POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

ANALISI MODELLISTICA DELLE PIENE SU BACINI DI ALTA QUOTA DELL'ARCO ALPINO

Relatori

Prof. Pierluigi Claps

Prof. Daniele Ganora

Prof. Alberto Viglione

Candidato

Irene Monforte

Anno accademico 2019/2020

SOMMARIO

INTRODUZIONE **11**

1. COSTRUZIONE DEL DATASET DELLE PIENE DEI BACINI DELL'ARCO ALPINO **13**

1.1. BASE DATI PREESISTENTE 16

1.1.1. Austria *17*

1.1.2. Italia *20*

1.1.3. Svizzera *23*

1.2. COSTRUZIONE DELLA BASE DATI DELLE PIENE ALPINE IN FRANCIA 26

1.3. ANALISI DEI DATI DELLE MASSIME PIENE ANNUE 31

1.3.1. Relazione portate al colmo – area del bacino *32*

1.3.2. Relazione portate al colmo – quota media del bacino *34*

1.3.3. Relazione coefficiente di variazione – aree e quote dei bacini *36*

2. TREND TEMPORALI NELLE SERIE DI PORTATE DI PIENA **39**

2.1. MODELLI DI REGRESSIONE 39

2.1.1. Stimatore Theil – Sen *39*

2.1.2. Regressione sui quantili *41*

2.2. APPLICAZIONE DEI MODELLI DI TREND SU SINGOLA SERIE STORICA 46

3. ATTRIBUZIONE DEL TREND: ANALISI DI SENSITIVITÀ DEL MODELLO FLOODALP **59**

3.1. DESCRIZIONE DEL MODELLO FLOODALP 59

3.2. ANALISI DI SENSITIVITÀ GLOBALE E REGIONALE 62

3.3. OBIETTIVI DELLE ANALISI DI SENSITIVITÀ 65

3.4. SAFE TOOLBOX 66

3.4.1. Variance Based Sensitivity Analyses - VBSA *68*

3.4.2. Elementary Effect Test – EET *70*

3.5. APPLICAZIONE DEL METODO VBSA 71

3.6. ANALISI DI SENSITIVITÀ LOCALE 81

3.7. APPLICAZIONE DEL METODO EET 87

4. CLASSIFICAZIONE DEI BACINI SECONDO FLOODALP: CLUSTER ANALYSIS **95**

4.1. RAGGRUPPAMENTO MEDIANTE VALUTAZIONE VISIVA (EMPIRICA) 99

4.2. METODO K-MEANS 105

4.2.1. Cenni teorici sul metodo *105*
4.2.2. Applicazione del metodo *107*
4.3. METODO DI WARD 111
4.3.1. Cenni teorici sul metodo di aggregazione gerarchica di Ward *111*
4.3.2. Applicazione del metodo *112*
5. APPLICAZIONE DEL MODELLO FLOODALP AI BACINI DEL NORD-OVEST ITALIANO 121
5.1. DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI INPUT DEL MODELLO 121
5.2. ANALISI DEI RISULTATI 125
CONCLUSIONI 140
BIBLIOGRAFIA 142
RINGRAZIAMENTI 144
APPENDICE 145
ALLEGATI 157

ALLEGATO A: Caratteristiche geo-morfologiche e delle serie storiche dei bacini d'alta quota italiani, austriaci e svizzeri.
ALLEGATO B: Caratteristiche geo-morfologiche e delle serie storiche dei bacini d'alta quota francesi.
ALLEGATO C: Risultati dell'applicazione del test Sen's Slope a tutti i bacini dell'arco alpino
ALLEGATO D: Curve di frequenza cumulate ottenute a seguito dell'applicazione del modello FloodAlp ad un campione di bacini collocati nel Nord-Ovest Italia.
ALLEGATO E: Curve di frequenza cumulate, con ascissa adimensionale, ottenute a seguito dell'applicazione del modello FloodAlp ad un campione di bacini collocati nel Nord-Ovest Italia.
ALLEGATO F: Parametri descrittori di input del campione italiano.
ALLEGATO G: Ripartizione in cluster dei bacini appartenenti al campione italiano analizzato a seguito dell'applicazione del metodo *k-means* con centroidi definiti**.**
ALLEGATO H: Script RStudio® impiegati.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1: Modello Digitale del Terreno (DTM) (risoluzione spaziale 20 m) dell'area alpina studiata (Sources: ESRI, OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community)..... 14

Figura 1.2: Numero di osservazioni delle portate al colmo di piena in funzione degli anni (Austria)..... 17

Figura 1.3: Rappresentazione spaziale delle coordinate geografiche delle stazioni di chiusura relative al campione di 119 bacini austriaci. 18

Figura 1.4 a: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell'area (AT). 19

Figura 1.5: Numero di osservazioni delle portate al colmo di piena in funzione degli anni (Italia). 20

Figura 1.6: Rappresentazione spaziale delle coordinate geografiche delle stazioni di chiusura relative al campione di 140 bacini italiani..... 21

Figura 1.7 a: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell' area (ITA). 22

Figura 1.8: Numero di osservazioni delle portate al colmo di piena in funzione degli anni (Svizzera). 23

Figura 1.9: Rappresentazione spaziale delle coordinate geografiche delle stazioni di chiusura relative al campione di 117 bacini svizzeri. 24

Figura 1.10 a: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell' area (CH)..... 25

Figura 1.11: Barra di ricerca per la selezione delle stazioni idrometriche dalla banca dati HYDRO. 28

Figura 1.12: Numero di osservazioni delle portate al colmo di piena in funzione degli anni (Francia). 29

Figura 1.13: Rappresentazione spaziale delle coordinate geografiche delle stazioni di chiusura relative al campione di 52 bacini francesi.. 30

Figura 1.14 a: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell' area (FR). 31

Figura 1.15 a: Relazione tra portata media al colmo e area dei bacini riportata in grafico (bi)logaritmico (AT). 33

Figura 1.16 a: Relazione tra portata specifica media al colmo e quota media dei bacini (AT). 35

Figura 1.17: Relazione tra il coefficiente di variazione e l'area del bacino per l'Austria (in grigio), l'Italia (in arancione), la Svizzera (in blu) e la Francia (in Verde). 37

Figura 1.18 a: Relazione tra il coefficiente di variazione e la quota media del bacino (AT). 38

Figura 2.1: Funzione di controllo rappresentativa di piccoli quantili (inferiori alla mediana, quantile 0.5). 43

Figura 2.2: Funzione di controllo rappresentativa di grandi quantili (superiori alla mediana, quantile 0.5). 43

Figura 2.3: Rappresentazione su mappa dei risultati relativi alla presenza di trend ottenuti calcolando lo stimatore Theil - Sen e valutandone la significatività con il test di Mann-Kendall. 48

Figura 2.4: Rappresentazione su mappa dei bacini che mostrano trend temporali analoghi. 49

Figura 2.5: Trend relativi alle portate medie sull'arco alpino (intervallo temporale: 1951-2007). Il colore blu indica andamenti crescenti, il rosso andamenti decrescenti. I riquadri sui toni del nero rappresentano le aree sulle quali è stata condotta l'analisi (fine del paragrafo) 50

Figura 2.6: Rette di regressione lineare rappresentanti i trend temporali ottenuti per i quantili 0.25, 0.50, 0.75 e 0.95, anni 1951-2007 (Intero arco Alpino). 53

Figura 2.7: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini austriaci (intervallo temporale: 1951-2007). 54

Figura 2.8:Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini italiani (intervallo temporale: 1930-2010)..... 55

Figura 2.9: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini svizzeri (intervallo temporale: 1951-2010)..... 55

Figura 2.10: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini francesi (intervallo temporale: 1948-2017)..... 55

Figura 2.11: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini del Gruppo Centrale (intervallo temporale: 1951-2007)..... 57

Figura 2.12: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini del Gruppo Ovest (intervallo temporale: 1951-2007)..... 57

