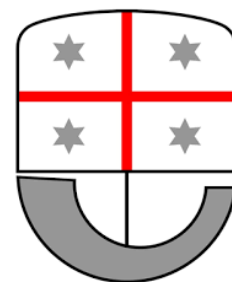




UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI GENOVA
Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale

Regione Liguria
Settore Assetto del Territorio



REGIONE LIGURIA

INTERREG ALCOTRA “Concert-Eaux”

(Programma europeo di cooperazione transfrontaliera tra Francia e Italia)

WP 4.1 e Modellazione idrologica

REPORT TECNICO

Genova, 02 agosto 2019

INDICE

1	ANALISI STATISTICA DELLE SERIE DI PRECIPITAZIONE	4
1.1	Analisi statistica locale	4
1.2	Analisi a scala di bacino	11
1.3	Costruzione di eventi pluviometrici sintetici di assegnato periodo di ritorno.....	14
2	IL MODELLO IDROLOGICO	16
2.1	La schematizzazione semi-distribuita	16
2.2	Il modello per la stima delle perdite.....	17
2.3	Il modello di trasformazione afflussi-deflussi	19
2.4	Il modello di convoluzione lungo l'asta.....	20
2.5	La simulazione di eventi meteorici storici registrati dalla rete pluvio-idrometrica	21
3	VALUTAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DI ASSEGNATO PERIODO DI RITORNO	24
3.1	Valutazione delle portate di piena.....	24
3.2	Valutazione degli idrogrammi di piena	26

Il presente documento costituisce il report tecnico illustrativo delle attività svolte dal gruppo idrologia dell'Università di Genova - DICCA, nell'ambito del Progetto INTERREG ALCOTRA "Concert-Eaux" per quanto concerne lo sviluppo e l'implementazione di un modello di idrologico per la stima della portata di piena del bacino Roia.

Nella presente relazione è illustrato il complesso delle ricerche svolte in merito ai diversi temi oggetto di consulenza: analisi statistica delle serie di precipitazione per il bacino transfrontaliero e relativa acquisizione dati per la parte Italiana e Francese; implementazione di modellistica idrologica; definizione dei criteri per la valutazione delle portate di piena e degli idrogrammi di piena ai sensi del DGR 357/2008 di Regione Liguria.

I risultati ottenuti nel corso della ricerca sono riportati in dettaglio nella presente relazione ed organizzati in diversi sotto-paragrafi in relazione alla specifica attività oggetto della consulenza.

I dati relativi agli idrogrammi di piena per le sezioni di riferimento e per i tempi di ritorno selezionati pari a 50, 200 e 500 anni sono forniti in formato elettronico nel file "idrogrammi_roja.xls"

1 ANALISI STATISTICA DELLE SERIE DI PRECIPITAZIONE

1.1 Analisi statistica locale

La prima fase dello studio del regime delle precipitazioni estreme è stata condotta a scala locale sulla base delle serie storiche di osservazioni pluviometriche disponibili sul bacino del Roia.

L'analisi statistica delle altezze di precipitazione massime annuali di assegnata durata è stata effettuata utilizzando come modello probabilistico la distribuzione generalizzata d'estremo, GEV (Generalized Extreme Value) tipicamente utilizzata per descrivere il comportamento di variabili idrologiche d'estremo. La funzione di ripartizione (i.e. distribuzione di probabilità cumulata, CDF) e la funzione densità di probabilità (pdf) della distribuzione GEV sono definite come segue (Hosking & Wallis, 1987):

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 - \frac{k(x-\varepsilon)}{\alpha}\right]^{1/k}\right\}, \quad f(x) = \sigma^{-1} \exp[-(1-k)y - \exp(-y)]$$

dove x rappresenta l'altezza di precipitazione massima annuale di assegnata durata (variabile aleatoria), ε , α e k indicano rispettivamente i parametri di posizione, scala e forma della distribuzione ed y è la variabile ridotta definita dalla seguente espressione:

$$y = -k^{-1} \ln \left[1 - \frac{k(x-\varepsilon)}{\alpha}\right] \quad \text{con } k \neq 0$$

La stima dei parametri della distribuzione è stata condotta utilizzando il metodo della massima verosimiglianza.

Si noti che per l'analisi statistica a scala locale è stato utilizzato il modello scala invariante che consente di definire la curva di crescita delle massime altezze di precipitazione indipendentemente dalla durata. Secondo tale approccio, l'analisi statistica degli estremi di precipitazione può essere condotta facendo riferimento al valore normalizzato delle altezze massime di precipitazione di assegnata durata rispetto al corrispondente valore medio, determinando così il quantile della curva di crescita a scala locale che, nell'ipotesi di una distribuzione di tipo GEV, risulta:

$$w_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \{1 - [\ln(T/(T-1))]^k\}$$

dove w_T rappresenta il fattore di crescita adimensionale per assegnato periodo di ritorno.

Per ciascuna stazione pluviometrica situata all'interno del bacino del Roia di cui si disponeva di una serie storica di osservazioni pluviometriche si riporta sinteticamente la procedura di analisi adottata:

- estrazione dei valori massimi annuali di precipitazione per le durate riportate negli annali idrologici: 1, 3, 6, 12 e 24 ore;
- determinazione dei momenti campionari di ciascuna serie di osservazioni di assegnata durata: media, varianza e coefficiente di variazione;
- determinazione della serie unica delle altezze di precipitazione normalizzate rispetto al corrispondente valore medio dell'altezza di precipitazione massima di assegnata durata;
- stima dei parametri locali ε , α e k della distribuzione d'estremo generalizzata, GEV.

Nel seguito si riportano le informazioni relative alle stazioni pluviometriche nonché le caratteristiche delle serie storiche di osservazioni utilizzate nell'analisi a scala locale ed i risultati delle analisi a scala locale.

Legenda

- Stazioni Pluviometriche
- Limite bacino
- Reticolo idrografico

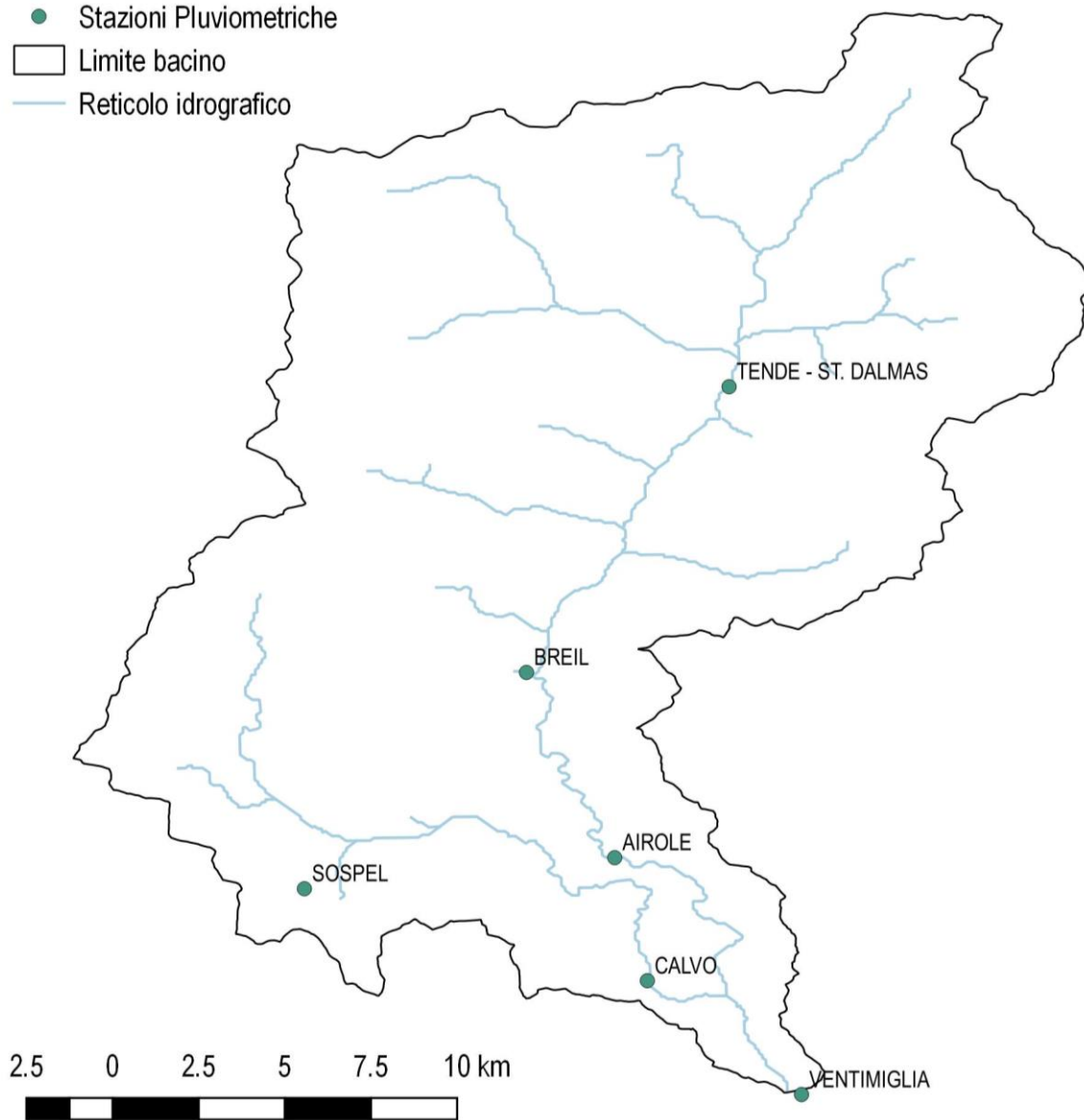


Figura 1: Localizzazione delle stazioni pluviometriche del bacino del Roia.

Tabella 1: Stazioni pluviometriche situate nel bacino del Roia.

Località	Codice Stazione	Latitudine	Longitudine	Periodo di osservazione
<i>Ventimiglia</i>	VENTO	43.78777	7.61211	1951-2016
<i>Calvo</i>	CALVO	43.828	7.556	1939-1977
<i>Airole</i>	AIROLE	43.87309	7.54478	1950-2016
<i>Breil</i>	BREIL	43.940	7.513	1990-2016
<i>Tende- St. Dalmas</i>	TENDE	44.043	7.586	1990-2016
<i>Sospel</i>	SOSPEL	43.862	7.433	2004-2016

Tabella 2: Caratteristiche delle serie storiche di altezze di precipitazione massime annuali di assegnata durata per le stazioni pluviometriche del bacino del Roia.

Località	Codice stazione	# dati	Altezza di precipitazione massima annuale H_d [mm]					
			durata	1h	3h	6h	12h	24h
<i>Ventimiglia</i>	VENTO	46	μ	24.4	39.5	52.2	65.4	81.9
			CV	0.41	0.31	0.30	0.31	0.32
<i>Calvo</i>	CALVO	25	μ	35.7	51.8	67.3	84.0	113.8
			CV	0.39	0.37	0.39	0.36	0.40
<i>Airole</i>	AIROLE	57	μ	27.9	48.3	69.3	94.5	124.1
			CV	0.41	0.41	0.42	0.42	0.46
<i>Breil</i>	BREIL	27	μ	27.3	45.4	65.7	94.2	125.4
			CV	0.34	0.35	0.41	0.41	0.46
<i>Tende - St. Dalmas</i>	TENDE	27	μ	27.0	42.9	57.4	74.8	102.3
			CV	0.42	0.39	0.33	0.36	0.47
<i>Sospel</i>	SOSPEL	13	μ	26.5	46.7	69.3	95.5	126.4
			CV	0.37	0.42	0.43	0.46	0.42
<i>Bacino Roia</i>	<i>tutte le stazioni</i>	195	μ	27.8	45.4	62.9	83.6	110.1
			CV	0.41	0.38	0.40	0.42	0.46

Tabella 3: Stima dei parametri locali ε , α e k della curva di crescita GEV per le stazioni pluviometriche del bacino del Roia.

Località	Codice Stazione	Parametro di posizione ε [-]	Parametro di scala α [-]	Parametro di forma k [-]
<i>Ventimiglia</i>	VENTO	0.850	0.264	0.016
<i>Calvo</i>	CALVO	0.833	0.268	-0.044
<i>Airole</i>	AIROLE	0.796	0.283	-0.13
<i>Breil</i>	BREIL	0.815	0.293	-0.483
<i>Tende- St. Dalmas</i>	TENDE	0.830	0.334	0.080
<i>Sospel</i>	SOSPEL	0.826	0.341	0.077

Facendo riferimento a quanto pubblicato nell'Appendice II - Regime pluviometrico locale delle Linee Guida Regionali (Criteri di verifica e valutazione delle portate al colmo e degli idrogrammi di piena nei bacini idrografici liguri, DGR Regione Liguria 359/2008), non si osservano differenze significative nei risultati ottenuti per le stazioni di Ventimiglia, Calvo ed Airole.

Tabella 4: Parametri locali ε , α e k della curva di crescita GEV per le stazioni di Airole, Calvo e Ventimiglia riportati nell'Appendice II - Regime pluviometrico locale delle Linee Guida Regionali (DGR),

Località	Codice Stazione	# dati	Parametro di posizione ε [-]	Parametro di scala α [-]	Parametro di forma k [-]
<i>Ventimiglia</i>	VENTO	32	0.854	0.253	0.0
<i>Calvo</i>	CALVO	26	0.834	0.277	-0.022
<i>Airole</i>	AIROLE	38	0.800	0.305	-0.075

I parametri della curva di crescita GEV per le singole stazioni non variano significativamente rispetto a quelli pubblicati nelle linee guida regionali anche per le stazioni di Ventimiglia ed Airole per le quali la consistenza dati è aumentata rispettivamente di 14 e 19 anni. In particolare si noti che la curva di crescita relativa alla stazione di Ventimiglia che viene trattata nelle linee guida regionali con una distribuzione di tipo Gumbel, si configura anche in questo studio sostanzialmente come una retta in carta probabilistica di Gumbel come confermato dal valore del parametro di forma k prossimo al valore zero.

