Effetti sui colmi di piena

Il valore di portata indice al colmo è stato correlato con il valore di pioggia indice, riferita alla durata corrispondente al tempo di corrivazione del bacino sotteso alla sezione Termina-Masdone. Mediante l'applicazione del metodo razionale la precipitazione netta viene trasformata in portata attraverso l'espressione:

$$q = \begin{cases} 0 & \text{se } h \leq I_a \\ \phi \frac{(h - I_a)^2}{(h - I_a + S)} & \text{se } h > I_a \end{cases} \quad (26)$$

dove:

- $h$  pioggia indice corrispondente ad una durata prossima al tempo di corrivazione
- $I_a \sim 0.2 S \rightarrow$  perdite iniziali
- $S = 254(100/CN-1) \rightarrow$  massimo volume specifico che il terreno può trattenere in condizioni di saturazione.

Il fattore di conversione  $\phi$  è proporzionale al rapporto tra l'area del bacino e il tempo di corrivazione  $t_c$  che viene assunto come rappresentativo della durata critica per il bacino in esame:

$$\phi \propto \frac{A}{t_c} \quad (27)$$

Il valore di CN è stato calcolato sulla base dell'analisi ad evento, per cui risulta un valore medio pari a CN=82.2, Tabella 25.

**Tabella 25. Stima CN su eventi Termina Masdone**

Anno	Superamento soglia	Qc	Data Qc	Rientro soglia	Durata	Vol.	Coeff. deflusso	Pioggia	CN(II)
-	-	[m <sup>3</sup> /s]	-	-	[ore]	[m <sup>3</sup> ]	-	mm	-
2008	12/5/08 7:00	297	12/5/08 14:00	12/6/08 3:00	20	1.40E+07	39.0%	55.84	83.44
2009	1/19/09 19:00	369	1/20/09 17:00	1/21/09 23:00	52	2.88E+07	56.2%	92.88	83.80
2010	10/31/10 9:00	254	11/1/10 18:00	11/4/10 1:00	88	3.84E+07	51.6%	117.96	77.81
2011	10/25/11 18:00	253	10/25/11 22:00	10/26/11 14:00	20	8.51E+06	17.2%	82.29	<b>63.50</b>
2012	11/11/12 3:00	448	11/11/12 11:00	11/12/12 18:00	39	2.28E+07	48.7%	81.30	82.28
2013	3/29/13 5:00	302	3/30/13 20:00	3/31/13 14:00	57	1.92E+07	50.8%	58.23	87.38
2014	1/17/14 9:00	299	1/19/14 2:00	1/21/14 5:00	92	4.92E+07	58.7%	125.84	80.61
2015	3/25/15 10:00	396	3/25/15 19:00	3/27/15 7:00	45	2.32E+07	63.5%	59.10	<b>91.30</b>
2016	2/27/16 0:00	455	2/29/16 4:00	3/1/16 15:00	63	2.96E+07	56.7%	81.37	85.72
2017	12/11/17 1:00	794	12/12/17 3:00	12/14/17 3:00	74	5.89E+07	69.4%	125.57	86.16
Media		82.20							
Min		63.50							
Max		91.30							

Viene quindi ricavato il valore di  $\phi$  minimizzando lo scarto tra portata indice e le equazioni (26). Una volta tarati i parametri, si ricava il valore di portata al colmo indice in condizioni di cambiamento climatico, sulla base dell'ipotesi di incremento del 20% della pioggia indice corrispondente al tempo di corrivazione del bacino in esame, che risulta pari a 540 m<sup>3</sup>/s alla sezione di Termina-Masdone. Si fornisce per scopi di completezza le tabella che riportano i valori dei parametri del metodo razionale (26).

**Tabella 26. Condizioni di clima attuale**

PARAMETRO	Unità di misura	Valore
<b>hindice</b>	mm	65.40
$\phi$	-	14.5
<b>CN</b>	-	82.2
<b>S</b>	mm	55.00
<b>la</b>	mm	11.00
<b>A</b>	Km <sup>2</sup>	602
<b>Q</b>	m <sup>3</sup> /s	393

**Tabella 27. Condizioni di cambiamento climatico**

PARAMETRO	Unità di misura	Valore
<b>hindice</b>	mm	78.5
$\phi$	-	14.5
<b>CN</b>	-	82.2
<b>S</b>	mm	55.00
<b>la</b>	mm	11.00
<b>A</b>	Km <sup>2</sup>	602
<b>Q</b>	m <sup>3</sup> /s	540

Confrontando il valore di portata indice in condizioni attuali con quello in condizioni di cambiamento climatico si ottiene un valore di scarto percentuale dell'ordine del 35%.