Figura 2.13: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini del Gruppo Est (intervallo temporale: 1951-2007)..... 58

Figura 3.1: Rappresentazione del concetto di area contribuente in funzione del regime climatico del bacino e dell'andamento dello zero termico. (Immagine tratta da Allamano et al., 2009) 60

Figura 3.2: Schema illustrativo della struttura di carattere modulare del toolbox SAFE. . 67

Figura 3.3: Sistema di classificazione delle diverse tipologie di analisi di sensitività basato sugli obiettivi dell'analisi e sulla complessità computazionale (M è il numero di parametri soggetti all'analisi). Pianosi et al., 2016. 68

Figura 3.4: Rappresentazione dei tre passaggi fondamentali per l'applicazione di qualsiasi tipo di analisi di sensitività (Pianosi et al., 2016)..... 72

Figura 3.5: Esempio di rappresentazione grafica degli indici di sensitività (Pianosi et al., 2016)..... 73

Figura 3.6: Scatter plots (o dotty plots) per la valutazione della sensitività per via qualitativa (Pianosi et al., 2016). 73

Figura 3.7: Rappresentazione grafica degli indici di sensitività ottenuti applicando il metodo VBSA e considerando come grandezza indice per la descrizione dell'output del modello la portata specifica q associata ad un tempo di ritorno T di 50 anni. 76

Figura 3.8: Scatter plot per la visualizzazione dell'output del modello (q T=50 anni) rispetto ai valori assunti dalle singole variabili di input del modello. 78

Figura 3.9: Coloured scatter plots per l'individuazione di interazioni tra parametri. L'output del modello è la portata specifica associata al tempo di ritorno T 50 anni. 80

Figura 3.10: Grafici con curve di livello ottenuti applicando l'Equazione 3.4 e facendo variare due parametri alla volta. 83

Figura 3.11: Sovrapposizione dei grafici con curve di livello ottenuti applicando le Equazioni 3.4 e 3.5 per la coppia di parametri Zmax e Zmin. 84

Figura 3.12: Grafici con curve di livello ottenuti applicando l'Equazione 3.5 e facendo variare due parametri alla volta. 85

Figura 3.13: Rappresentazione grafica degli indici ottenuti applicando EET. I punti rappresentano i valori ottenuti, i rettangoli in trasparenza gli intervalli di confidenza. ... 88

Figura 3.14: Risultato derivante dall'applicazione di EET con output del modello: CA. I punti rappresentano i valori degli indici ottenuti, i rettangoli in trasparenza gli intervalli di confidenza. 93

Figura 3.15: Risultato derivante dall'applicazione di EET con output del modello: SLOPE. I punti rappresentano i valori degli indici ottenuti, i rettangoli in trasparenza gli intervalli di confidenza. 94

Figura 4.1: Andamento degli spaghetti plot per ciascuno dei 137 bacini analizzati: ogni linea grigia si riferisce ad un bacino e collega i valori di ogni parametro descrittore relativi a tale bacino. 98

Figura 4.2: Andamento degli spaghetti plot per ciascuno dei 137 bacini analizzati dopo la sostituzione di Zmax e Zmin con Zmean. 99

Figura 4.3 a: Rappresentazione mediante spaghetti plot degli 8 bacini ricadenti all'interno del gruppo A ($\xi > 0.45$) 100

Figura 4.4: Rappresentazione mediante spaghetti plot dei 91 bacini italiani non classificati nei gruppi A, B e C precedentemente individuati. 102

Figura 4.5: Rinormalizzazione dei 91 bacini non precedentemente classificati. 102

Figura 4.6: Flow chart che descrive le operazioni di raggruppamento eseguite sul campione di 137 bacini italiani considerato. I riquadri con bordatura colorata fanno riferimento ai gruppi finali (A, B, C, D, E, F). 103

Figura 4.7 a: Andamento degli spaghetti plot relativi al gruppo D (16 bacini). 104

Figura 4.8: Curve medie relative ai sei gruppi identificati empiricamente e assunte come centroidi di primo tentativo per l'applicazione del metodo di aggregazione k-means.....108

Figura 4.9 a: Cluster 1 ottenuto a seguito dell'applicazione del metodo di aggregazione k-means (8 bacini).....108

Figura 4.10: Dendrogramma ottenuto tramite l'implementazione della funzione hclust in R Studio e risultante dall'applicazione del metodo di aggregazione di Ward sul campione analizzato. Ciascun punto rosso rappresenta uno dei 137 bacini italiani.....113

Figura 4.11: Spaghetti plot ottenuti tagliando il dendrogramma in modo tale da ottenere un numero di gruppi k pari a 5. (Sulle ascisse: Parametro 1: altitudine media del bacino, Parametro 2: parametro di flesso, Parametro 3: R, Parametro 4: λ e Parametro 5:α). 114

Figura 4.12: Spaghetti plot ottenuti tagliando il dendrogramma in modo tale da ottenere un numero di gruppi k pari a 6. (Sulle ascisse: Parametro 1: altitudine media del bacino, Parametro 2: parametro di flesso, Parametro 3: R, Parametro 4: λ e Parametro 5:α). 115

Figura 4.13: Spaghetti plot ottenuti tagliando il dendrogramma in modo tale da ottenere un numero di gruppi k pari a 7. (Sulle ascisse: Parametro 1: altitudine media del bacino, Parametro 2: parametro di flesso, Parametro 3: R, Parametro 4: λ e Parametro 5:α). 117

Figura 4.14: Rappresentazione grafica degli indici CHI e WSS calcolati per valori di k variabili tra 2 e 10. 119

Figura 5.1: Curve relative al bacino 11015. In blu la CDF del modello, in verde la Gumbel delle Q osservate (cerchi vuoti neri). 126

Figura 5.2: Mastallone (Sesia) a Ponte Folle (cod. 11015). Rappresentazione della CDF generata dal modello e della distribuzione di Gumbel associata alle osservazioni di portata su grafici con ascissa dimensionale (grafico a sinistra) e con ascissa adimensionale (grafico a destra). 133

Figura 5.3: Grana a Monterosso (cod. 11025). Rappresentazione della CDF generata dal modello e della distribuzione di Gumbel associata alle osservazioni di portata su grafici con ascissa dimensionale (grafico a sinistra) e con ascissa adimensionale (grafico a destra). 134

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1 Dataset Alpino: numero complessivo di bacini selezionati per ciascuno stato. 15

Tabella 2.1: Risultati complessivi del test del trend applicato alle singole serie storiche (bacini costituenti il campione dell'arco alpino)..... 47

Tabella 2.2: Media dei valori di Quota media e Area dei bacini appartenenti alle quattro categorie di trend: Trend decrescente significativo, Trend decrescente non significativo, Trend crescente significativo e Trend crescente non significativo..... 49

Tabella 2.3: Regressione per quantili e risultati del Test di Student riferiti all'interno arco alpino (Italia, Francia, Svizzera e Austria). Intervallo temporale considerato: 1951-2007. 53

Tabella 2.4: Elenco dei bacini italiani appartenenti al Gruppo Ovest e di quelli italiani e svizzeri appartenenti al Gruppo Est. 56

Tabella 3.1: Range di variabilità dei parametri da sottoporre a SA. 75

Tabella 3.2: Indici di sensitività ottenuti applicando il metodo VBSA e considerando come grandezza indice per la descrizione dell'output del modello la portata specifica q associata ad un tempo di ritorno T di 50 anni..... 76

Tabella 3.3: Caratteristiche morfologiche e climatiche del bacino medio di riferimento.. 82

Tabella 3.4: Indici di sensitività calcolati secondo il metodo EET..... 88

Tabella 4.1: Parametri descrittori dei tre bacini esclusi dal campione di 140 bacini italiani. 98

Tabella 4.2: Valori degli indici CHIndex e WSS calcolati per valori di k variabili tra 2 e 10. 119