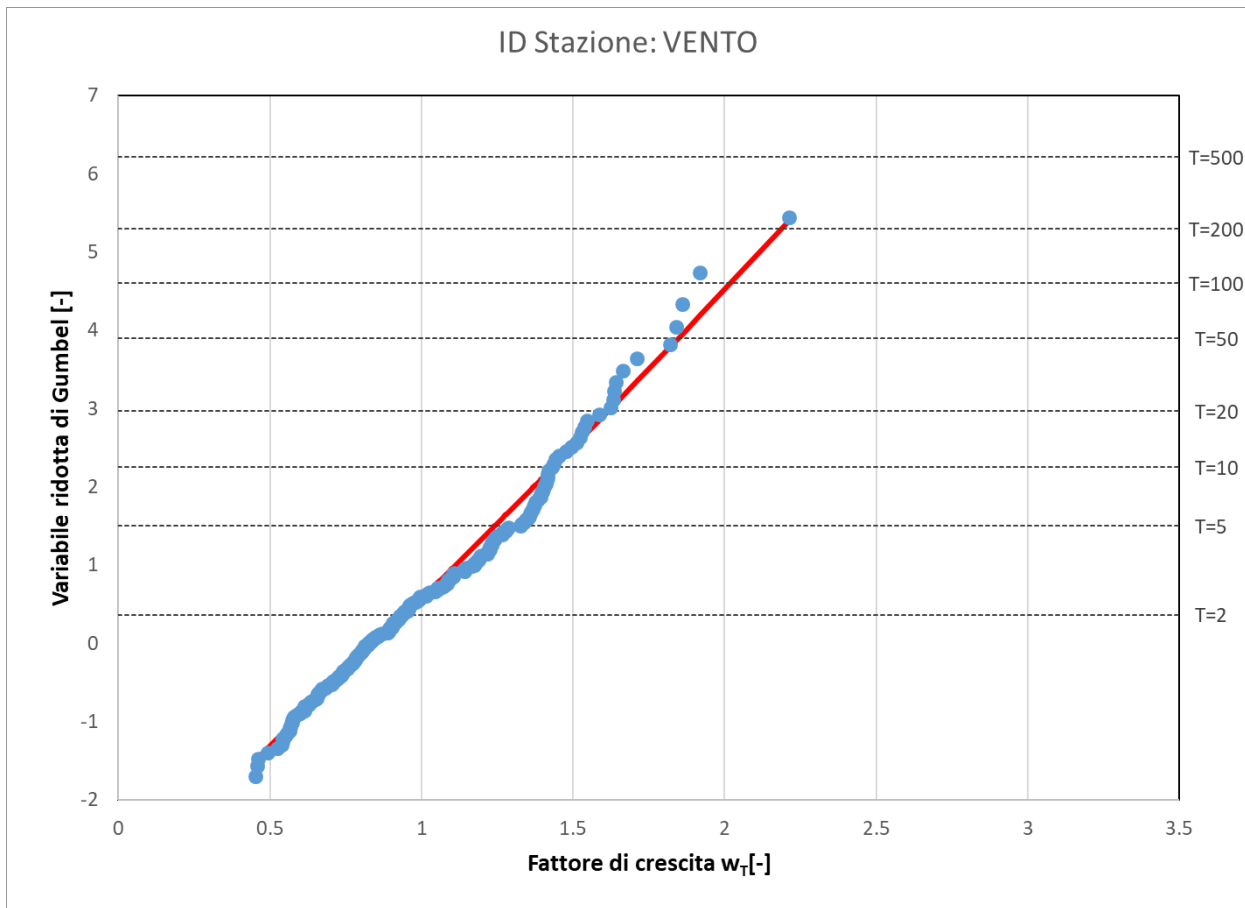


Figura 2: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata a Ventimiglia (IT).

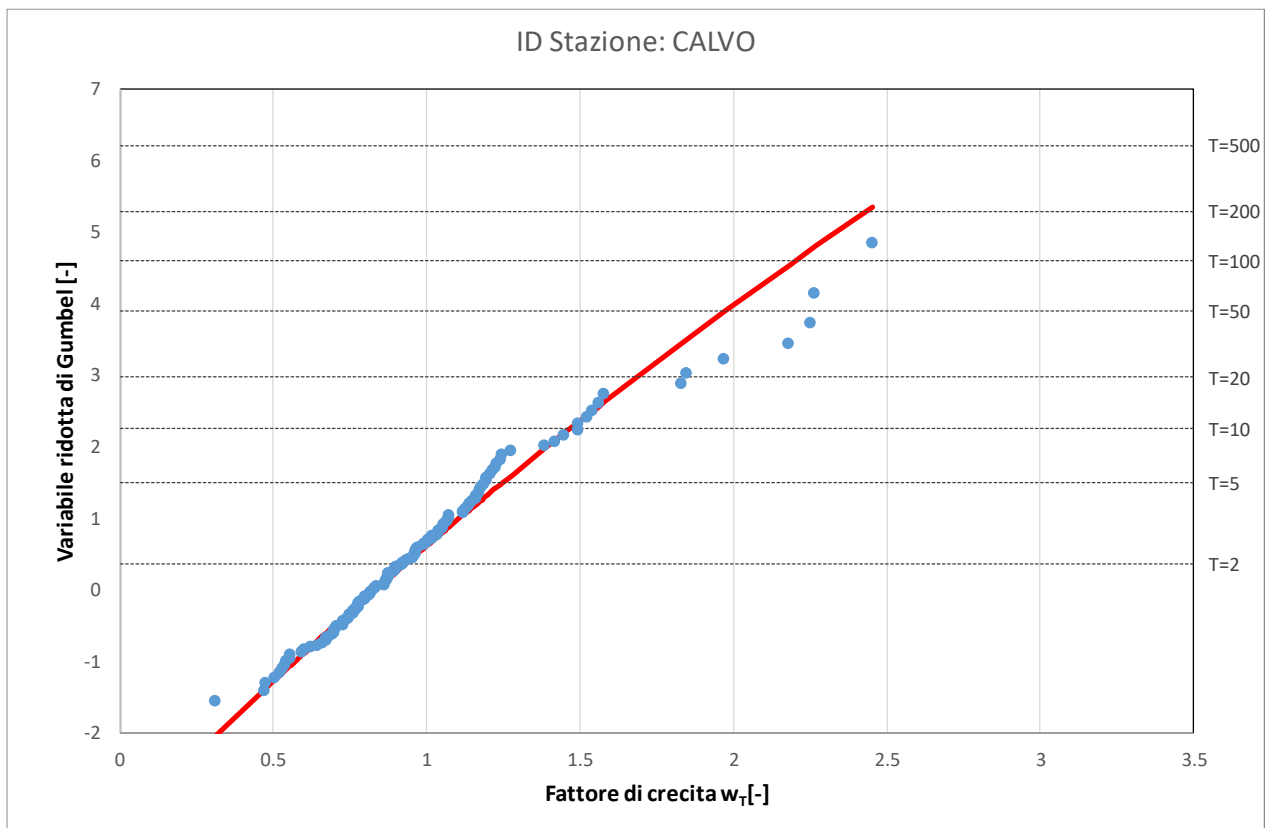


Figura 3: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata a Calvo (IT).

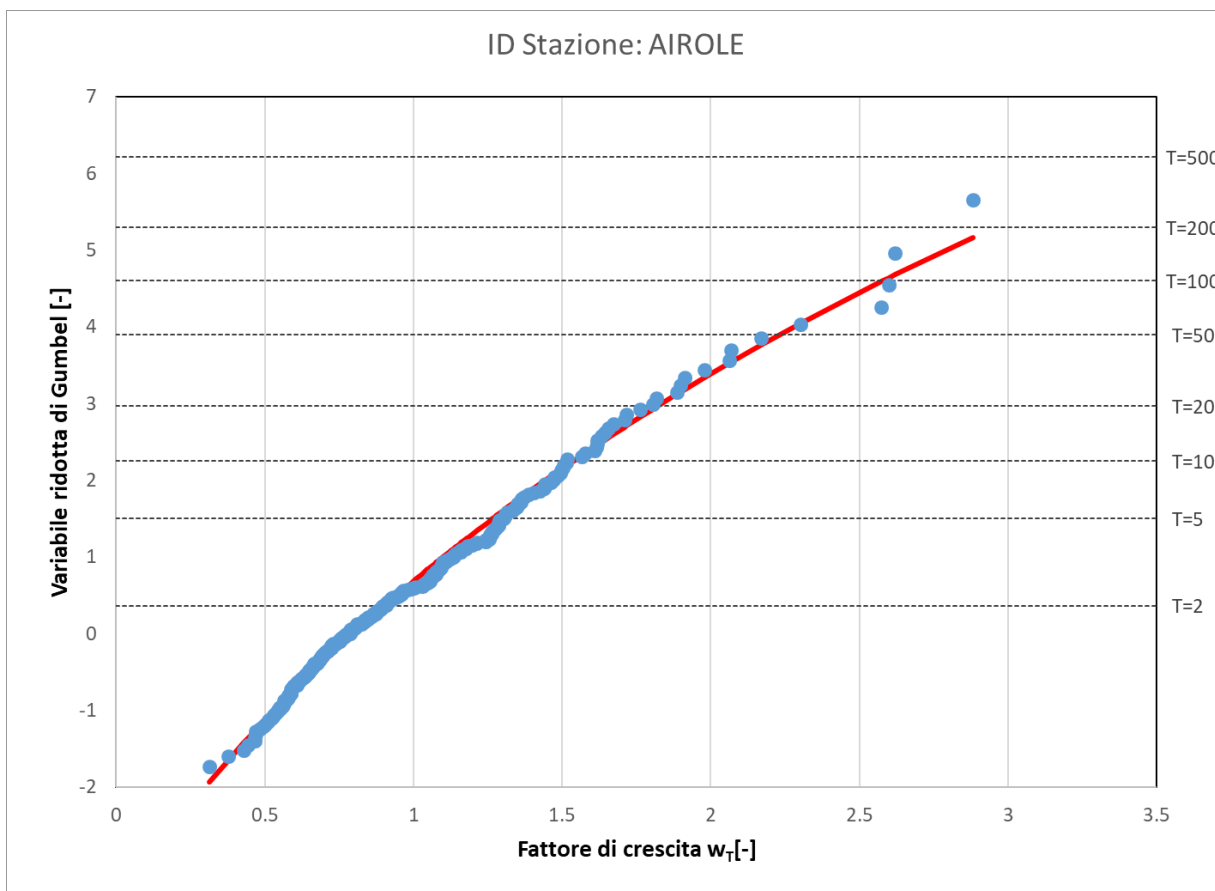


Figura 4: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata ad Airole (IT).

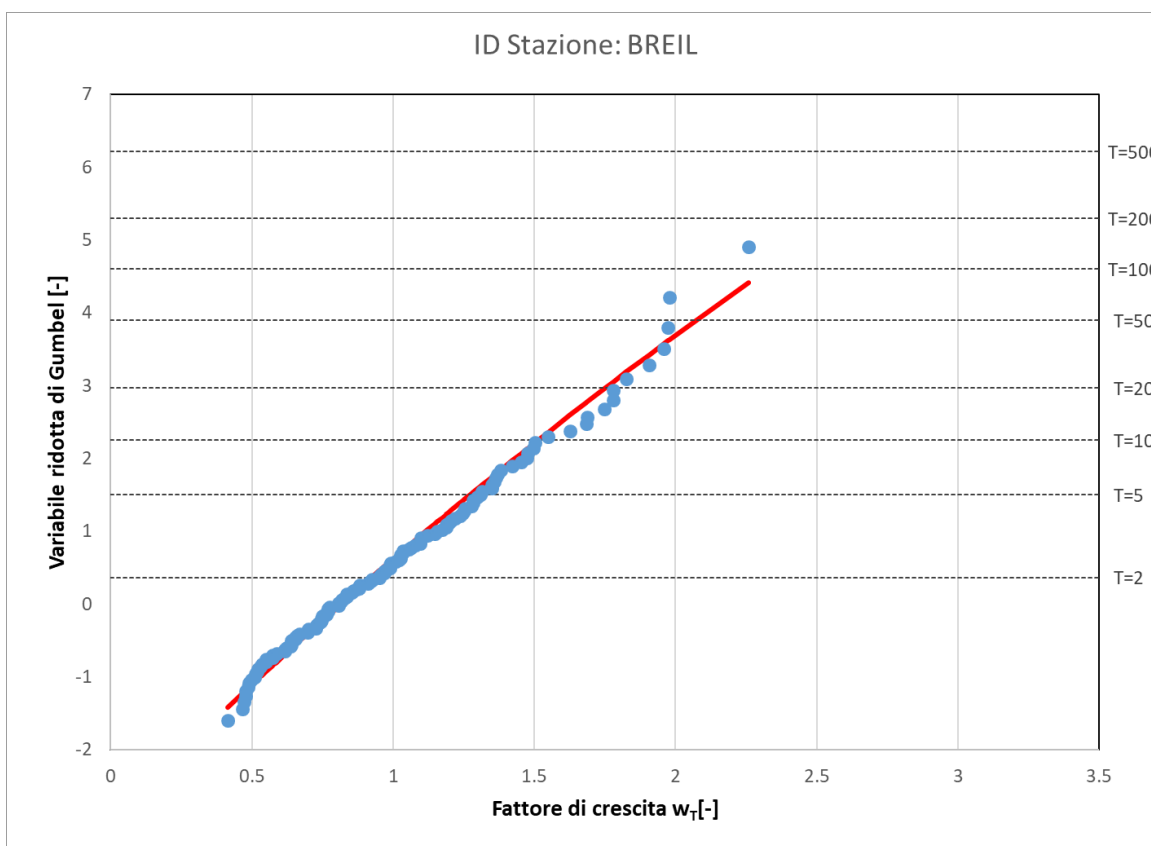


Figura 5: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata a Breil (FR).