**Tabella 28. Valori della portata indice in condizioni attuali e di cambiamento climatico**

PARAMETRO	Qindice, m <sup>3</sup> /s
<b>Portata indice in condizioni attuali</b>	393
<b>Portata indice in cambiamento climatico</b>	540
<b><math>\sigma\%</math></b>	37

E' stata quindi ricavata la distribuzione delle portate al colmo di piena, in condizioni di cambiamento climatico, in corrispondenza della sezione idrometrica dell'Enza a Termina-Masdone.

Nella tabella successiva sono riportati i parametri della distribuzione TCEV ottenuti per la sezione di Termina-Masdone in condizioni di cambiamento climatico.

**Tabella 29. Parametri TCEV in condizioni di cambiamento climatico, sezione di Termina Masdone**

teta1	teta2	lambda1	lambda2	teta*	lambda*
116.90	340.90	49.67	0.20	2.9163	0.0523

In tabella seguente si riportano i valori dei quantili per assegnato tempo di ritorno in condizioni attuali e di cambiamento climatico.

**Tabella 30. Portata al colmo (Qc) per assegnato tempo di ritorno (T) in condizioni attuali e di cambiamento climatico, sezione di Termina Masdone**

T, anni	Qc, m <sup>3</sup> /s	Qc, m <sup>3</sup> /s
	Valle Termina-Masdone in condizioni attuali	Valle Termina-Masdone in condizioni di cambiamento climatico
2	369	507
5	472	649
10	544	747
20	618	849
50	728	1000
100	828	1137
200	951	1307
500	1150	1581
1000	1316	1809

In veste grafica si ottiene quanto riportato in figura seguente

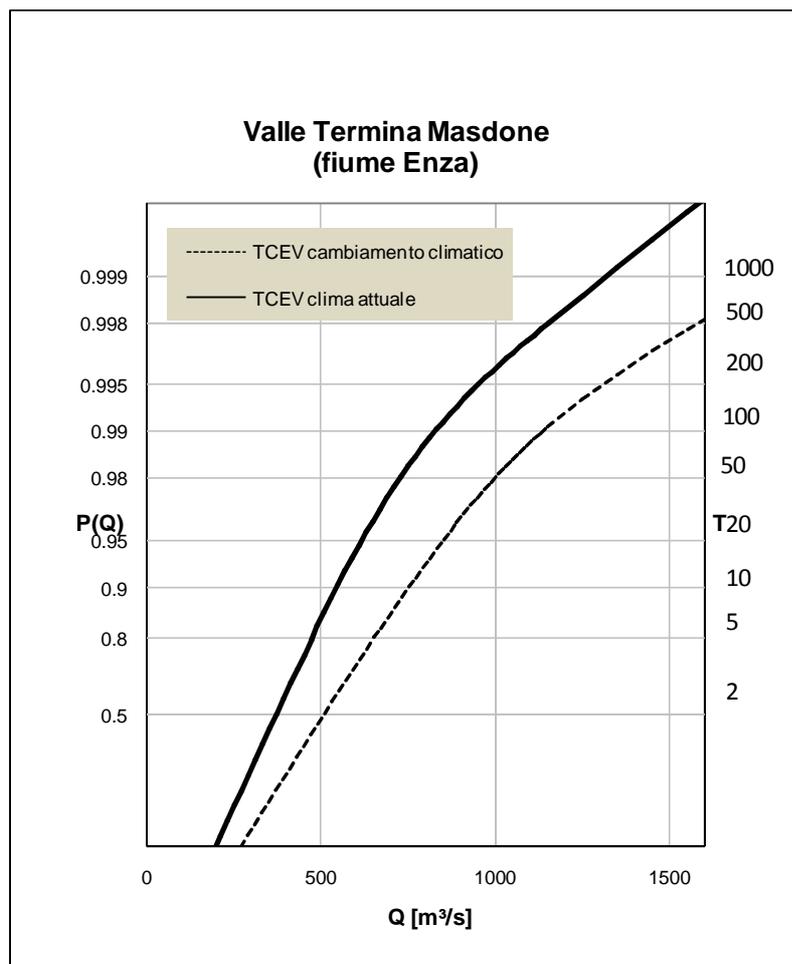


Figura 35. Confronto tra TCEV in clima attuale e in condizioni di cambiamento climatico

#### 5.4. Idrogrammi e cambiamento climatico

Nell'ipotesi di cambiamento climatico, la ridefinizione degli idrogrammi può essere effettuata, per quanto riguarda il metodo delle copule, analogamente a quanto già descritto nel paragrafo 4.3, ridefinendo i valori delle coppie portate al colmo/volumi stimate mediante le distribuzioni di probabilità in proiezione climatica (Tabella 31).