Tabella 5.1: Caratteristiche morfologiche e climatiche dei bacini considerati per l'applicazione del modello. Sono indicati con il colore blu i bacini di tipo Bounded e in nero quelli di tipo High elevation. 123

Tabella 5.2: Valori dei parametri di pioggia α e λ riferiti ai dati idrometrici ed idrologici misurati. 124

Tabella 5.3: Valori dei parametri θ_1 e θ_2 e valor medio ricavati operando un best fitting sulla CDF generata dal modello. 127

Tabella 5.4: Valori dei momenti delle distribuzioni di probabilità associate ai 22 bacini italiani analizzati. 128

Tabella 5.5: Valori di $Qmedia$ relativi ai 22 bacini italiani analizzati. 129

Tabella 5.6: Valori dei parametri caratteristici $\alpha_{Q\ mod}$ e $\lambda_{Q\ mod}$ determinati per via grafica forzando la curva di probabilità cumulata sul modello probabilistico di Gumbel operando un best fitting. 131

Tabella 5.7: Confronto tra la curva di probabilità cumulata definita con il modello con quella riferita alle portate osservate, in termini di parametri α e λ. Sono indicati con il colore blu i bacini di tipo Bounded e in nero quelli di tipo High elevation. 132

Tabella 5.8: Classificazione in cluster dei 22 bacini italiani ai quali è stato applicato il modello FloodAlp. Nella porzione superiore della tabella sono riportati i bacini per i quali la stima fornita dal modello non è accurata, nella parte inferiore quelli per i quali la CDF stimata dal modello coincide con quella derivante dalle portate osservate. 137

Tabella 5.9: Classificazione dei bacini sulla base delle tre categorie di comportamento (A: curva verde meno variabile della rossa, B: curva rossa molto simile alla verde, C: variazione consistente tra curva rossa e verde). 138

INTRODUZIONE

Il crescente incremento delle temperature che si sta registrando a partire dal secolo scorso è un fenomeno che interessa in modo diretto i processi naturali che determinano la formazione delle piene e le conseguenti catastrofi ambientali di tipo alluvionale. In questo contesto, le aree alpine ricoprono un ruolo significativo a causa della presenza della neve, che, essendo in grado di accumularsi durante la stagione invernale per poi fondere in corrispondenza di innalzamenti termici, fornisce un contributo ritardato alla creazione dei fenomeni di piena. Il comportamento dei bacini di alta quota è infatti fortemente influenzato dal regime stagionale delle temperature e dalle sue fluttuazioni annuali; ne consegue una diretta modifica dell'entità e della durata dei processi di fusione nivale. Tali processi concorrono alla formazione delle piene negli ambienti alpini e a ridosso di essi. Ne deriva la necessità di sottoporre ad analisi questi processi e di studiare gli effetti provocati dai cambiamenti climatici sui regimi di frequenza degli eventi di piena.

In questo contesto di ricerca si inserisce il modello geomorfoclimatico *FloodAlp* sviluppato da P. Allamano, P. Claps e F. Laio (Allamano P. et al., 2009) che si propone come valido strumento per la simulazione del meccanismo di formazione delle piene nei bacini di alta quota. Il modello è in grado di integrare i diversi processi fisici coinvolti e restituire un'unica distribuzione di frequenza delle piene.

Lo scopo del presente elaborato di tesi è duplice. In primo luogo, è stata condotta un'analisi volta all'individuazione della presenza di trend temporali nelle serie storiche di portata al colmo di piena registrate nell'arco alpino in corrispondenza di bacini idrografici appartenenti a Francia, Italia, Svizzera ed Austria.

Sulla base dei risultati ottenuti è stato possibile formulare considerazioni riguardanti la possibilità secondo la quale il fenomeno del riscaldamento globale possa essere responsabile di una crescita, nel tempo, dei valori dei quantili di piena.

Successivamente, l'attenzione è stata incentrata sull'analisi del modello *FloodAlp*. Nello specifico, l'intento finale è stato quello di studiarne la struttura e testarne la bontà di stima attraverso la sua applicazione ad un campione di bacini collocati sul territorio italiano. Per far ciò, inizialmente, è stata condotta un'analisi di sensitività volta a comprendere le modalità con le quali il modello risponde di fronte a variazioni dei valori dei parametri di input e, nello specifico, all'individuazione delle variabili in grado di influenzarne il risultato finale. Successivamente all'applicazione dell'analisi di sensitività si è voluto proseguire lo studio della struttura del modello indagando il blocco di gestione dei parametri di input. Nello specifico, è stata condotta una analisi di carattere multivariato mirata all'individuazione di possibili somiglianze tra i set di parametri descrittori propri dei singoli bacini.

Infine, il modello è stato applicato ad un campione di bacini strumentati collocati nella porzione Ovest del Nord Italia.

I risultati ottenuti vengono discussi nelle conclusioni e vengono affiancati da considerazioni riguardanti l'importanza di proseguire gli studi nell'ambito della modellazione dei fenomeni di piena nelle aree alpine.

La scelta delle fonti documentarie, al cui elenco si rimanda nella Bibliografia in calce al presente scritto, si è articolata fra gli studi presenti in letteratura nei volumi a stampa e nelle pubblicazioni scientifiche di settore.

1. COSTRUZIONE DEL DATASET DELLE PIENE DEI BACINI DELL'ARCO ALPINO

Nel presente capitolo si illustrano le metodologie di raccolta dei dati e i criteri di selezione assunti per la creazione del dataset di bacini Alpini sul quale verterà l'analisi dei trend temporali. Successivamente, è stato condotto uno studio esplorativo dei dati acquisiti con lo scopo di individuare le caratteristiche delle relazioni che intercorrono tra i parametri geo-morfologici dei bacini idrografici naturali e le portate al colmo di piena misurate in corrispondenza delle sezioni di chiusura di tali bacini.

Questo tipo di analisi, seppure di carattere preliminare, ricalcano un ruolo molto importante negli studi volti alla ricerca e determinazione degli andamenti temporali delle portate e alla ricostruzione dei processi di formazione delle piene nell'ambito dei bacini idrografici di alta montagna.

La trattazione di carattere illustrativo che compone il presente capitolo è stata sviluppata adottando una classificazione dei bacini Alpini sulla base della loro appartenenza nazionale. Per ciascuno stato preso in considerazione, quindi, si riporta una panoramica dei dati idrologici e morfologici dei bacini di appartenenza.

La regione oggetto di studio, nel suo complesso, prende in considerazione le Alpi austriache, le Alpi francesi, l'arco alpino italiano e le Alpi svizzere e si sviluppa su un'area pari a circa 150500 km^2. Nello specifico, 35000 km^2 appartengono al territorio austriaco, 33500 km^2 al territorio francese, 45000 km^2 al territorio italiano e 37000 km^2 a quello svizzero.

Tramite l'elaborazione del Digital Terrain Model (DTM) dell'area di studio è stata individuata la presenza di una fascia centrale caratterizzata da quote elevate. Tale

porzione, a causa delle proprie caratteristiche altimetriche assume la funzione di spartiacque idrografico tra la porzione Nord e quella Sud dell'area sotto analisi.

La quota media della porzione di territorio indagata è in generale elevata e si attesta intorno ai 1300 m s.l.m. con una distribuzione delle altimetrie (Figura 1.1) con andamento di tipo decrescente spostandosi da ovest verso est. Un aspetto di tipo morfologico sul quale si vuole porre l'attenzione è la differenza in termini di acclività di versante dei bacini contenuti all'interno del campione analizzato. I bacini italiani e francesi sono, in genere, molto più ripidi rispetto a quelli svizzeri e austriaci, posti più a Nord, che al contrario, possiedono una forma più dolce. Tale aspetto può influenzare i meccanismi di formazione delle piene.

Figura 1.1: Modello Digitale del Terreno (DTM) (risoluzione spaziale 20 m) dell'area alpina studiata (Sources: ESRI, OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community).