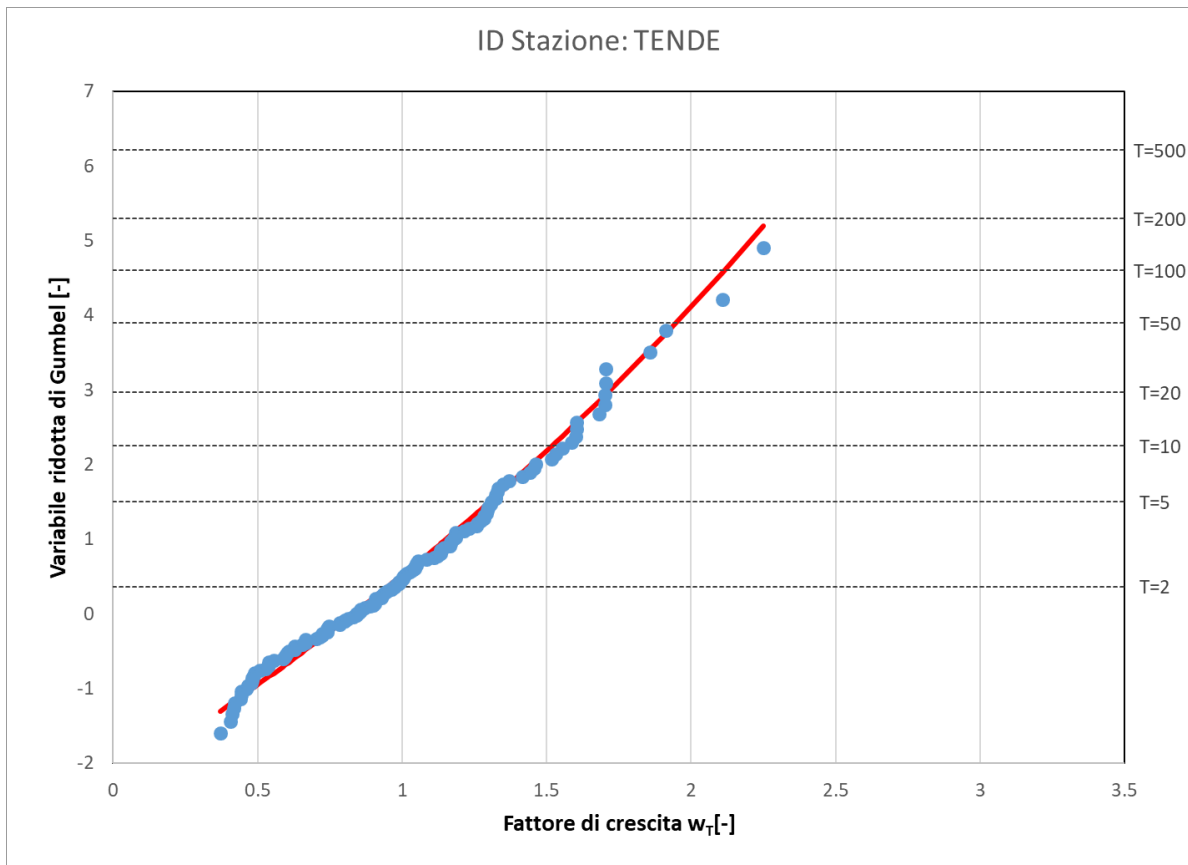


Figura 6: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata a St. Dalmas – Tende (FR).

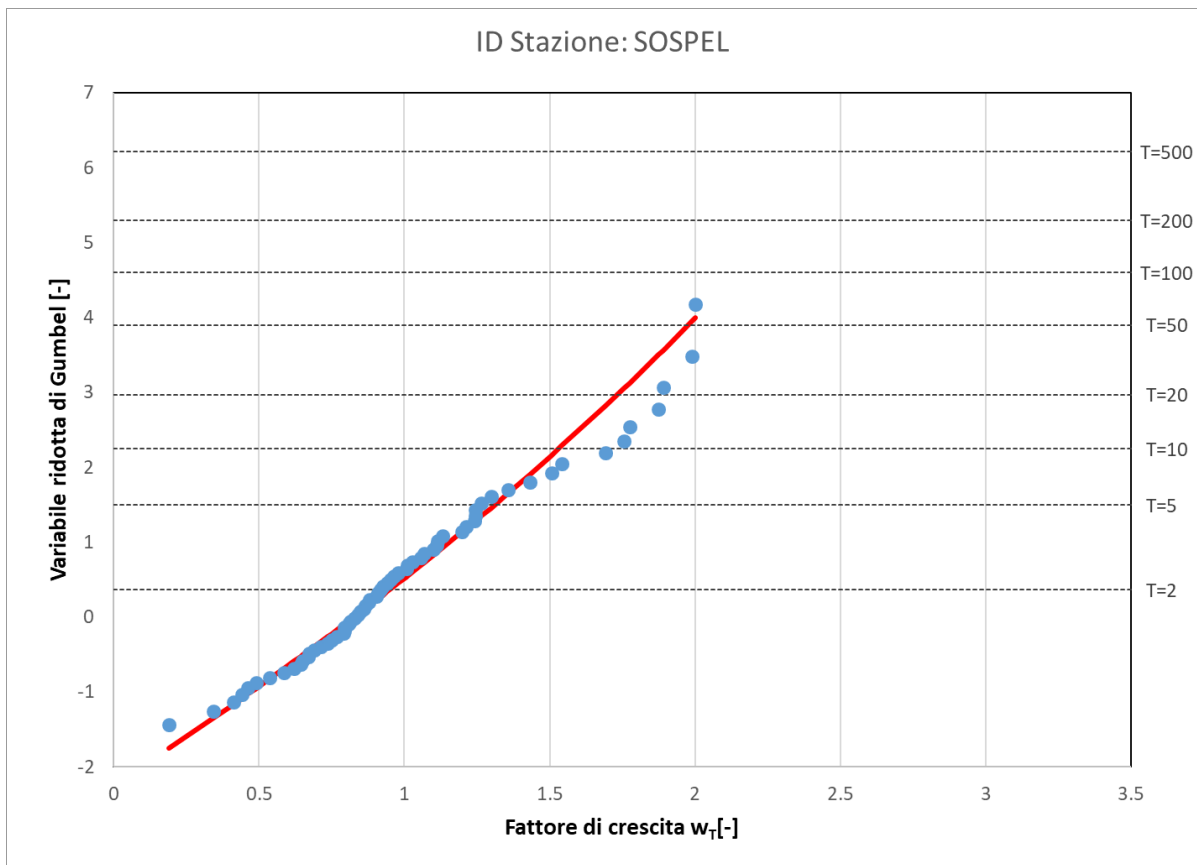


Figura 7: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata a Sospel (FR).

1.2 Analisi a scala di bacino

A partire dai risultati ottenuti nell'analisi a scala locale, si è osservato un comportamento simile nel regime di precipitazione estremo. In particolare, confrontando le 6 serie di osservazioni pluviometriche, si è osservata una consistenza dei valori osservati sia in termini di valori medi delle altezze massime di precipitazione per assegnata durata sia in termini di coefficienti di variazione. Inoltre le curve di crescita a scala locale mostrano anch'esse un comportamento consistente a scala di bacino.

Pertanto sulla base delle osservazioni precedenti si è deciso di condurre un'analisi statistica a scala di bacino determinando il fattore di crescita del bacino del Roia a partire dall'analisi statistica delle altezze massime di precipitazione normalizzate valutate per tutte e 6 le stazioni di misura. L'analisi è stata condotta assumendo una distribuzione d'estremo generalizzata (GEV) analogamente a quanto effettuato su scala locale. Si osserva che la curva di crescita del bacino del Roia è stata stimata utilizzando la stessa procedura proposta per l'analisi a scala locale considerando un'unica serie storica di altezze massime annuali che include le osservazioni relative alle 6 stazioni pluviometriche.

Al fine di verificare la rappresentatività della curva di crescita valutata a scala di bacino, sono state calcolate le fasce di confidenza della curva di crescita a scala di bacino basate su una generazione con metodo Montecarlo. Nello specifico, facendo riferimento ad ogni stazione pluviometrica, sono state generate le fasce di confidenza della curva di crescita a scala di bacino attraverso una generazione sintetica basata su un numero di osservazioni corrispondenti alla lunghezza della serie storica della stazione pluviometrica in esame. Tale procedura ha consentito di generare fasce di confidenza consistenti con la curva di crescita ottenuta dall'analisi a scala locale e pertanto verificare la rappresentatività della curva di crescita a scala di bacino rispetto al regime di precipitazione estremo valutato per ogni singola stazione pluviometrica. In particolare la verifica è considerata soddisfatta se la curva di crescita locale ricade all'interno delle fasce di confidenza della curva regionale. Si noti che per la determinazione delle fasce di confidenza si è assunto un valore del livello di significatività α pari a 0.1.

I risultati hanno confermato che la curva di crescita stimata per l'interno bacino del Roia può essere considerata rappresentativa dei regimi di precipitazione valutati a scala locale almeno per quanto riguarda le 6 stazioni pluviometriche oggetto di analisi. L'unica eccezione è costituita dalla stazione pluviometrica di Calvo; in questo caso la curva di crescita locale ricade al di fuori delle corrispondenti fasce di confidenza per valori del tempo di ritorno T inferiori a 20 anni. Se si considera che la stazione pluviometrica di Calvo è caratterizzata da una serie storica di osservazioni piuttosto limitata (pari a 25 anni) e che la stazione di misura non è più operativa dal 1977 ed inoltre considerando che tale verifica non è soddisfatta solo nel campo delle elevate frequenze ($T < 20$ anni), si ritiene che tale risultato non infici la rappresentatività della curva di crescita a scala di bacino. A ciò si aggiunge che la stazione di misura di Calvo ricade nella porzione di bacino prossima alla sezione terminale del corso d'acqua dove è attiva la stazione di misura di Ventimiglia per la quale la verifica è stata soddisfatta.

I parametri ϵ , α e k della curva di crescita a scala del bacino del Roia sono stati stimati rispettivamente pari a: 0.8071 (parametro di posizione); 0.2986 (parametro di scala) e -0.065 (parametro di forma).

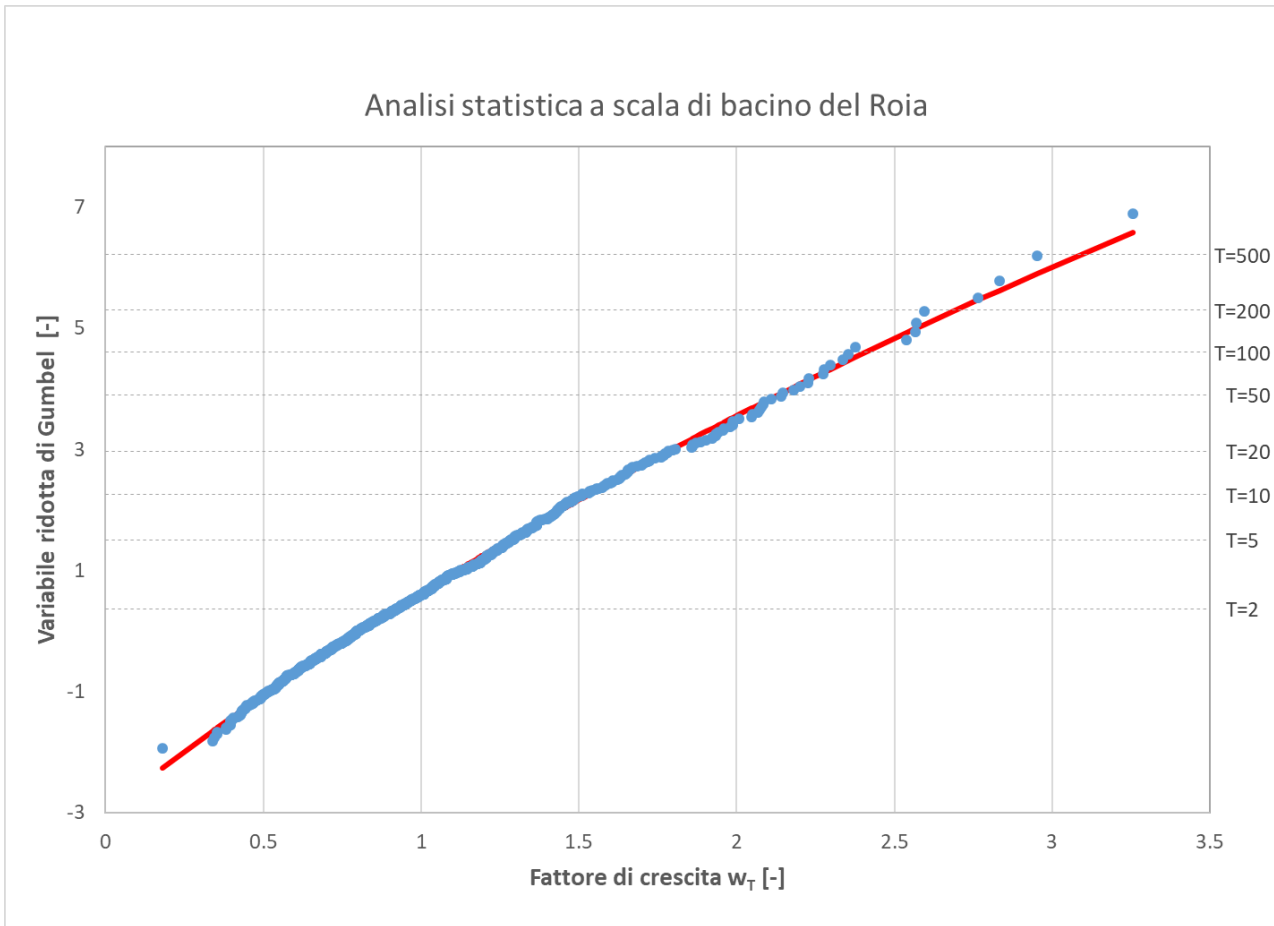


Figura 8: Curva di crescita GEV a scala del bacino del Roia.