Per quanto riguarda il metodo degli idrogrammi sintetici di tipo SDH, la loro ridefinizione può essere effettuata imponendo una variazione del colmo di piena congruente alla distribuzione di probabilità ottenuta in proiezione climatica e variando opportunamente il parametro  $\theta$  nell'espressione di Bacchi della curva di riduzione in modo da mantenere invariato il volume dell'idrogramma in esame.

Di seguito i risultati ottenuti per la sezione dell'Enza a valle confluenza Termina–Masdone.

Tabella 31. Valori di portata al colmo (Qc), Volume (V) e parametro curva di riduzione ( $\theta$ ) in condizioni attuali e di cambiamento climatico

Caso Tr	Attuale			Proiezione CC		
	Qc [m <sup>3</sup> /s]	V [m <sup>3</sup> ]	$\theta$ [ore]	Qc [m <sup>3</sup> /s]	V [m <sup>3</sup> ]	$\theta$ [ore]
20	618	62009593	8.012	849	62009593	4.180
50	728	73061586	8.012	1000	73061586	4.185
100	828	83097518	8.012	1137	83097518	4.184
200	951	95420583	8.012	1307	95420583	4.178
500	1150	115413841	8.012	1581	115413841	4.177

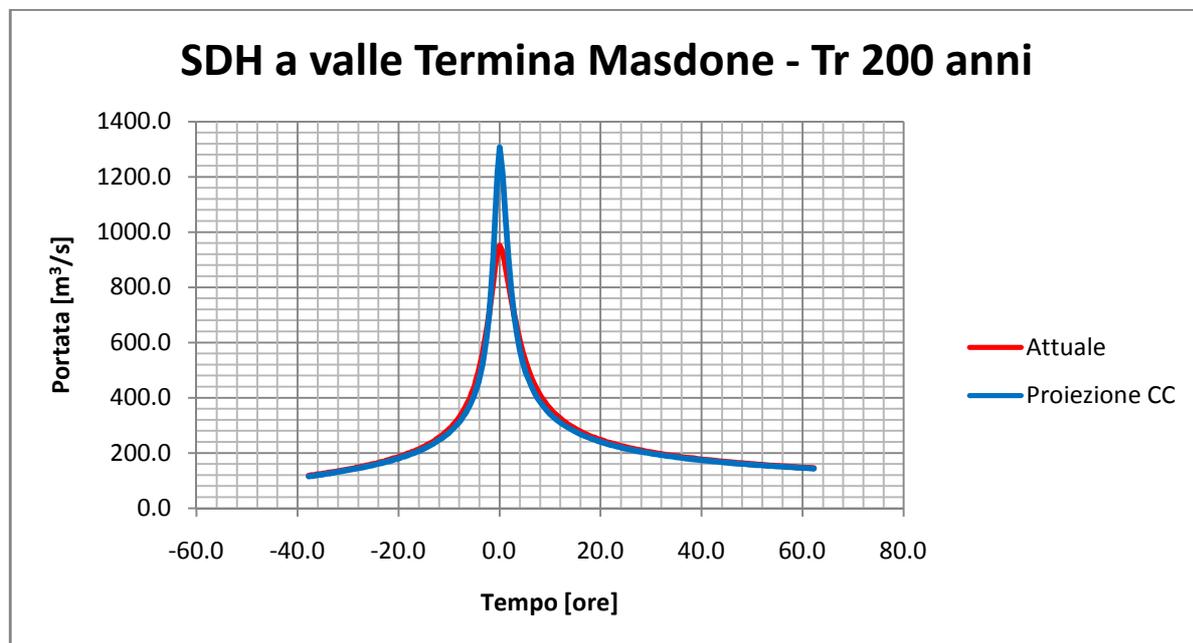


Figura 36. Confronto idrogrammi di tipo SDH per la sezione a valle confluenza Termina - Masdone in condizioni attuali e di cambiamento climatico

## 6. Prodotti consegnati

Le attività svolte da Arpae hanno riguardato la ricostruzione idrologica dell'evento di piena dell'11-12 dicembre 2017 e l'aggiornamento del quadro conoscitivo relativo all'idrologia di piena nel bacino dell'Enza. In particolare, si è proceduto all'aggiornamento delle analisi idrologiche del bacino dell'Enza, articolato nei principali sottobacini e all'analisi delle tendenze climatiche in atto e delle possibili evoluzioni future.