La selezione dei bacini costituenti il dataset impiegato per la presente analisi è stata condotta facendo riferimento ai seguenti criteri:

- selezione di stazioni di misura che sottendono bacini aventi quota media superiore a 1000 m s.l.m.;

- al fine di ottenere risultati attendibili a seguito dell'applicazione di analisi statistiche si sono selezionate stazioni di misura per le quali fosse disponibile una serie storica di portate al colmo di piena di lunghezza minima pari a 10 anni;
- per eliminare la possibile influenza causata dal fenomeno di laminazione delle portate si sono scartate dalla selezione le stazioni di misura che presentassero a monte grandi volumi di invaso, naturali o artificiali.

A seguito dell'applicazione dei criteri sopra citati è stato costruito il dataset Alpino. Il numero complessivo di bacini selezionati per ciascuno stato considerato è riportato in Tabella 1.1.

Tabella 1.1 Dataset Alpino: numero complessivo di bacini selezionati per ciascuno stato.

	Numero di bacini considerati
Austria	119
Francia	52
Italia	140
Svizzera	117
TOTALE	428

Nel paragrafo successivo si procede con l'illustrazione delle caratteristiche principali dei bacini selezionati e delle corrispondenti serie storiche di portata al colmo di piena. Tale analisi, come precedentemente dichiarato, è stata condotta raggruppando i bacini per nazione.

1.1. BASE DATI PREESISTENTE

In questo paragrafo si conduce un'analisi dei tipo esplorativo del dataset oggetto di studio. In particolare, assumendo per semplicità illustrativa una suddivisione dei bacini di carattere nazionale, si illustrano le modalità e le fonti utilizzate per il reperimento dei dati morfologici e idrologici e si fornisce un quadro complessivo dei bacini oggetto di studio.

Le caratteristiche geo-morfologiche dei bacini d'alta quota analizzati:

- coordinate della sezione di chiusura del bacino, definite nel sistema di riferimento UTM-WGS 84 ed espresse in gradi decimali (latitudine e longitudine);
- quota massima del bacino (m s.l.m.);
- quota media del bacino (m s.l.m.) che coincide con la linea di compenso della curva ipsografica del bacino;
- quota minima del bacino (m s.l.m.);
- area del bacino (km^2);
- parametro di flesso della curva ipsometrica ξ.

sono state ottenute mediante l'analisi dei DTM dei singoli bacini e vengono riportate in Allegato A e in Allegato B.

La realizzazione dei dataset di bacini austriaci e svizzeri è stata realizzata nell'ambito di studi e progetti di tesi precedenti (Blöschl et al., 2019, Como, 2015; Apostolo, 2019, Brignolo, 2020), mentre il dataset italiano è stato realizzato a partire dai dati contenuti nel Catalogo delle piene dei corsi d'acqua italiani (Claps et al., 2020), progetto al quale ho personalmente collaborato in fase di realizzazione. Per quanto riguarda i bacini francesi invece il reperimento dei dati e la loro analisi sono stati eseguiti seguendo la procedura descritta al §1.2. Si riporta, per completezza, ai paragrafi §1.2.1, §1.2.2 e§1.2.3, un quadro sintetico dei dati e delle analisi condotte sui bacini, rispettivamente, austriaci, italiani e svizzeri.

1.1.1. Austria

Il Servizio Idrografico in Austria gestisce la rete di base per il monitoraggio delle portate e si occupa della realizzazione di un archivio dei dati idrologici misurati. La possibilità di accedere e procedere al download di tali dati è garantita attraverso il portale *eHYD* (Hydrographische Daten). Si tratta di un applicativo WebGIS che riporta tutte le stazioni di misura presenti sul territorio e le corrispondenti serie storiche dei valori di portata mensile dalla prima pubblicazione elettronica fino all'ultimo annuario idrologico pubblicato.

Le serie storiche delle portate al colmo di piena mensili relative a 119 bacini individuati come idonei per l'analisi sono state elaborate al fine di ottenere i valori delle portate al colmo annuali. Il numero di colmi registrati per ciascuna stazione non è costante a causa della presenza di serie storiche aventi estensione temporale differente. In generale, si osserva che il maggior numero di osservazioni è concentrato nel periodo temporale compreso tra il 1951 e il 2007 (Figura 1.2). Per completezza di trattazione si riporta in Allegato A, per ciascun bacino, la lunghezza della serie storica, il numero di picchi registrati e il valore della portata al colmo di piena media rilevata.

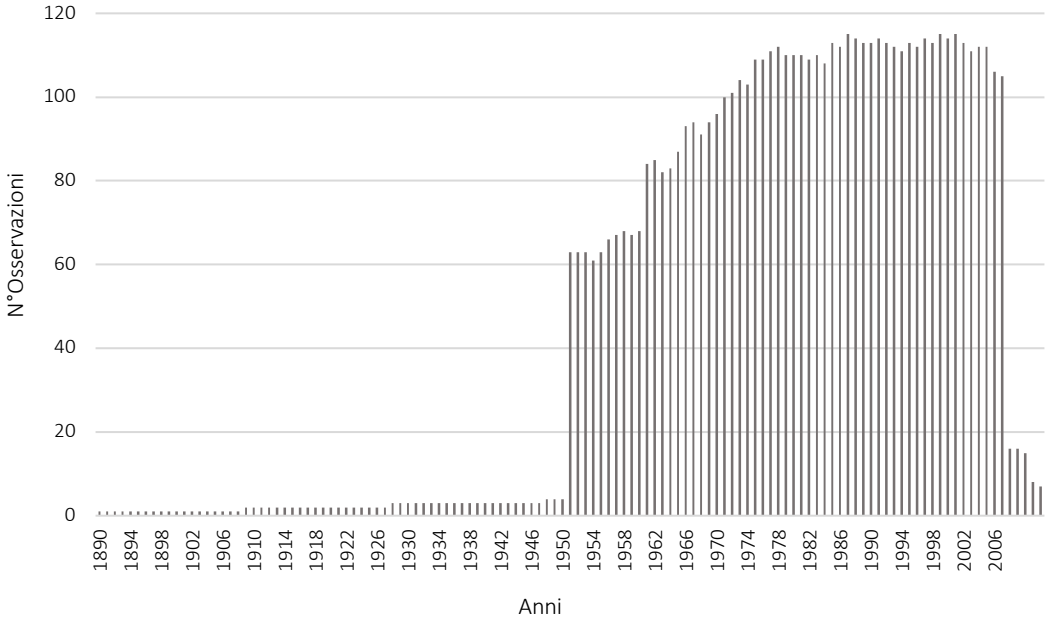


Figura 1.2: Numero di osservazioni delle portate al colmo di piena in funzione degli anni (Austria).

La distribuzione spaziale dei punti di misurazione, posti in corrispondenza delle stazioni di chiusura dei bacini costituenti il campione austriaco, è stata riportata in Figura 1.3.

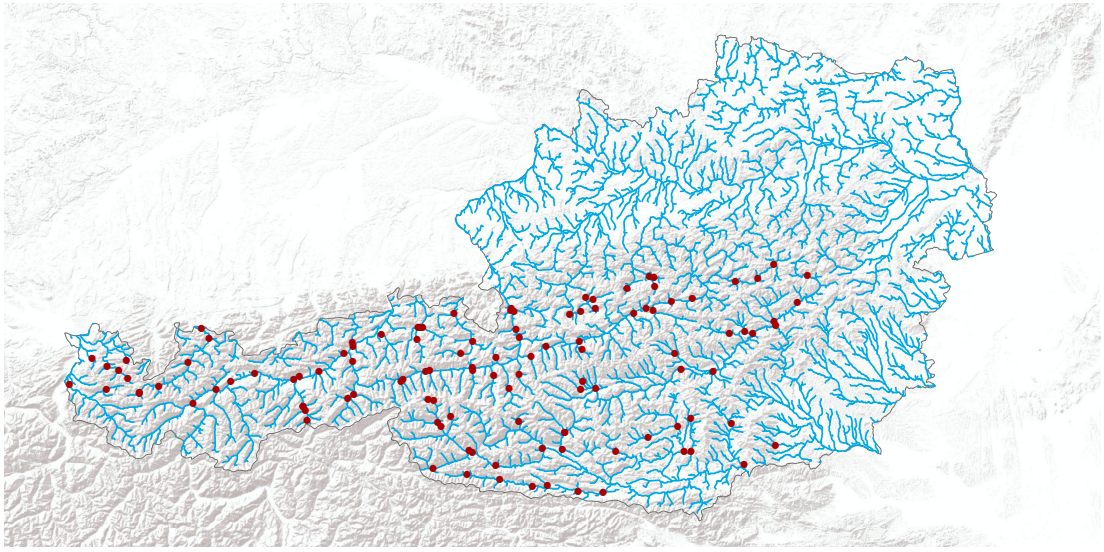


Figura 1.3: Rappresentazione spaziale delle coordinate geografiche delle stazioni di chiusura relative al campione di 119 bacini austriaci.