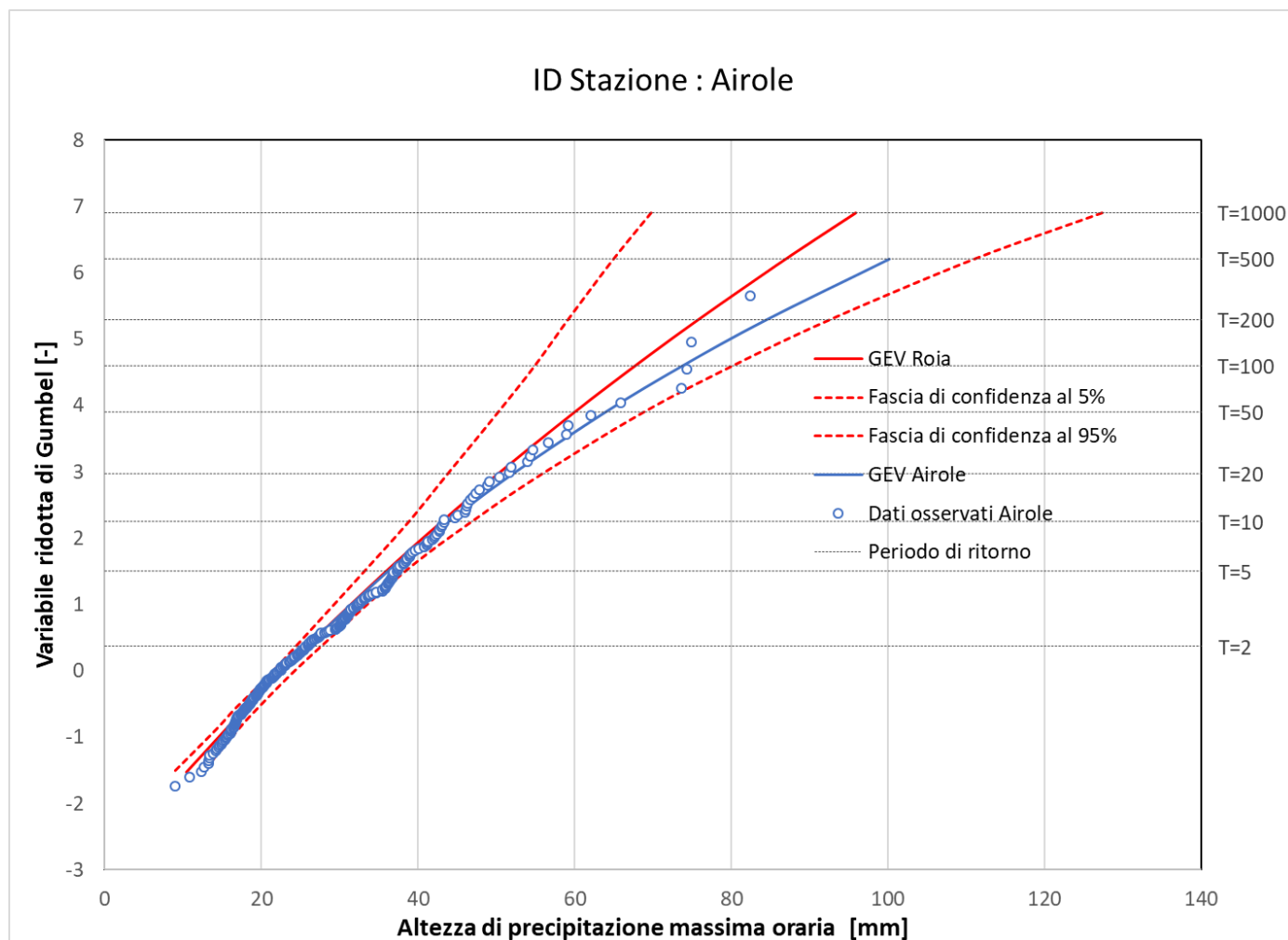


Figura 9: Confronto tra la GEV valutata a scala del bacino del Roia con le corrispondenti fasce di confidenza e la GEV valutata a scala locale per la stazione pluviometrica di Airole. Si noti che le fasce di confidenza sono state valutate attraverso un modello di generazione MonteCarlo e livello di significatività α a pari a 0.1.

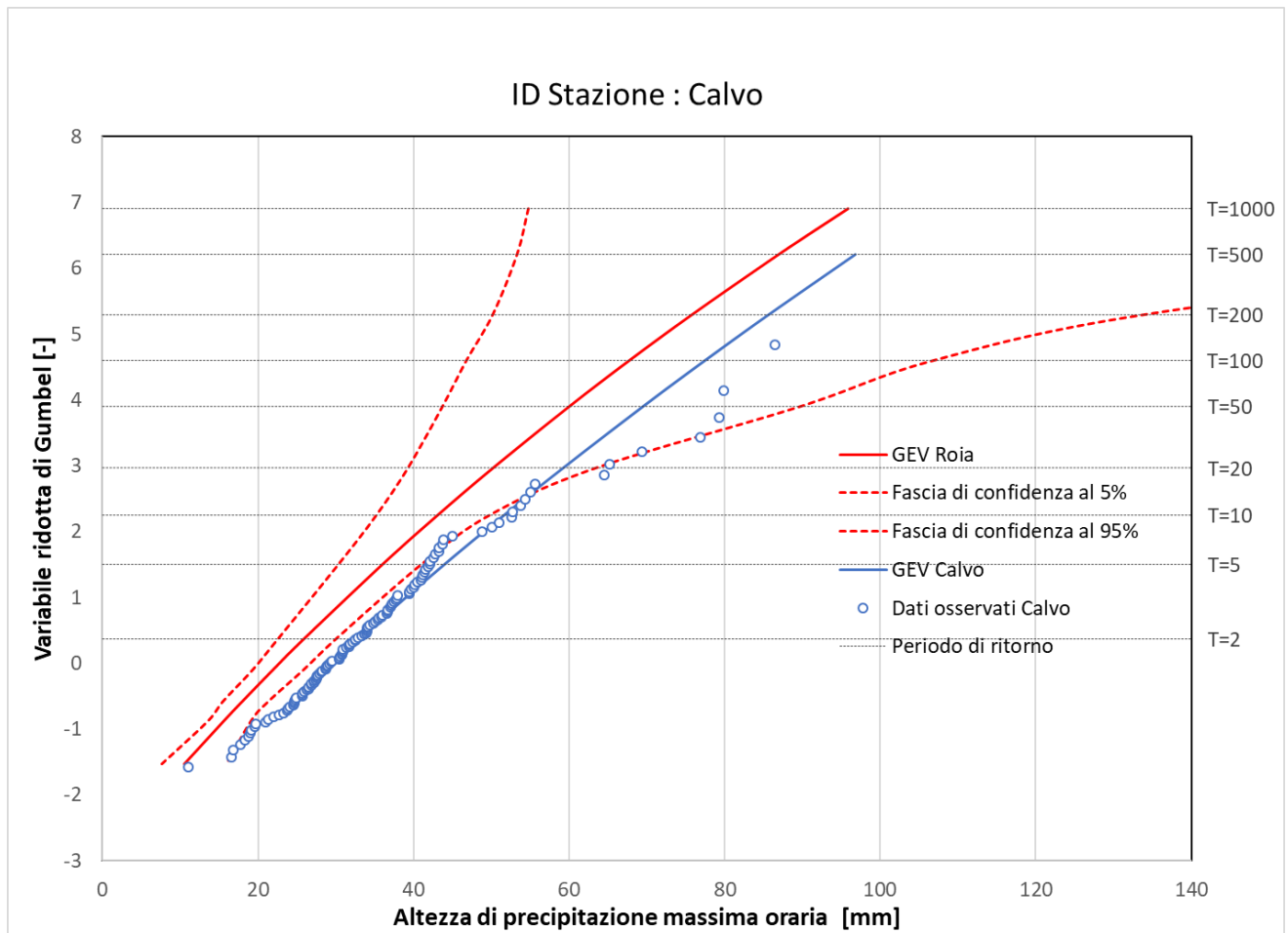


Figura 10: Confronto tra la GEV valutata a scala del bacino del Roia con le corrispondenti fasce di confidenza e la GEV valutata a scala locale per la stazione pluviometrica di Calvo. Si noti che le fasce di confidenza sono state valutate attraverso un modello di generazione MonteCarlo e livello di significatività α a pari a 0.1.

1.3 Costruzione di eventi pluviometrici sintetici di assegnato periodo di ritorno

L'obiettivo dell'analisi del regime pluviometrico d'estremo condotta prima a scala locale e poi di bacino è volto alla determinazione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP) valide per il bacino del Roia. Le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica sono state determinate utilizzando la classica forma monomia nell'ipotesi di modello probabilistico scala invariante, per cui possono essere descritte dalla seguente espressione:

$$h_T(d) = a_1 w_T d^n$$

dove a_1 [L/T^n] rappresenta il coefficiente di scala delle LSPP ed è pari al valore atteso della pioggia massima annuale per la durata di riferimento assunta pari ad un'ora (pioggia indice), w_T è il fattore di crescita ed n rappresenta l'esponente di scala adimensionale con cui la variabilità del fenomeno si trasmette dalla scala di riferimento alle altre scale temporali.

Per il bacino del Roia i valori del coefficiente di scala e dell'esponente delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica sono risultati pari a 28.1 [mm/h^n] e 0.435, rispettivamente. In Tabella 5 è riportato il valore del fattore di crescita valutato facendo riferimento ai parametri ϵ , α e k della curva di crescita a scala del bacino del Roia per differenti periodo di ritorno oggetto dell'indagine.

Tabella 5: Fattore di crescita a scala del bacino del Roia

Periodo di ritorno T [anni]	Fattore di crescita w_T [-]
<i>2</i>	0.92
<i>5</i>	1.28
<i>10</i>	1.53
<i>20</i>	1.79
<i>50</i>	2.13
<i>100</i>	2.41
<i>200</i>	2.69
<i>500</i>	3.09

A partire dalle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica è possibile costruire eventi di precipitazione sintetica di assegnata durata ed assegnato periodo di ritorno. Tali eventi sintetici costituiscono la forzante pluviometrica di input del modello idrologico.

Gli eventi sintetici sono stati costruiti utilizzando un semplice ietogramma rettangolare che ipotizza una precipitazione costante per tutto l'evento di precipitazione. Per la determinazione delle altezze di precipitazione che caratterizzano gli eventi simulati attraverso il modello idrologico è stato considerato un intervallo di durate nominali variabili tra 1 e 20 ore a scansione oraria. Pertanto, per ogni periodo di ritorno considerato sono stati simulati 20 eventi di precipitazione ad intensità costante. La simulazione di eventi di precipitazioni compresi in tale intervallo di durate garantisce la simulazione dell'evento critico per le diverse sezioni del bacino idrologico oggetto di indagine.

Considerando la distribuzione spaziale dell'evento di precipitazione è stato assunto un coefficiente di ragguaglio areale pari a 0.75. Si noti che tale coefficiente è stato utilizzato per tenere in considerazione la distribuzione spaziale dell'evento estremo sull'intero bacino; si è pertanto considerato un volume di pioggia pari a quello definito attraverso la linea segnalatrice di possibilità pluviometrica per assegnata durata e tempo di ritorno, mentre l'intensità di precipitazione è stata valutata riferendosi ad una durata effettiva maggiore rispetto alla durata nominale. Ne consegue che l'intensità di precipitazione sull'intero bacino risulta inferiore a quella derivata direttamente dalla LSPP rispettando tuttavia i volumi di precipitazione affluiti.

2 IL MODELLO IDROLOGICO

2.1 La schematizzazione semi-distribuita

Il bacino del Roia è stato schematizzato utilizzando il modello digitale del terreno (DTM) con risoluzione a maglia quadrata di 20 m già utilizzato nell'ambito del progetto Eurobassin ed integrandolo con il DTM relativo alla zona terminale del bacino con risoluzione a maglia quadrata di 5 m disponibile dal database cartografico della Regione Liguria. Ai fini della schematizzazione del bacino per l'implementazione del modello idrologico, il territorio del bacino del Roia è stato quindi ricampionato con una risoluzione a maglia quadrata di 100 m. Si ritiene infatti che sebbene sia possibile descrivere la morfologia del bacino a risoluzioni inferiori, lo stesso grado di dettaglio non è disponibile su altri parametri caratteristici del modello idrologico. Inoltre, trattandosi di un modello idrologico di piena implementato per un bacino idrografico di estensione pari a 672 km², maggiori risoluzioni della morfologia del bacino non sarebbero state comunque rappresentate dalla schematizzazione idrologica del bacino.

Sulla base del modello digitale del terreno del bacino del Roia è stato determinato il reticolo idrografico ed il bacino è stato schematizzato facendo riferimento ad un modello idrologico di tipo semi-distribuito. In particolare sono stati individuati i sottobacini caratterizzati da una superficie scolante compresa tra 1 e 10 km² per un totale di 116 sottobacini; il reticolo idrografico è stato distinto in tratti caratterizzati da superficie scolante direttamente sull'asta inferiore ad 1 km², sono state pertanto individuati 1391 tratti di reticolo idrografico. Il bacino del Roia risulta così strutturato in 1507 unità di cui 116 sottobacini e 1391 tratti; dal punto di vista teorico, il modello idrologico può fornire l'idrogramma di piena di assegnato periodo di ritorno in corrispondenza di ciascuna delle 1507 sezioni.



Figura 11: Reticolo idrografico del bacino del Roia.

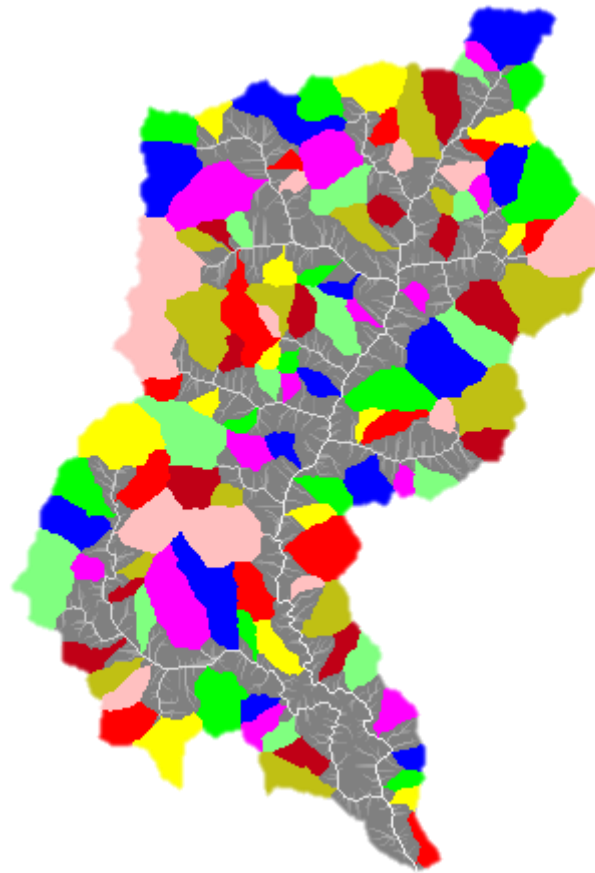


Figura 12: Schematizzazione del bacino del Roia utilizzata nel modello idrologico con indicazione dei sottobacini di area totale compresa tra 1 e 10 km².

2.2 Il modello per la stima delle perdite

La valutazione delle perdite idrologiche e conseguentemente la determinazione della precipitazione efficace è stata effettuata applicando il metodo del Curve Number (*CN*) proposto dal Soil Conservation Service degli Stati Uniti (SCS, 1985). Tale metodo è basato sulla determinazione del parametro adimensionale *CN* rappresentativo della natura e della tipologia di uso del suolo.

In particolare la pioggia efficace è legata alla precipitazione totale attraverso la seguente espressione:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

dove P [L] rappresenta la precipitazione totale affluente al bacino, I_a [L] rappresenta la perdita iniziale dovuta principalmente all'intercettazione e all'immagazzinamento nelle depressioni superficiali ed S [L] rappresenta la quantità d'acqua che può essere immagazzinata nel terreno. Assumendo che il parametro I_a che dipende principalmente delle caratteristiche del suolo, possa essere espresso in funzione del parametro S è possibile semplificare l'espressione precedente come segue:

$$P_e = \frac{(P - c \cdot S)^2}{P + (1 - c) \cdot S}$$

posto $I_a = c \cdot S$ dove c è una costante generalmente compresa tra 0.15 e 0.2. Il valore di S è espresso in funzione del parametro adimensionale *CN* il cui valore è tabellato in funzione della tipologia ed

uso del suolo e si riferisce ad una condizione media di umidità nel terreno all'inizio della precipitazione (Antecedent Moisture Condition: AMC-II):

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \text{ con } S[\text{mm}]$$

Il valore del CN teoricamente può variare tra 0 (per S tendente ad infinito ovvero assenza di deflusso superficiale) e 100 (per S pari a zero ovvero assenza di perdite per infiltrazione).