I dati e prodotti realizzati sono:

1. dati topografici ed idrologici utilizzati
2. shapefile delle stazioni e perimetrazioni di bacini e sottobacini utilizzati
3. dati spaziali in formato ASCII GRID di DEM del terreno e griglia delle altezze di pioggia spazializzate (formato ASCII GRID di ESRI)
4. tabelle dei dati e dei risultati delle elaborazioni statistiche condotte e relativi grafici
5. fogli di calcolo utilizzati per la generazione degli idrogrammi
6. relazione tecnica in formato DOC e PDF, nella quale sono descritte e commentate le analisi effettuate, i dati utilizzati ed i risultati ottenuti
7. tabelle e grafici contenuti nella relazione, in formato di foglio elettronico

## 7. Conclusioni

Il contributo di Arpa-SIMC-Servizio Idrologico alle “Attività di studio finalizzate alla ricostruzione idrologica dell’evento di piena dell’11-12 dicembre 2017 ed all’aggiornamento dell’idrologia di piena del torrente Enza” ha consentito di:

- aggiornare al 2017 il quadro delle osservazioni pluviometriche ed idrometriche;
- dotare gli Enti destinatari di uno strumento di calcolo degli idrogrammi di progetto che consenta l’utilizzo ottimale delle informazioni disponibili;
- migliorare il livello conoscitivo, le metodologie di analisi e di calcolo, ed i risultati ottenuti a partire dall’attuale quadro di riferimento fornito a scala di bacino, regionale e locale;
- applicare, sulla base di risultati forniti dalla ricerca scientifica applicata, nuove metodologie di calcolo delle precipitazioni estreme, delle portate al colmo e degli idrogrammi, che permettano di considerare altresì le possibili variazioni di uso del suolo e del clima e l’analisi congiunta dei picchi e dei volumi di piena;
- avvalersi dei risultati e dei metodi relativi allo studio dei cambiamenti climatici in atto e futuri per lo sviluppo e l’analisi specifiche delle precipitazioni, delle portate al colmo e dei volumi di piena, consolidando ulteriormente criteri già adottati nell’ambito dell’attività di supporto idrologico alla redazione Piano di gestione del rischio di alluvioni del Distretto Padano;
- adeguare gli strumenti idrologici di base alle esigenze di pianificazione, gestione ed allertamento per il rischio di alluvioni, in coerenza con le strategie ed i piani nazionali e regionali di adattamento ai cambiamenti climatici;
- considerare le potenzialità attuali e suggerire possibili sviluppi della rete di monitoraggio idropluviometrica e dei sistemi modellistici;
- avviare un percorso condiviso di analisi idrologica per aumentare, nei successivi cicli di pianificazione, il raccordo tra il Piano di gestione del rischio di alluvioni, il Piano di assetto idrogeologico ed il Piano di gestione delle acque, con particolare approfondimento dei cambiamenti climatici.

In particolare, le “Attività di studio finalizzate alla ricostruzione idrologica dell’evento di piena del 11-12 dicembre 2017 e all’aggiornamento dell’idrologia di piena del torrente Enza” sono state svolte nel contesto di riferimento fornito da:

- Piano di assetto idrogeologico del bacino del Po
- piano di gestione del rischio idraulico del Distretto idrografico del Po (ARS torrente Enza)
- Strategia/piano nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici
- Strategia regionale di adattamento e mitigazione dei cambiamenti climatici
- Annali e database idrologici
- Cataloghi degli eventi estremi di piena
- Sistemi di monitoraggio e modellazione degli eventi di piena locali, regionali e di bacino
- Informazioni cartografiche

## Bibliografia

Arpa-SIMC - Area idrologia, 2014. Relazione finale, *Attività di supporto all'attuazione della Direttiva 2007/60/CE con riferimento ai temi dell'idrologia di piena e dello studio dei cambiamenti climatici in atto e futuri nella porzione del territorio della Regione Emilia-Romagna ricadente nel distretto dell'Appennino settentrionale, definito ai sensi del D.Lgs. 152/2006 (Bacino del fiume Reno, bacini regionali romagnoli e bacino Marecchia-Conca (2014).*

Ballarin C., Maione U., Mignosa P., Tomirotti M., 2001. Una metodologia per la stima indiretta degli idrogrammi sintetici per il progetto di opere di difesa idraulica del territorio, *L'Acqua* 3/2001

De Michele C., Salvadori G., Canossi M., Petaccia A., Rosso R., 2005. Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spill, *Journal of hydrologic engineering, January-February 2005.*

De Michele, C., Zenoni, E., Pecora S. and R. Rosso, Analytical derivation of rain intensity-duration-area-frequency relationships from event maxima, *Journal of Hydrology* 399 (2011) 385-393.

Jenkinson A.F., 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, Vol. 81.

Maione U., 1999. *Le piene fluviali. Ed. La Goliardica pavese.*

Rossi F., Fiorentino M., Versace P., 1984. Two-Component Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analysis, *Water Resources Research*, Vol. 20 , No. 7, July 1984.

Salvadori G. et al., 2007. Extremes in nature. An Approach Using Copulas, *Water Science and Technology Library, Springer.*

Tomirotti, M., Mignosa, P., 2017. A methodology to derive synthetic design hydrographs for river flood management, *Journal of Hydrology* 555 December 2017, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.036>