A livello geo-morfologico emerge, all'interno del campione austriaco, una grande variabilità di caratteristiche. A tal proposito si sottolinea la variabilità dell'area dei bacini, da un valore minimo di 14 km^2 ad un massimo di 8484 km^2, e della quota media, i cui valori sono compresi tra i 1000 m s.l.m. e i 3000 m s.l.m. circa.

Al fine di analizzare con un maggior dettaglio le caratteristiche morfologiche dei bacini di alta quota presenti sul territorio nazionale austriaco si confrontano i parametri di altitudine dei bacini con le relative aree (Figura 1.4 a, Figura 1.4 b). A seguito di questa analisi, è stato possibile individuare un andamento di tipo crescente del rapporto quota media – area (Figura 1.4 c); sulla base di tale considerazione e a seguito dell'osservazione degli andamenti individuati mettendo a confronto quota massima e quota minima con l'area, si può affermare che i bacini con estensione areale maggiore si attestano a quote medie più elevate rispetto a quelli di piccole dimensioni.

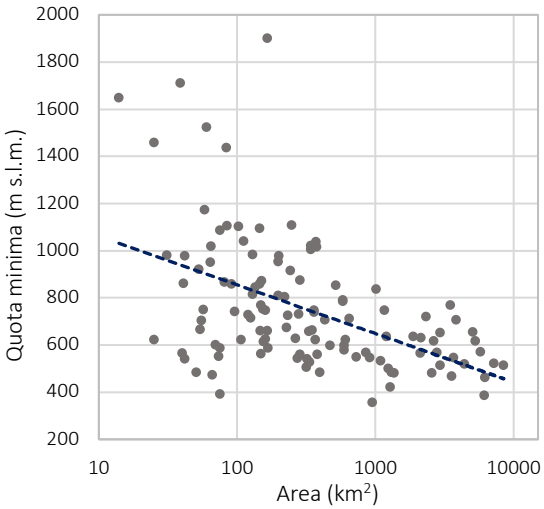


Figura 1.4 a: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell'area (AT).

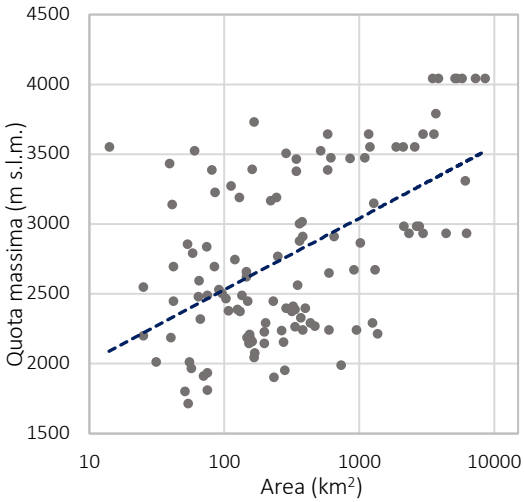


Figura 1.4 b: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell' area (AT).

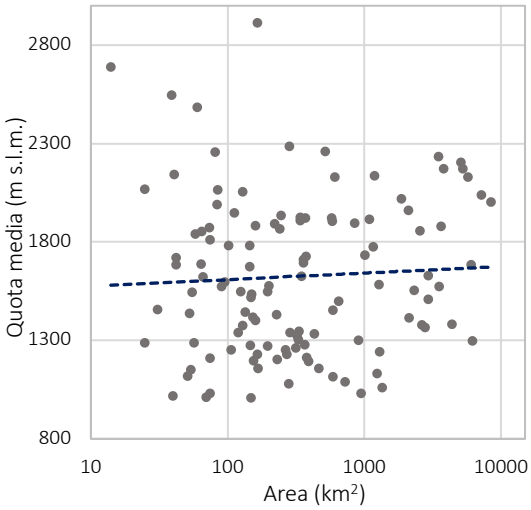


Figura 1.4 c: Rappresentazione della quota media dei singoli bacini in funzione dell'area (AT).

1.1.2. Italia

Il catalogo nazionale italiano è stato costruito attraverso un processo di consultazione e unione dei dati forniti dagli enti regionali competenti di riferimento per l'area di studio in esame. In particolare, è stato possibile accedere alle risorse messe a disposizione degli utenti da parte di Arpa Lombardia, Arpa Piemonte, Arpa Veneto, Centro Funzionale Meteo Trentino e infine dalla Provincia Autonoma di Bolzano Alto Adige.

Il campione di bacini estratto dal catalogo riunisce 140 stazioni di misura aventi un sufficiente numero di osservazioni ricadenti nell'intervallo temporale compreso tra il 1930 e il 2010 (Figura 1.5).

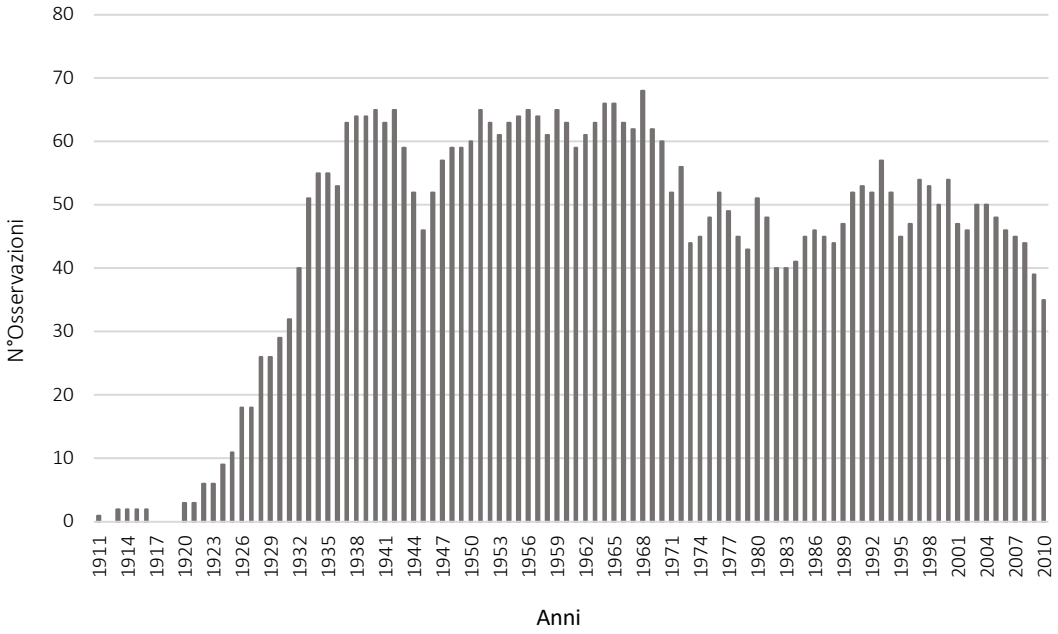


Figura 1.5: Numero di osservazioni delle portate al colmo di piena in funzione degli anni (Italia).