Nel caso specifico del bacino del Roia, il valore del CN è stato parametrizzato utilizzando le informazioni relative all'uso del suolo nonché le informazioni relative alla permeabilità del suolo già utilizzate nel progetto Eurobassin. In particolare le 26 classi di copertura del suolo definite dal progetto CORINE Land Cover, integrate con le informazioni di uso del suolo contenute nel database cartografico della Regione Liguria (aggiornato al 2015) limitatamente alla porzione di territorio italiano del bacino, sono state allineate con le classi di uso del suolo proposte dal Dipartimento dell'agricoltura degli Stati Uniti d'America (USDA). Inoltre sono state definite 7 tipologie di suolo in accordo con le classi di permeabilità definite per l'intero bacino del Roia di cui 4 corrispondono alle classi di suolo standard proposte dall'USDA (denominate A, B, C e D) mentre le altre 3 classi costituiscono le classi intermedie di tipologia di suolo già utilizzate nel progetto Eurobassin (denominate A-B, B-C e C-D).

Sulla base dei criteri di parametrizzazione precedentemente descritti, è stata determinata la matrice del parametro CN valida per l'intero bacino del Roia con una risoluzione a maglia quadrata di 100 m.

Tabella 6: Parametrizzazione del valore del Curve Number, CN, definita per il bacino del Roia.

Classe di uso del suolo			Classe di tipologia di suolo						
Rif.	Descrizione delle classi di uso del suolo in accordo con USDA ed integrate con classi CORINE	CodeCorine	A	A-B	B	B-C	C	C-D	D
			1	2	3	4	5	6	7
1	Zone residenziali, percentuale media impermeabilizzazione 65%	111	77	81	85	87.5	90	91	92
2	Zone residenziali, percentuale media impermeabilizzazione 25%	112	54	62	70	75	80	82.5	85
3	Zone residenziali, percentuale media impermeabilizzazione 12%	113	46	55.5	65	71	77	79.5	82
4	Zona industriali e commerciali area impermeabile >85%	121	89	90.5	92	93	94	94.5	95
5	Parcheggi, tetti, autostrade	122	98	98	98	98	98	98	98
6	Zona industriale area impermeabile >72%	131	81	84.5	88	89.5	91	92	93
7	Spazi aperti con manto erboso >75%	141	39	50	61	67.5	74	77	80
8	Spazi aperti con manto erboso inferiore al 50%	142	68	73.5	79	82.5	86	87.5	89
9	Coltivazioni in presenza di pratiche conservazione suolo	211	62	66.5	71	74.5	78	79.5	81
10	Coltivazioni in presenza di pratiche conservazione suolo	221	62	66.5	71	74.5	78	79.5	81
11	Coltivazioni in presenza di pratiche conservazione suolo	223	62	66.5	71	74.5	78	79.5	81
12	Coltivazioni in assenza di pratiche conservazione suolo	242	72	76.5	81	84.5	88	89.5	91
13	Coltivazioni in presenza di pratiche conservazione suolo	243	62	66.5	71	74.5	78	79.5	81
14	Coltivazioni in presenza di pratiche conservazione suolo	245	62	66.5	71	74.5	78	79.5	81
15	Boschi copertura fitta e sottobosco	311	25	40	55	62.5	70	73.5	77
16	Boschi copertura fitta e sottobosco	312	25	40	55	62.5	70	73.5	77
17	Boschi copertura rada e senza sottobosco	313	45	55.5	66	71.5	77	80	83
18	Spazi aperti con manto erboso tra 50%-75%	314	49	59	69	74	79	81.5	84
19	Terreno da pascolo buone condizioni	321	39	50	61	67.5	74	77	80
20	Boschi copertura rada e senza sottobosco	322	45	55.5	66	71.5	77	80	83
21	Boschi copertura rada e senza sottobosco	323	45	55.5	66	71.5	77	80	83
22	Boschi copertura rada e senza sottobosco	324	45	55.5	66	71.5	77	80	83
23	Spiagge, Dune, Sabbie	331	35	40	45	50	55	60	65
24	Rocce Nude	332	81	84.5	88	89.5	91	92	93
25	Boschi copertura rada e senza sottobosco	333	45	55.5	66	71.5	77	80	83
26	Bacini d'Acqua	512	50	50	50	50	50	50	50

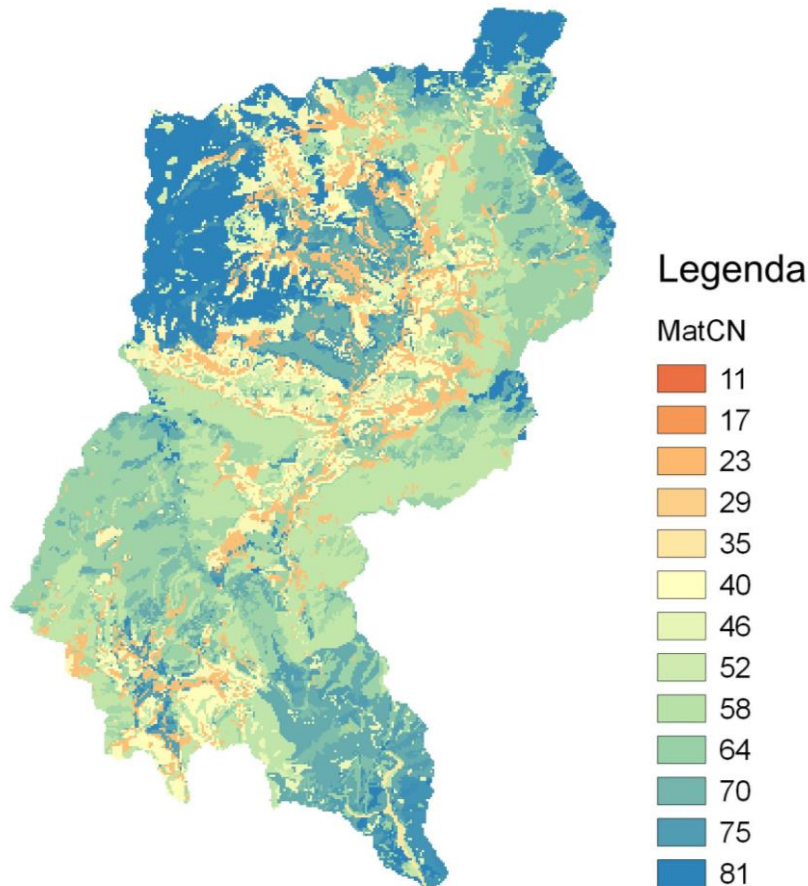


Figura 13: Schematizzazione del parametro CN valida per il bacino del Roia.

2.3 Il modello di trasformazione afflussi-deflussi

La risposta idrologica dei 116 sottobacini individuati nel bacino del Roia è stata rappresentata riferendosi ad un modello idrologico concentrato tipicamente utilizzato nella modellazione idrologica di piena: l'idrogramma unitario istantaneo – IUH (Instantaneous Unit Hydrograph). Tale modello si basa su tre ipotesi fondamentali: risposta del sistema (bacino) di tipo concentrato, lineare e tempo invariante. La più comune espressione analitica dell'IUH è costituita formalmente dalla funzione densità di probabilità di una variabile casuale t (tempo) distribuita secondo la distribuzione Gamma a due parametri n e k (Nash, 1957):

$$h(t) = \frac{1}{k \cdot \Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{(-t/k)}$$

dove $h(t)$ è la funzione di risposta impulsiva IUH [T^{-1}], n è un parametro di forma pari all'inverso del momento di secondo ordine (momento d'inerzia) dell'IUH [-], k è un parametro di scala pari al momento del primo ordine (baricentro) dell'IUH [T] e $\Gamma(\cdot)$ è la funzione Gamma.

Nel caso di bacini idrografici strumentati, ovvero nel caso in cui siano disponibili misure di precipitazione e di portata, la determinazione dei parametri n e k rappresentativi della risposta idrologica del sistema può essere effettuata attraverso una opportuna procedura di calibrazione/validazione del modello. Nel caso di bacini idrografici non strumentati, rappresentativo dei 116 sottobacini del Roia, la risposta idrologica del bacino viene tipicamente rappresentata attraverso la determinazione dell'idrogramma istantaneo unitario geomorfologico (GIUH) che descrive la risposta impulsiva di un bacino in funzione delle caratteristiche geomorfologiche del bacino espresse in termini di parametri di Horton (Rodriguez-Iturbe a Valdes, 1979). Tale

schematizzazione si basa sull'assunzione che il tempo t che una goccia caduta sulla superficie del bacino impiega a raggiungere una data sezione di chiusura sia una variabile casuale distribuita secondo una distribuzione di tipo esponenziale, assumendo di descrivere la rete idrografica attraverso i parametri di Horton (1945) calcolati secondo la descrizione gerarchica di Strahler (1952).

Sulla base degli studi condotti da Rosso (1984) è stata dimostrata la possibilità di esprimere i parametri n e k del modello dell'idrogramma istantaneo unitario di Nash in funzione delle caratteristiche geomorfologiche del bacino parametrizzate secondo le leggi di Horton. In questo modo è possibile utilizzare il modello di Nash per rappresentare la risposta idrologica di un bacino non strumentato determinando i parametri del modello a partire dalle caratteristiche geomorfologiche del bacino stesso.

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi relativo a ciascun sottobacino è stato pertanto determinato applicando la seguente procedura: determinazione della precipitazione efficace affluente al sottobacino attraverso il metodo del SCS-CN proposto dal Soil Conservation Service e rappresentazione la risposta idrologica del bacino attraverso il modello di Nash dove i parametri n e k sono stati determinati sulla base delle caratteristiche geomorfologiche di ciascun sottobacino in esame.

2.4 Il modello di convoluzione lungo l'asta

Per la convoluzione lungo i tratti del reticolo idrografico, il modello idrologico fa riferimento allo schema numerico proposto da Muskingum – Cunge (Cunge, 1969).

Per la simulazione dell'evoluzione del deflusso nella rete idrografica (propagazione lungo l'asta), il modello idrologico utilizzato (Muskingum - Cunge) fa riferimento alle seguenti semplificazioni rispetto alla soluzione completa dell'equazione del moto:

- il volume invasato in un dato tronco sia proporzionale alla media pesata delle portate entranti ed uscenti.

La portata per una data sezione e per un dato istante temporale viene calcolata mediante l'equazione seguente

$$q_{i+1,m+1} = C_1 q_{i,m+1} + C_2 q_{i,m} + C_3 q_{i+1,m}$$

Dove il pedice, i , indica la sezione sul reticolo, mentre il pedice, m , l'istante temporale e dove le tre costanti C_1 , C_2 e C_3 sono valutate come segue:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2kx}{2k(1-x) + \Delta t}$$
$$C_2 = \frac{\Delta t + 2kx}{2k(1-x) + \Delta t}$$
$$C_3 = \frac{-\Delta t + 2k(1-x)}{2k(1-x) + \Delta t}$$

dove l'intervallo di integrazione Δt è stato assunto pari a 30 secondi mentre il coefficiente di attenuazione x è assunto nell'intorno di 0.2, infatti il coefficiente di attenuazione assunto in prima ipotesi pari a 0.2 è stato localmente modificato (+/- 0.1) per garantire valori positivi di tutti i coefficienti. Il parametro k è definito come rapporto tra la lunghezza del tratto in esame Δx e la velocità di propagazione media lungo l'asta, ω ; quest'ultima è stata assunta pari a 3 m/s a seguito della taratura del modello idrologico.

Infine si noti che nello schema di calcolo si è fatto riferimento a tronchi di lunghezza Δx variabile; tale lunghezza viene determinata dalla distanza tra due successive confluenze, in generale per i diversi

tratti, tale valore è risultato compreso tra il valore minimo di 100 m (corrispondente alla maglia di riferimento) ed un valore massimo di circa 500 m.

2.5 La simulazione di eventi meteorici storici registrati dalla rete pluvio-idrometrica

Al fine di verificare l'affidabilità nel modello con particolare riferimento al bilancio dei volumi e la stima delle portate di picco sono stati presi in considerazione eventi intensi osservati dalla rete pluvio-idrometrica del bacino del Roia. È stato quindi necessario acquisire osservazioni di precipitazione e portata con una risoluzione temporale oraria.

Tenuto conto delle osservazioni pluviometriche ed idrometriche disponibili in territorio italiano, sono stati selezionati gli eventi intensi da utilizzare nella fase di verifica del modello idrologico del bacino Roia. In particolare si è preso come riferimento la stazione pluviometrica di Airole per la quale si disponevano di registrazioni continue di precipitazione e livello idrometrico e sono stati utilizzati i seguenti criteri per individuare gli eventi estremi d'interesse:

- il 2013 è stato definito quale anno iniziale di riferimento per la selezione degli eventi in quanto corrisponde al periodo a partire dal quale sono disponibili misure di portata per le stazioni italiane;
- eventi pluviometrici caratterizzati da valori di altezza di pioggia giornaliera superiore a 50 mm osservati contemporaneamente in almeno due stazioni site in territorio italiano;
- individuazione del giorno di pioggia massima e dei due giorni adiacenti.

A seguito di tale analisi sono stati individuati 6 periodi di interesse (eventi pluviometrici) ed in corrispondenza di tali periodi sono stati acquisiti i dati osservati nelle stazioni di misura sul territorio francese.

Per la simulazione della risposta idrologica del bacino del Roia a seguito di un evento meteorico osservato è in primo luogo necessario valutare la precipitazione media areale a partire dall'informazione locale disponibile in corrispondenza dei diversi pluviometri. Tale valutazione è stata condotta utilizzando il metodo dei poligoni di Thiessen in funzione delle 6 stazioni pluviometriche presenti nel bacino. La Figura 14 riporta i poligoni di Thiessen valutati il bacino del Roia. Come si evince dalla rappresentazione delle aree di influenza illustrate in Figura 14, è importante sottolineare che si dispone di un numero limitato di stazioni in funzione dell'area totale del bacino ed inoltre la distribuzione spaziale di tali stazioni è fortemente disomogenea ed in particolare più di un terzo dell'intera superficie del bacino fa riferimento alla sola stazione di Tende – San Dalmazzo. Si evince chiaramente che l'informazione pluviometrica è fortemente carente ai fini della simulazione di un evento osservato, è pertanto possibile che tale carenza infici la valutazione della risposta idrologica a scala di bacino indipendentemente dalla bontà del modello idrologico.