Tutte le informazioni relative ai bacini considerati, tra le quali l'anno di inizio e l'anno di fine registrazione, il numero di picchi osservati negli anni e il valore della portata al colmo di piena media rilevata sono riportate in Allegato A.

In Figura 1.6 si riporta la rappresentazione su mappa delle località di misura poste in corrispondenza delle stazioni di chiusura relative ai bacini selezionati. Nonostante l'area alpina studiata risulti divisa in due porzioni distinte tra loro a causa della presenza di

confini amministrativi, la distribuzione geografica delle stazioni è uniforme e con una leggera prevalenza numerica per quanto riguarda le stazioni appartenenti alla regione ovest.

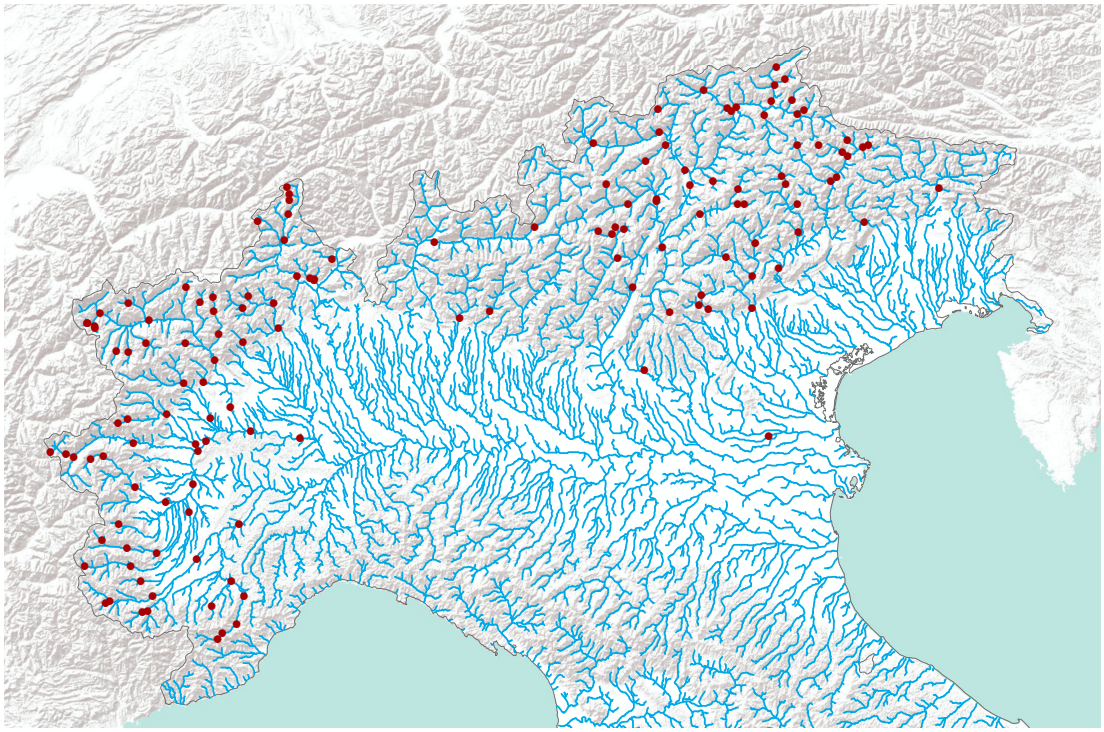


Figura 1.6: Rappresentazione spaziale delle coordinate geografiche delle stazioni di chiusura relative al campione di 140 bacini italiani.

Analogamente a quanto fatto per il caso austriaco, sono stati realizzati tre grafici (Figura 1.7 a, Figura 1.7 b e Figura 1.7 c) che rappresentano i parametri di quota del bacino (quota minima, massima e media) in funzione dell'area.

La relazione tra quota media e area diversamente da quanto osservato per il caso austriaco assume, per il caso italiano, un andamento di tipo decrescente. La spiegazione di tale comportamento va individuata nella morfologia del nord Italia. I bacini idrografici con elevata estensione areale presenti sul territorio italiano sono situati nelle zone alpine e comprendono porzioni della pianura sottostante i rilievi. Per questo motivo si osserva che, per tali bacini, la differenza quota massima e minima è considerevole.

Questo significa che i bacini di dimensione ridotta si sviluppano a quote elevate, mentre quelli aventi area maggiore possiedono una quota media più bassa a causa del loro grande dislivello.

Per quanto riguarda l'andamento degli altri due parametri di quota rispetto all'area si conferma lo stesso comportamento osservato in precedenza, infatti, come nel caso austriaco, anche i bacini italiani di grandi dimensioni sono caratterizzati da quote minime inferiori e quote massime maggiori rispetto a quelli aventi estensione areale più ridotta.

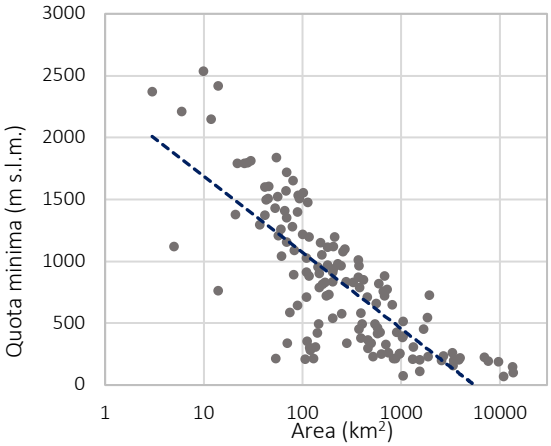


Figura 1.7 a: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell' area (ITA).

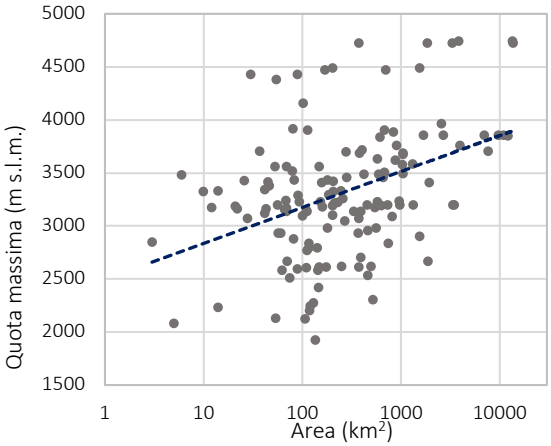


Figura 1.7 b: Rappresentazione della quota massima dei singoli bacini in funzione dell' area (ITA).

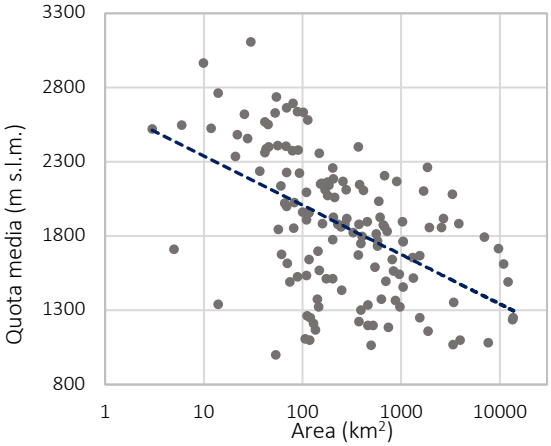


Figura 1.7 c: Rappresentazione della quota media dei singoli bacini in funzione dell' area (ITA).

1.1.3. Svizzera

Il database dei bacini svizzeri è stato realizzato a partire dai dati idrologici messi a disposizione dall'Ufficio Federale dell'Ambiente (UFAM) sul portale "Dati idrologici e previsioni". Tramite tale portale è possibile avere accesso ai dati idrologici e climatici raccolti dall'estesa rete di stazioni di misura presenti sul territorio e a dati di previsione delle portate. Tuttavia, a differenza del caso austriaco e italiano, le serie storiche di portata al colmo di piena non sono disponibili in formato digitale. Le serie storiche relative alle singole stazioni di misura sono infatti riportate su istogrammi. Per questa ragione, la costruzione del dataset ha richiesto un'operazione di digitalizzazione delle informazioni contenute in tali grafici.