Sulla base delle considerazioni precedenti, prima di condurre la simulazione degli eventi osservati, si è valutata la qualità e coerenza dei dati pluvio-idrometrici disponibili sul bacino del Roia, nello specifico è stato valutato il coefficiente di deflusso in corrispondenza delle sezioni in cui si disponeva di corrispondenti misurazioni di portata. Da tale analisi è emerso che nonostante si trattasse di eventi pluviometrici particolarmente intensi (caratterizzati da altezza di pioggia totale generalmente superiore a 200 mm) i corrispondenti coefficienti di deflusso determinanti sulla base dei dati osservati risultavano compresi tra 0.15 e 0.35 per 4 su 6 degli eventi selezionati e di conseguenza molto inferiori ai valori attesi per questa tipologia di eventi. Come precedentemente illustrato tali risultati sono

imputabili alla limitata disponibilità di stazioni pluviometriche per la porzione di bacino in territorio francese; inoltre è necessario osservare che alcuni degli eventi osservati ricadono nel periodo invernale e pertanto potrebbero essere stati caratterizzati dall'occorrenza di precipitazione solida nella parte montana del bacino, componente in termini di afflusso che non contribuisce alla formazione del deflusso superficiale a seguito dell'evento meteorico. A causa delle tempistiche imposte dal progetto e al tempo stesso a causa della difficoltà di reperire osservazioni pluviometriche in territorio francese, non è stato possibile implementare il numero degli eventi selezionati e la verifica del modello è stata effettuata solamente per due eventi pluviometrici osservati.

A titolo di esempio, in Figura 15 e 16 si riportano i risultati delle simulazioni del modello in corrispondenza degli eventi osservati a Novembre 2014 ed il confronto con i dati osservati alle sezioni di chiusura di San Dalmazzo di Tende ed Airole. Si può osservare come il modello riproduca correttamente sia i valori di picco di portata che le curve di esaurimento dell'idrogramma.

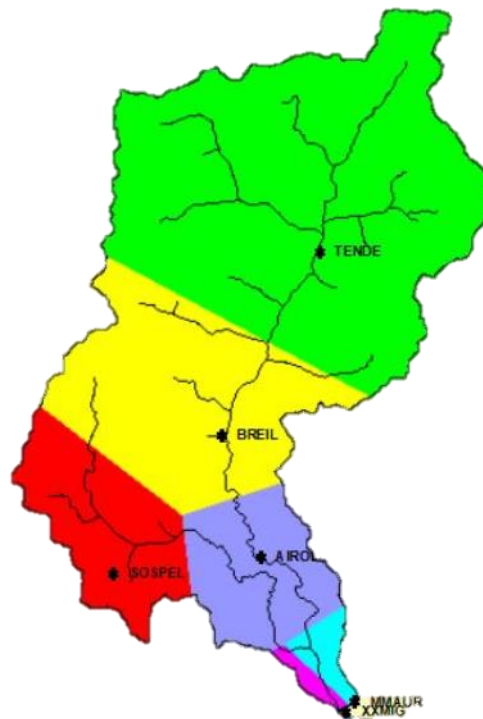


Figura 14: Determinazione dei poligoni di Thiessen per il bacino del Roia.

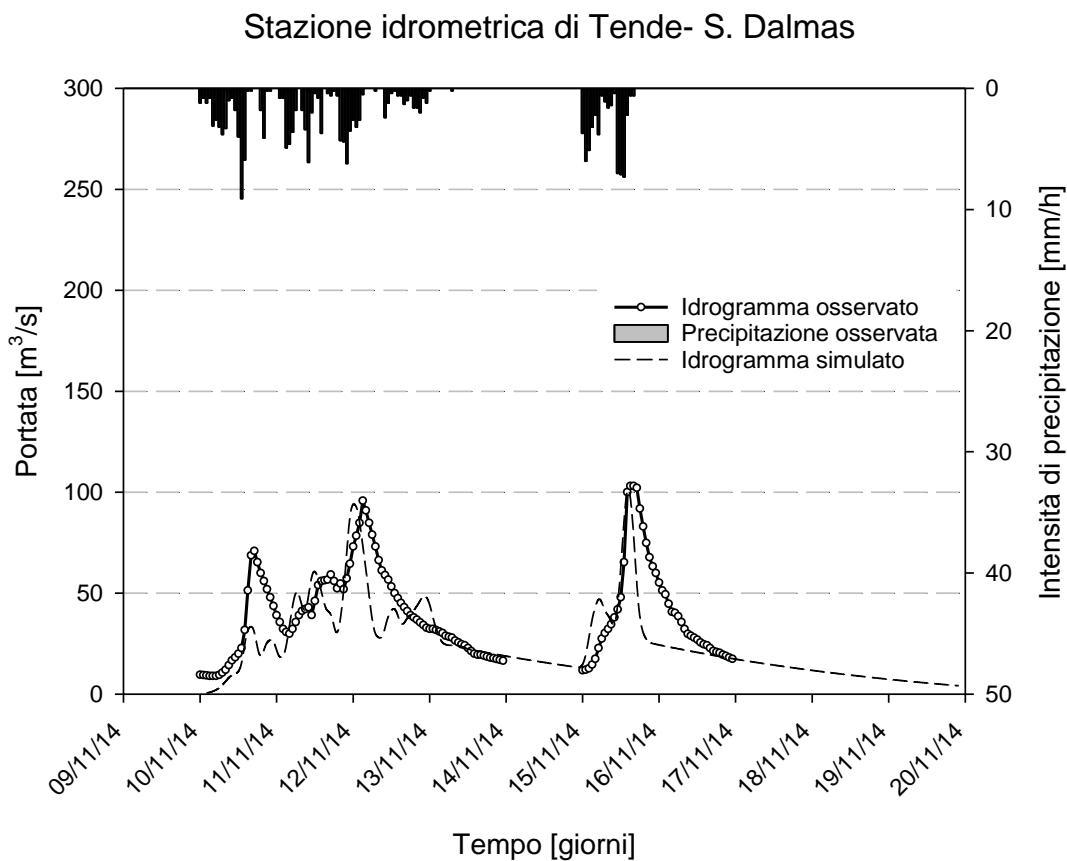


Figura 15: Confronto tra gli idrogrammi di piena simulati ed osservati presso a stazione idrometrica di Tende – San Dalmazzo.

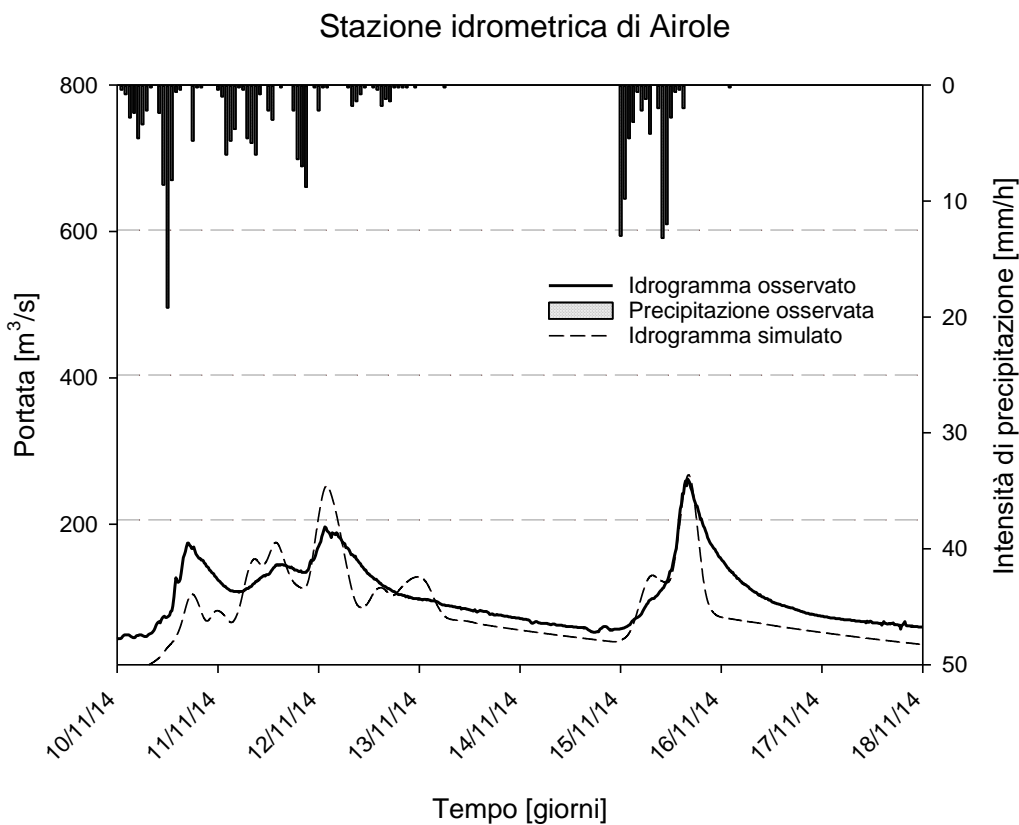


Figura 16: Confronto tra gli idrogrammi di piena simulati ed osservati presso a stazione idrometrica di Airole.

3 VALUTAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DI ASSEGNATO PERIODO DI RITORNO

3.1 Valutazione delle portate di piena

Per la valutazione delle portate al colmo di piena, per ciascun periodo di ritorno, sono stati utilizzati in ingresso al modello idrologico gli eventi sintetici (ietogramma rettangolare) valutati a partire dalla linea segnalatrice di possibilità pluviometrica valutata a scala di bacino. Per via dell'indeterminatezza della durata dello scroscio critico, la simulazione viene condotta per diverse durate dell'evento sintetico variabile tra 1 e 20 ore.

Per tutti gli eventi sintetici è stato determinato il valore di portata di picco (massimo valore) per ciascuna sezione oggetto di indagine.

$$q_{p,T} = \max_t (q(t; d; T))$$

Ripetendo l'operazione per tutte le durate e risolvendo il problema di ottimo, si determina l'evento critico ossia la piena che produce la massima portata al colmo (portata al colmo di piena) che si realizza per la particolare pioggia di durata critica.

$$d_{CR}: \max_d \{ \max_t (q(t; d; T)) \}$$
$$q_T = \max_t (q(t; d_{CR}; T))$$

La valutazione delle portate al colmo di piena di assegnato periodo di ritorno è stata effettuata complessivamente per 8 differenti periodi di ritorno, in particolare per T pari a 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 anni. La determinazione dei differenti quantili di portata al colmo è stata effettuata per 9 sezioni del bacino del Roia di cui 6 in territorio italiano e le restanti 3 in territorio francese. La scelta delle sezioni significative è stata effettuata con il seguente criterio: innanzitutto sono state selezionate le 5 sezioni dotate di stazione idrometrica (Roia a St. Dalmas, Roia a Breil e Bevera a Sospel sul territorio francese mentre sul territorio italiano Roia ad Airole e Bevera a Torri) e successivamente sono state scelte le 4 sezioni a monte a e valle delle confluenze principali, ovvero le sezioni del Bevera e del Roia a monte della confluenza del Bevera e la sezione del Roia a valle della confluenza con il Bevera ed infine la sezione terminale dell'intero bacino del Roia.

I quantili delle portate ottenuti nel presente studio sono stati confrontati con i risultati riportati nella relazione tecnica del Piano di Bacino dell'Ambito n° 1 "Roia" (vedi Tabella 8), nonché con quelli riportati da studi precedenti. Nello specifico si fa riferimento ai valori riportati nelle relazioni tecniche del progetto Eurobassin (vedi Tabella 9) per le sezioni in territorio italiano.

Legenda

- ▲ Sezioni fluviali investigate
- Limite bacino
- Reticolo idrografico

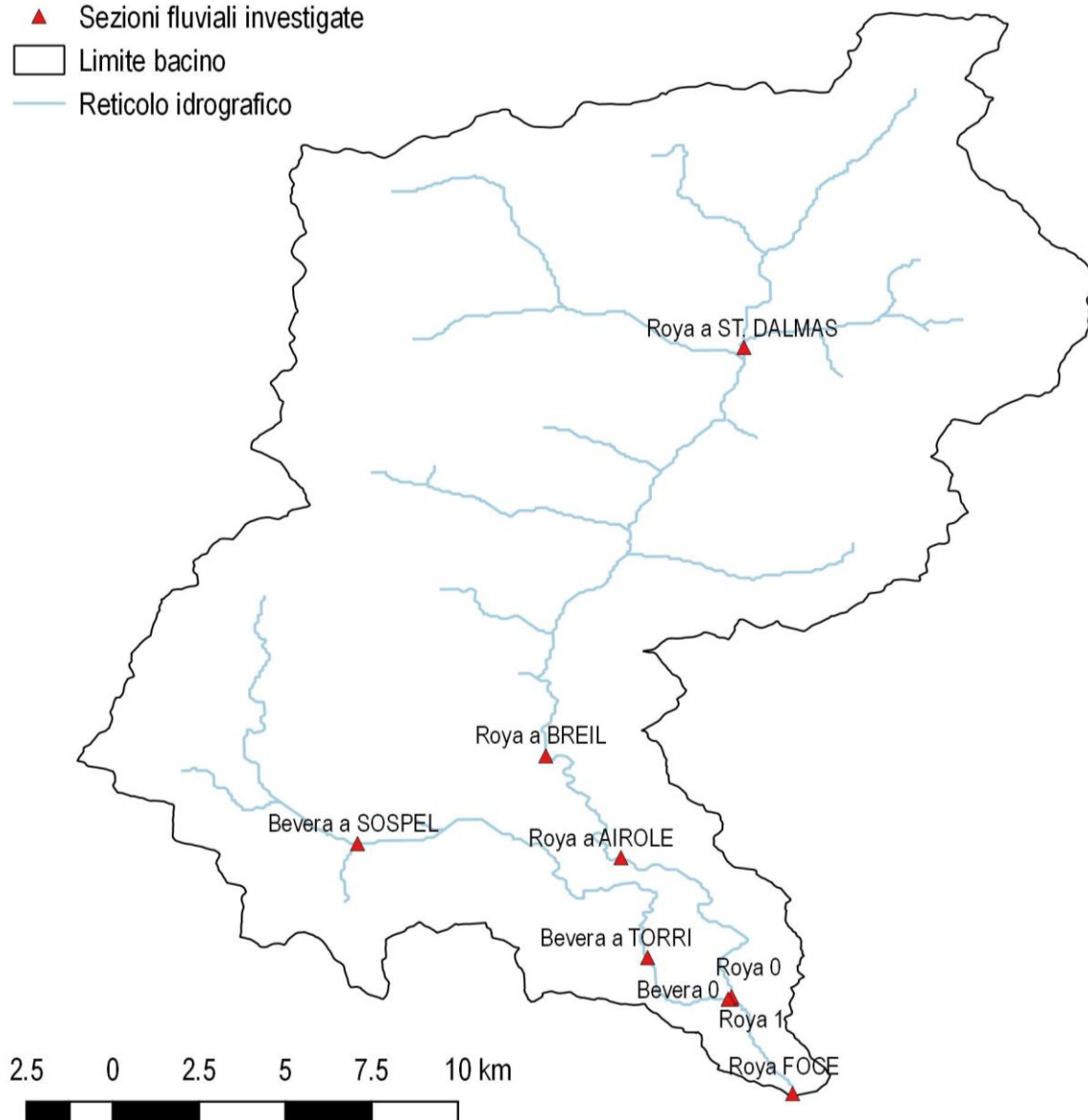


Figura 17: Localizzazione delle sezioni oggetto di indagine per il bacino del Roia.