Il dataset svizzero riunisce 117 stazioni di misura aventi un sufficiente numero di osservazioni ma con lunghezze temporali delle serie storiche differenti. Osservando l'istogramma in Figura 1.8 si osserva che il maggior numero di osservazioni ricade nell'intervallo temporale compreso tra il 1930 e il 2010.

Tutte le informazioni relative ai bacini considerati, tra le quali l'anno di inizio e l'anno di fine registrazione, il numero di picchi osservati negli anni e il valore della portata al colmo di piena media rilevata sono riportate in Allegato A.

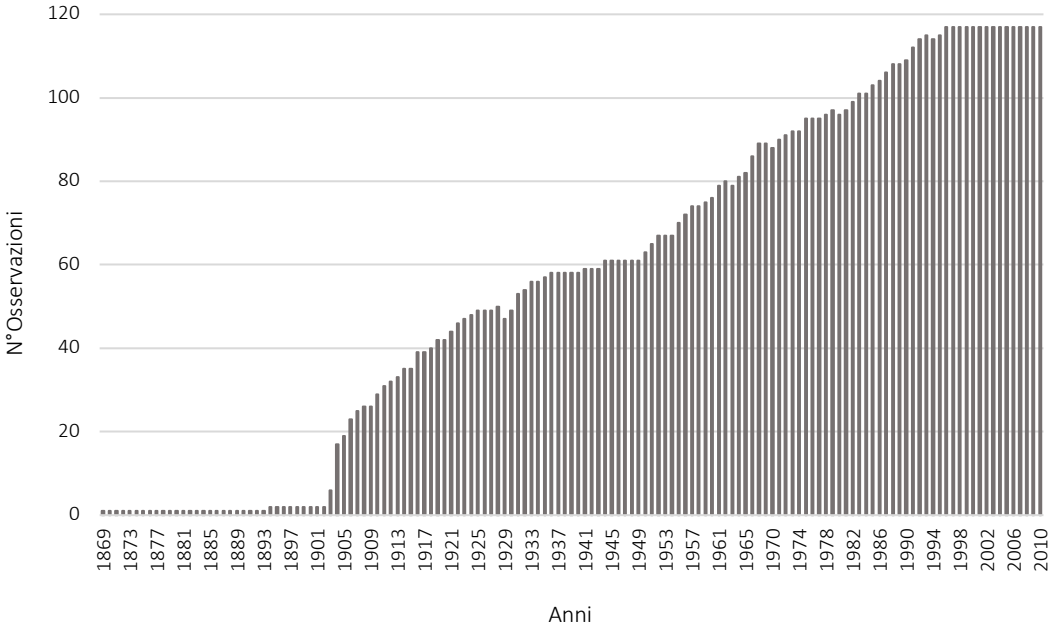


Figura 1.8: Numero di osservazioni delle portate al colmo di piena in funzione degli anni (Svizzera).

In Figura 1.9 è riportata la distribuzione spaziale delle coordinate delle stazioni di misura relative al campione di bacini svizzeri sul territorio nazionale.

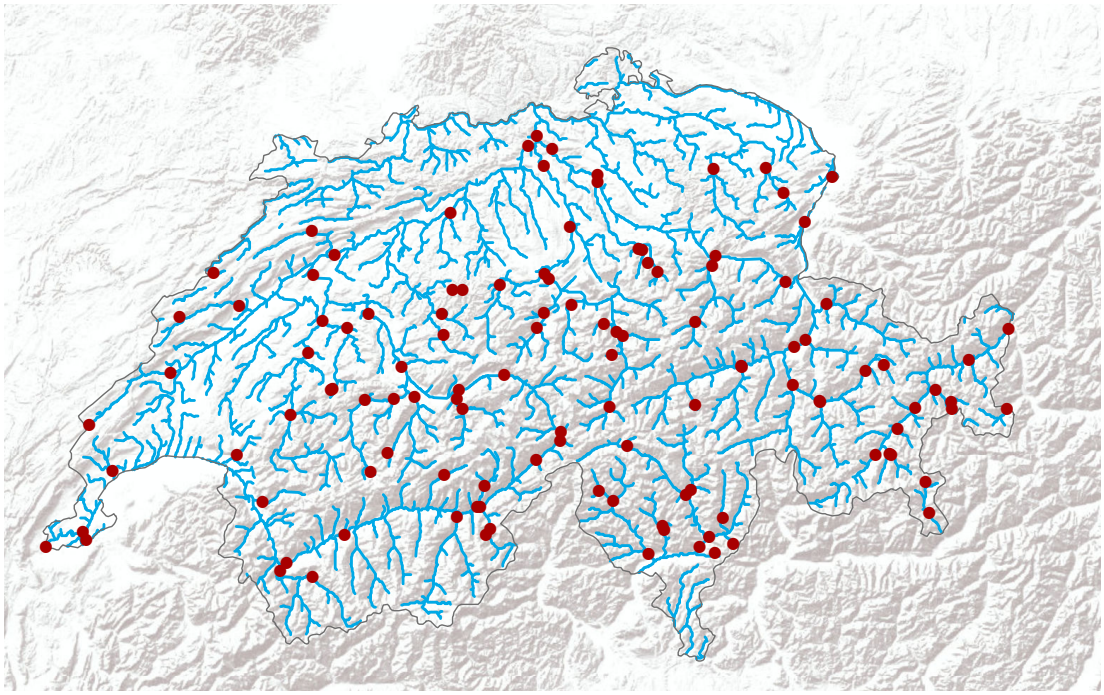


Figura 1.9: Rappresentazione spaziale delle coordinate geografiche delle stazioni di chiusura relative al campione di 117 bacini svizzeri.

Gli andamenti individuati nei grafici riportati in Figura 1.10 a e Figura 1.10 b e rappresentanti rispettivamente la quota minima e massima in funzione dell'area dei bacini sono consistenti con i trend individuati per l'Austria e per l'Italia.

Analogamente al caso italiano, anche il campione svizzero mostra una riduzione della quota media dei bacini al crescere dell'area (Figura 1.10 c). Nonostante l'andamento di carattere decrescente sia meno marcato di quello osservabile nel caso italiano (Figura 1.7 c), anche in Svizzera si assiste alla presenza di bacini molto estesi che, caratterizzati da quote massime elevate e minime molto ridotte presentano un notevole dislivello al loro interno.

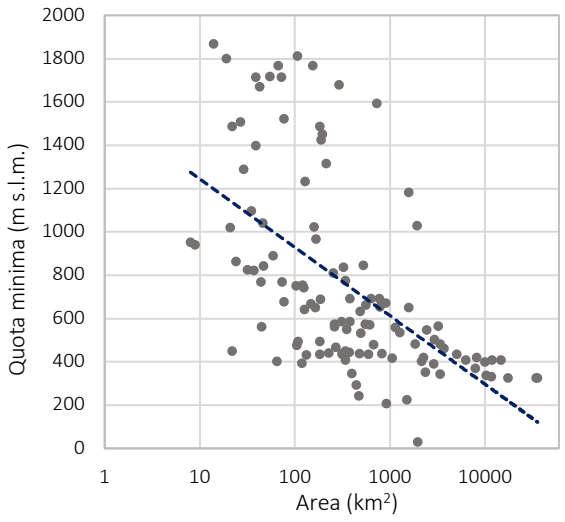


Figura 1.10 a: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell' area (CH).