Tabella 7: Quantili di portata al colmo per le sezioni del bacino del Roia oggetto di indagine.

Area [km ²]	671	661	503	481	461	167	159	149	79
T [anni]	<i>Q_Roya_Foce</i>	<i>Q_Roya_1</i>	<i>Q_Roya_0</i>	<i>Q_Roya_Airole</i>	<i>Q_Roya_Breil</i>	<i>Q_Roya_StDalmas</i>	<i>Q_Bevera_0</i>	<i>Q_Bevera_Torri</i>	<i>Q_Bevera_Sospel</i>
2	334	332	251	246	242	95	81	76	44
5	586	582	443	440	435	174	144	136	80
10	791	787	606	602	597	241	197	186	111
20	1017	1012	787	784	778	318	256	242	147
50	1355	1352	1062	1058	1052	434	344	327	200
100	1645	1645	1295	1292	1287	536	419	400	247
200	1974	1973	1556	1553	1547	646	502	480	298
500	2447	2447	1935	1931	1923	811	624	598	375

Tabella 8: Quantili di portata al colmo estratta dal piano di bacino del fiume Roia.

Area (km ²)	672	660	485	470	155
T [anni]	Q_Roya_Foce	Q_Roya_ValleBevera	Q_Roya_MonteBevera	Q_Roya_Airole	Q_Bevera_Torri
50	1150	1140	920	900	579
200	1700	1680	1350	1320	836
500	2000	1970	1600	1560	1006

Tabella 9: Quantili di portata al colmo estratta dallo studio Gradex riportato nel progetto Eurobassin.

Area (km ²)	672	507	461	168	155
T [anni]	Q_Roya_Foce	Q_Roya_MonteBevera	Q_Roya_Breil	Q_Roya_St-Dalmas	Q_Bevera_Torri
50	1668	1170	1094	438	573
200	2300	1668	1570	611	772
500	2714	1996	1882	724	902

Per quanto riguarda la sezione di chiusura del Roia, si può osservare che i risultati del presente studio rivelano valori intermedi rispetto a quelli riportati in Tabella 8 e 9, in particolare risultano più severi rispetto ai valori riportati nel Piano di Bacino e viceversa risultano inferiori a quanto riportato nel progetto Eurobassin. A titolo di esempio, facendo riferimento ai quantili di portata al colmo rispettivamente di T=200 anni e T = 500 anni ottenuti nell'ambito del presente studio, si osserva che i valori riportati nel Piano di Bacino sono inferiori del 14% per T=200 anni e del 18% per T = 500, mentre i valori riportati nel progetto Eurobassin sono più elevati rispettivamente del 17% e dell'11%. Comportamento differente si osserva nel caso del sottobacino del Bevera, caso in cui i risultati del presente studio presentano valori dei quantili notevolmente inferiori a quanto riportato sia nel Piano di Bacino sia nel progetto Eurobassin. Relativamente al sottobacino del Bevera, si noti innanzitutto che i valori dei quantili riportati nel progetto Eurobassin risultano sempre superiori a quanto riportato nel presente studio; tale differenza è imputabile alla tipologia di schematizzazione del modello Gradex (a cui si fa riferimento nel progetto Eurobassin) che risulta di tipo concentrato ed implementato alla scala giornaliera. Per quanto concerne i valori dei quantili riportati nel Piano di Bacino si osserva invece un differente comportamento se si fa riferimento all'intero bacino del Roia (dove si registrano valori inferiori) ovvero se si fa riferimento al sottobacino del Bevera dove al contrario si registrano valori decisamente superiori rispetto ai risultati del presente studio. Tale differenza è imputabile nuovamente al modello idrologico utilizzato per la determinazione dei quantili di portata al colmo nel Piano di Bacino. Nello specifico, per il sottobacino del Bevera si è fatto riferimento alla curva di crescita regionale dei quantili di portata riportata nello studio CIMA - "Caratterizzazione delle precipitazioni intense e delle portate di piena per i bacini liguri" (Luglio 1999) ai fini della determinazione del fattore di crescita mentre per la valutazione della portata indice è stata utilizzata la serie di 17 anni di misurazioni dedotte dagli "Annali Idrologici" per la stazione di Ciaira e Torri. Tenuto conto della limitatezza della serie storica nonché del periodo di osservazione (compreso tra il 1937 ed il 1975) è stato utilizzato un fattore moltiplicativo di sicurezza pari a 2.31. Nel caso del sottobacino del Bevera non è stata condotta pertanto nessuna modellazione idrologica di dettaglio a differenza di quanto effettuato nel presente studio in cui il comportamento idrologico del Bacino del Roia è stato simulato con un'elevata risoluzione spazio-temporale come descritto nei paragrafi precedenti.

3.2 Valutazione degli idrogrammi di piena

Per la valutazione degli idrogrammi di piena si è fatto riferimento alla simulazione di idrogrammi equivalenti nell'ipotesi di criticità idrologica in base alla quale gli eventi di interesse sono prodotti da un assetto meteorologico caratterizzato dall'invarianza di scala rappresentata dall'esponente

caratteristico, n . L'idrogramma equivalente risultante dalla simulazione dell'evento sintetico di durata d e periodo di ritorno T , è caratterizzato da una portata di piena inferiore alla q_T

I risultati delle simulazioni per le 20 durate costituiscono l'ensemble degli idrogrammi equivalenti T -ennali. La sequenza di idrogrammi di piena con portata al colmo inferiore a quella di riferimento ma con volumi di piena più cospicui risulta necessaria ai fini della valutazione delle aree potenzialmente soggette ad esondazione.

Gli idrogrammi di piena sono stati valutati per le 9 sezioni oggetto di indagine limitatamente ai periodi di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni.

A titolo di esempio sono riportati gli idrogrammi di piena valutati per la sezione di chiusura del bacino del Roia per i seguenti periodi di ritorno: 50, 200 e 500 anni.

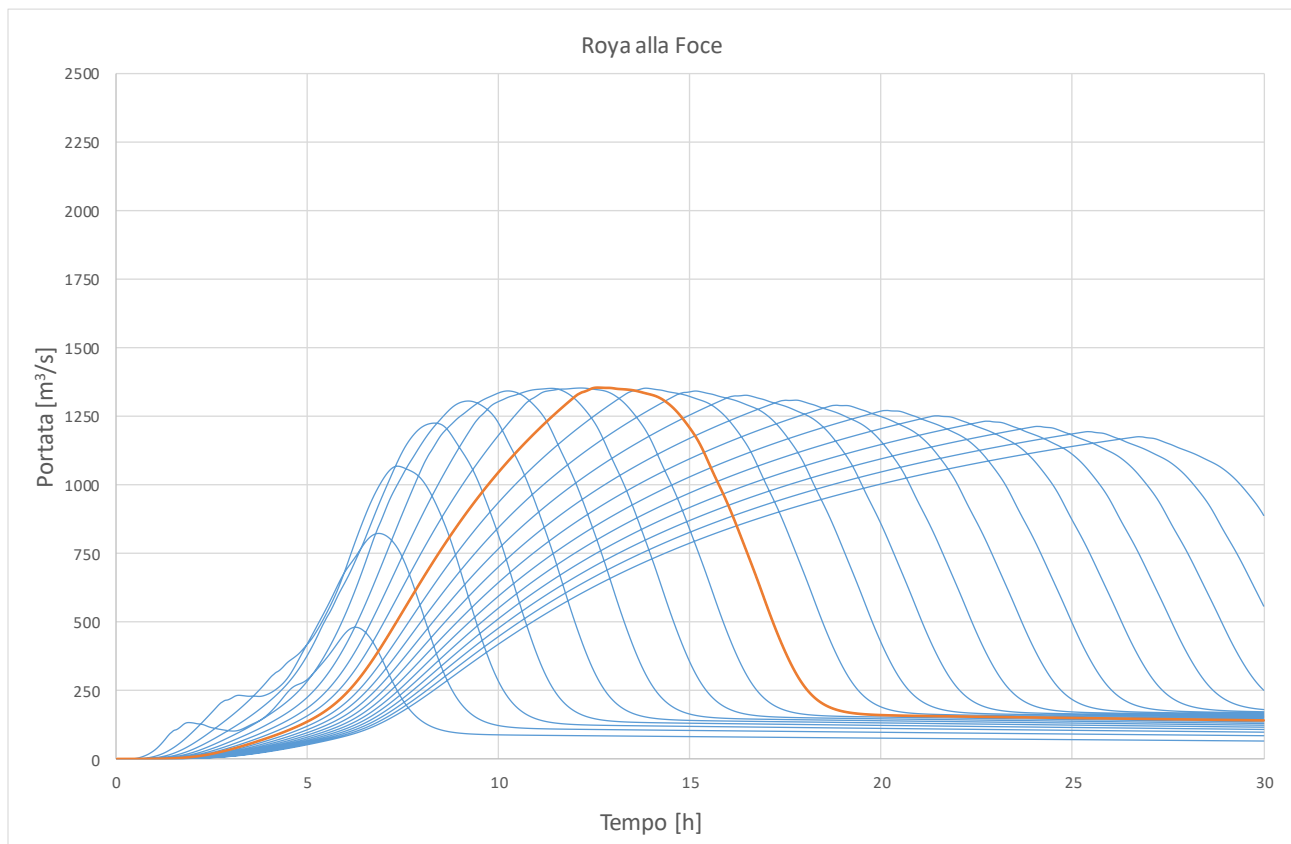


Figura 18: Sequenza degli idrogrammi di piena valutati alla sezione terminale del bacino del Roia corrispondenti ad un tempo di ritorno $T = 50$ anni. L'idrogramma indicato in arancione corrisponde all'evento che produce il valore massimo della portata al colmo.

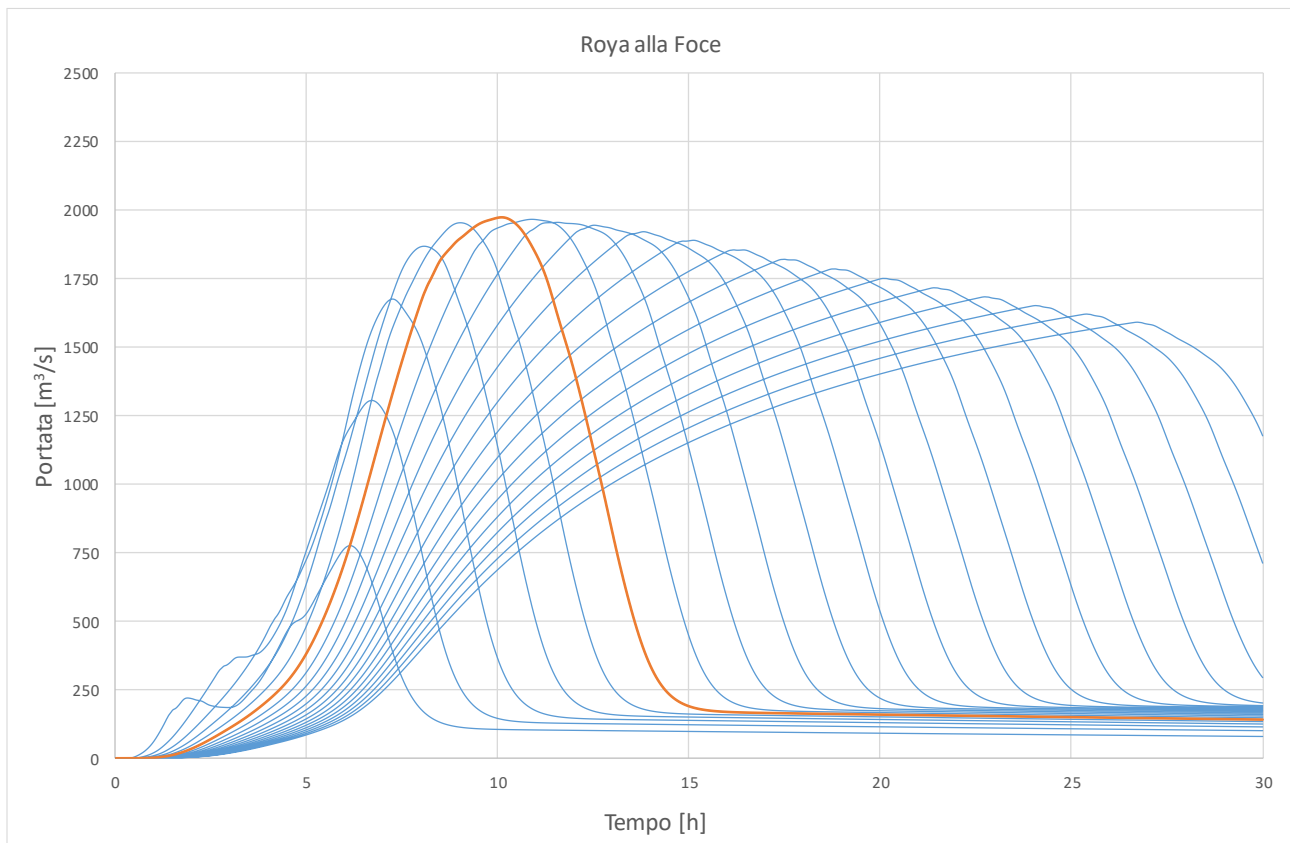


Figura 19: Sequenza degli idrogrammi di piena valutati alla sezione terminale del bacino del Roia corrispondenti ad un tempo di ritorno $T = 200$ anni. L'idrogramma indicato in arancione corrisponde all'evento che produce il valore massimo della portata al colmo.

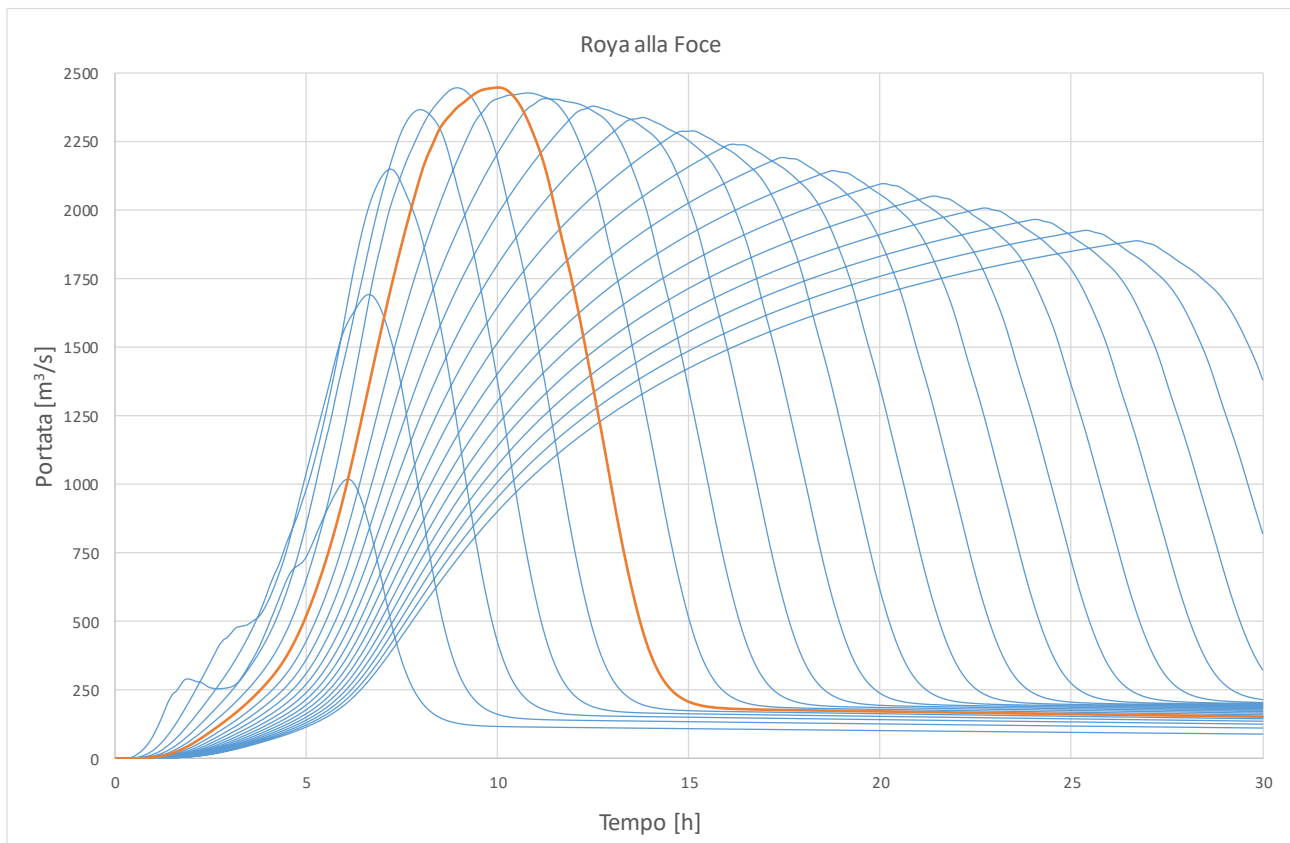


Figura 20: Sequenza degli idrogrammi di piena valutati alla sezione terminale del bacino del Roia corrispondenti ad un tempo di ritorno $T = 500$ anni. L'idrogramma indicato in arancione corrisponde all'evento che produce il valore massimo della portata al colmo.

In riferimento alla metodologia proposta nelle linee guida regionale (DGR Regione Liguria 359/2008), nota la soglia di esondazione q_0 (assunta per semplicità costante) deve essere stimato il massimo volume di esondazione ($MaxV|q_0$) condizionato a quella soglia desunta dalle condizioni di deflusso in quella specifica sezione d'alveo.

A titolo di esempio si riporta graficamente per la sezione terminale del bacino del Roia la stima del massimo volume di esondazione (in grigio) per l'evento con periodo di ritorno $T=200$ anni ed una soglia fissa di esondazione pari a $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Si noti che il volume di esondazione relativo all'idrogramma che produce il valore massimo della portata al colmo (in arancione) risulta significativamente inferiore al massimo volume di esondazione.

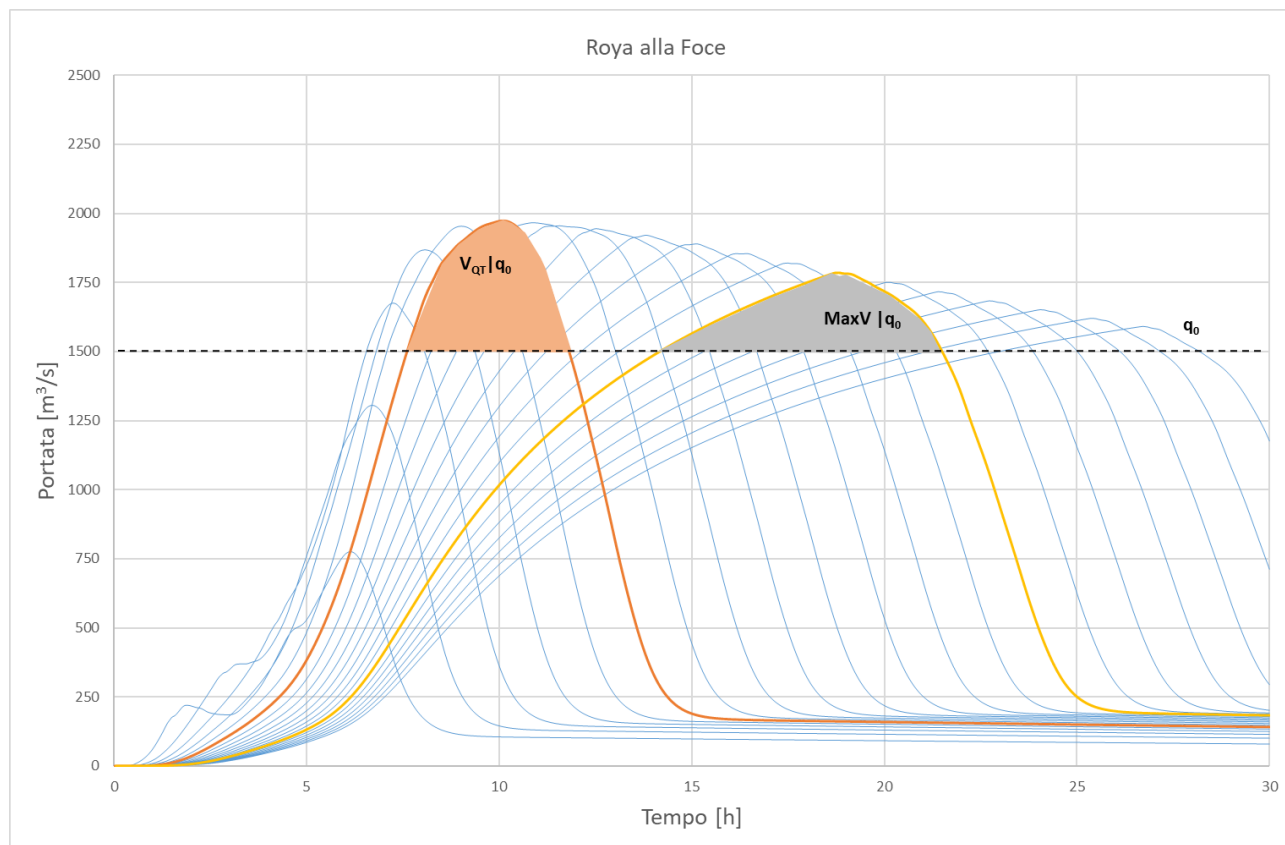


Figura 21: Sequenza degli idrogrammi di piena valutati alla sezione terminale del bacino del Roia corrispondenti ad un tempo di ritorno $T = 200$ anni, soglia di esondazione costante q_0 ed indicazione del volume di esondazione relativo all'idrogramma che produce il valore massimo della portata al colmo (area in arancione), $V_{QT}|q_0$, nonché del massimo volume di esondazione (area in grigio), $MaxV|q_0$.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

DGR Regione Liguria (2008). Criteri di verifica e valutazione delle portate al colmo e degli idrogrammi di piena nei bacini idrografici liguri. Parte I: Linee Guida, 58 pp; Parte II: Allegato Tecnico, 110 pp; Parte III: Schede di Valutazione, 88 pp; DGR Regione Liguria 359/2008.

Horton, R.E., (1945). Erosional development of stream and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 56, 275-370.

Hosking, J.R.M. & Wallis, J R. Parameter and Quantile Estimation for the Generalized Pareto Distribution, *Technometrics*, 1987, 29, 339–349 .

Liggett, J.A., Cunge J.A., (1975). Numerical methods of solution of the unsteady flow equations. In *Unsteady flow in open channels*, by K. Mahmood and V. Yevjevich, Vol.I, Chapter 4, Water Resource Publications, Ft. Collins, CO.

Nash, J.E., (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph. IAHS, AISH Publications, 42, 114-118.

DGR Regione Liguria (2008). Criteri di verifica e valutazione delle portate al colmo e degli idrogrammi di piena nei bacini idrografici liguri. Parte I: Linee Guida, 58 pp; Parte II: Allegato Tecnico, 110 pp; Parte III: Schede di Valutazione, 88 pp; DGR Regione Liguria 359/2008.

Rodriguez-Iturbe, I., Valdes, J.B., (1979). The geomorphologic structure of the hydrologic response. *Water Resour. Res.*, 15 (6), 1409-1420.

Rosso, R., (1984). Nash model relation to Horton Order Ratios. *Water Resour. Res.*, 20 (7), 914-920.

SCS – Soil Conservation Service, (1985). *National Engineering Handbook*, Section 4 – Hydrology, Littleton, Colorado, Water Resources Publications.

Strahler, A.N., (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 63, 1117-1142.

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1: Localizzazione delle stazioni pluviometriche del bacino del Roia.	5
Figura 2: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata a Ventimiglia (IT).	8
Figura 3: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata a Calvo (IT).	8
Figura 4: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata ad Airole (IT).	9
Figura 5: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata a Breil (FR).	9
Figura 6: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata a St. Dalmas – Tende (FR).	10
Figura 7: Curva di crescita GEV a scala locale valutata per la stazione pluviometrica situata a Sospel (FR).	10
Figura 8: Curva di crescita GEV a scala del bacino del Roia.	12
Figura 9: Confronto tra la GEV valutata a scala del bacino del Roia con le corrispondenti fasce di confidenza e la GEV valutata a scala locale per la stazione pluviometrica di Airole. Si noti che le fasce di confidenza sono state valutate attraverso un modello di generazione MonteCarlo e livello di significatività α a pari a 0.1.	13
Figura 10: Confronto tra la GEV valutata a scala del bacino del Roia con le corrispondenti fasce di confidenza e la GEV valutata a scala locale per la stazione pluviometrica di Calvo. Si noti che le fasce di confidenza sono state valutate attraverso un modello di generazione MonteCarlo e livello di significatività α a pari a 0.1.	14
Figura 11: Reticolo idrografico del bacino del Roia.	16
Figura 12: Schematizzazione del bacino del Roia utilizzata nel modello idrologico con indicazione dei sottobacini di area totale compresa tra 1 e 10 km ²	17
Figura 13: Schematizzazione del parametro CN valida per il bacino del Roia.	19
Figura 14: Determinazione dei poligoni di Thiessen per il bacino del Roia.	22
Figura 15: Confronto tra gli idrogrammi di piena simulati ed osservati presso a stazione idrometrica di Tende – San Dalmazzo.	23
Figura 16: Confronto tra gli idrogrammi di piena simulati ed osservati presso a stazione idrometrica di Airole.	23
Figura 17: Localizzazione delle sezioni oggetto di indagine per il bacino del Roia.	25
Figura 18: Sequenza degli idrogrammi di piena valutati alla sezione terminale del bacino del Roia corrispondenti ad un tempo di ritorno $T = 50$ anni. L'idrogramma indicato in arancione corrisponde all'evento che produce il valore massimo della portata al colmo.	27
Figura 19: Sequenza degli idrogrammi di piena valutati alla sezione terminale del bacino del Roia corrispondenti ad un tempo di ritorno $T = 200$ anni. L'idrogramma indicato in arancione corrisponde all'evento che produce il valore massimo della portata al colmo.	28

Figura 20: Sequenza degli idrogrammi di piena valutati alla sezione terminale del bacino del Roia corrispondenti ad un tempo di ritorno $T = 500$ anni. L'idrogramma indicato in arancione corrisponde all'evento che produce il valore massimo della portata al colmo.29

Figura 21: Sequenza degli idrogrammi di piena valutati alla sezione terminale del bacino del Roia corrispondenti ad un tempo di ritorno $T = 200$ anni, soglia di esondazione costante q_0 ed indicazione del volume di esondazione relativo all'idrogramma che produce il valore massimo della portata al colmo (area in arancione), $VQTq_0$, nonché del massimo volume di esondazione (area in grigio), $MaxVq_0$30

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1: Stazioni pluviometriche situate nel bacino del Roia.....	6
Tabella 2: Caratteristiche delle serie storiche di altezze di precipitazione massime annuali di assegnata durata per le stazioni pluviometriche del bacino del Roia.	6
Tabella 3: Stima dei parametri locali ε , α e k della curva di crescita GEV per le stazioni pluviometriche del bacino del Roia.	7
Tabella 4: Parametri locali ε , α e k della curva di crescita GEV per le stazioni di Airole, Calvo e Ventimiglia riportati nell'Appendice II - Regime pluviometrico locale delle Linee Guida Regionali (DGR),.....	7
Tabella 5: Fattore di crescita a scala del bacino del Roia	15
Tabella 6: Parametrizzazione del valore del Curve Number, CN, definita per il bacino del Roia. ...	18
Tabella 7: Quantili di portata al colmo per le sezioni del bacino del Roia oggetto di indagine.	25
Tabella 8: Quantili di portata al colmo estratta dal piano di bacino del fiume Roia.	26
Tabella 9: Quantili di portata al colmo estratta dallo studio Gradex riportato nel progetto Eurobassin.	26