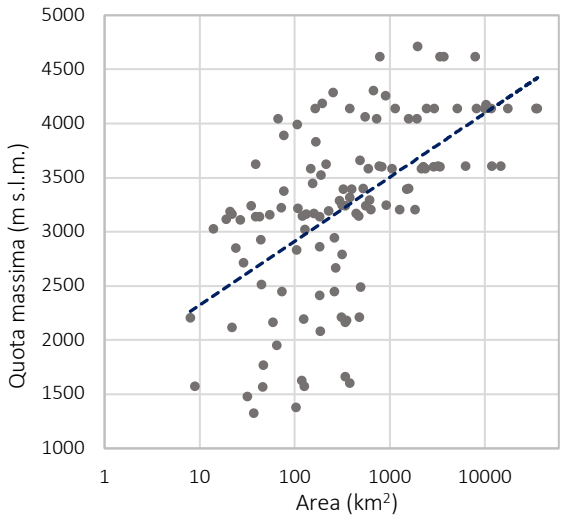


Figura 1.10 b: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell' area (CH).

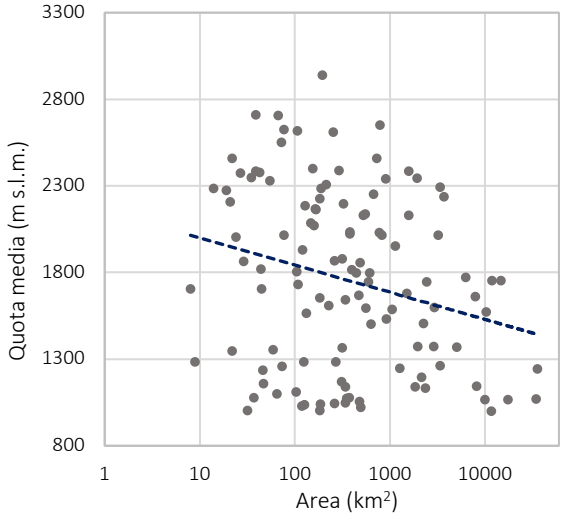


Figura 1.10 c: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell' area (CH).

1.2. COSTRUZIONE DELLA BASE DATI DELLE PIENE ALPINE IN FRANCIA

Il dataset costruito sulla base delle misurazioni relative ai bacini alpini austriaci, italiani e svizzeri è stato integrato considerando anche un gruppo di bacini alpini francesi. In questo modo, è stato ottenuto un campione di dati più ampio e rappresentativo dell'arco alpino.

I dati a disposizione per il reperimento delle serie storiche di portata al colmo di piena in corrispondenza dei bacini idrografici francesi fanno parte del *dataset ERC* realizzato in occasione della stesura di un articolo scientifico pubblicato sulla rivista *Nature* (Blöschl et al., 2019). Tale campione contiene i dati di portate al colmo di piena riferite a bacini collocati su tutto il territorio europeo. In particolare, sono presenti i dati riferiti a 332 stazioni di misura che insistono sul territorio nazionale francese.

Per ciascuna stazione vengono riportate le seguenti caratteristiche:

- coordinate geografiche della stazione di misura (corrispondenti alla sezione di chiusura del bacino posto al di sopra di tale stazione) nel sistema di riferimento UTM-WGS 84 ed espresse in gradi decimali (latitudine e longitudine);
- l'area del bacino idrografico (km^2);
- l'altitudine della stazione di misura (m s.l.m.);
- lunghezza temporale della serie storica di portata al colmo di piena.

In mancanza della disponibilità degli *shapefile* riferiti alle stazioni di misura di interesse non è stato possibile, attraverso l'elaborazione del DTM, procedere alla selezione dei bacini che rispettassero la condizione di altitudine media Z_{mean} superiore ai 1000 m s.l.m.. Di conseguenza, per ottenere le informazioni relative alla quota media dei bacini si è reso necessario operare in modo differente.

Per il reperimento delle informazioni desiderate è stato necessario effettuare una ricerca bibliografica tra gli studi e le pubblicazioni esistenti sull'argomento. Tra questi è stato utilizzato lo studio effettuato da Sauquet (Sauquet E., 2000) il quale riporta in allegato 1 (*Annexe 1: Descriptif des stations*, p. 357) al suo elaborato di ricerca numerose tabelle contenenti i dati relativi alla quota media dei bacini idrografici. A partire da tali tabelle è

stato possibile individuare 77 stazioni sul territorio francese riferite a bacini con altitudine media superiore al limite imposto.

Delle 77 stazioni con caratteristiche idonee per questo studio:

- 27 stazioni sono presenti anche all'interno del *dataset ERC (Gruppo a:)*;
- 13 stazioni non sono collocate in regioni Alpine *(Gruppo b)*;
- 37 stazioni sono localizzate in aree Alpine ma non sono comprese nel dataset ERC (*Gruppo c*).

Si riportano in Allegato B le tabelle contenenti le informazioni relative alle caratteristiche delle stazioni che compongono il *Gruppo a* e il *Gruppo c*.

Siccome le serie storiche di portata al colmo di piena erano disponibili unicamente per le stazioni appartenenti al *Gruppo a*, per il reperimento dei dati relativi alle stazioni del *Gruppo b* è stato necessario procedere alla consultazione della banca idrologica francese HYDRO[1].

HYDRO raccoglie i dati di livello idrico e di portata forniti dalle circa 5000 stazioni di misurazione (delle quali circa 3200 sono ad oggi in servizio) situate sui corsi d'acqua francesi e consente l'accesso ai dati descrittivi ed idrologici di tali stazioni. Le informazioni gestite dalla banca sono comunicate da parte dei gestori statali o regionali delle stazioni ad HYDRO che procede con l'aggiornamento delle serie storiche su base mensile. Per questi motivi, la banca risulta uno strumento di spiccata utilità in quanto consente all'utente l'accesso ad informazioni di carattere idrologico anche recenti.

Tra i numerosi dati disponibili, quelli di rilevante interesse per questo studio sono:

- caratteristiche morfologiche e geografiche del bacino idrografico corrispondente alla stazione (area del bacino idrografico, quota della stazione e coordinate geografiche nel sistema di riferimento Lambert II étendu;
- schede, per ogni singolo bacino, che riportano i valori di portata media giornaliera (m^3/s) per tutti gli anni disponibili

[1] *http://www.hydro.eaufrance.fr*

Previa registrazione, durante la quale, per ottenere le credenziali di accesso, è richiesto l'invio tramite e-mail di un modulo di iscrizione, è stato possibile procedere al download delle schede contenenti le serie storiche in formato .csv.

La consultazione e il successivo scaricamento dei dati deve essere eseguito tramite la barra di ricerca riportata in Figura 1.11.

Figura 1.11: Barra di ricerca per la selezione delle stazioni idrometriche dalla banca dati HYDRO.

Delle 37 stazioni appartenenti al *Gruppo c*, 27 sono presenti all'interno della banca dati HYDRO.

L'elaborazione dei dati giornalieri di portata media al fine di ottenere le serie storiche annuali di portata al colmo di piena per ciascuna stazione, è stata condotta tramite l'applicazione di uno script in *R Studio®* appositamente realizzato e riportato in Allegato H. In particolare, siccome non tutte le serie storiche annuali sono complete sui dodici mesi, si è reso necessario condurre una procedura di verifica dei dati mirata alla riabilitazione o eliminazione degli anni incompleti. È stato scelto di scartare dal campione tutti gli anni caratterizzati da una percentuale di dati mancanti superiore al 20% in modo tale da consentire la riattivazione di un maggior numero di anni incompleti.

Dal gruppo di 27 stazioni due sono state scartate. La prima per mancanza di corrispondenza tra quanto riportato da Sauquet e quanto riportato sul sito di HYDRO in termini di area (staz. Y6234010), mentre la seconda (staz. X2602010) perché caratterizzata da una serie storica di lunghezza inferiore a 10 anni.

In conclusione, è stata validata corrispondenza di informazioni tra il database ERC e quello HYDRO confrontando la lunghezza delle serie storiche e le caratteristiche morfologiche (area e altitudine della sezione di chiusura).

In definitiva, il dataset francese realizzato riunisce 52 stazioni di misura aventi un sufficiente numero di osservazioni ma con lunghezze temporali delle serie storiche

differenti. Osservando l'istogramma in Figura 1.12 si evince che il maggior numero di osservazioni ricade nell'intervallo temporale compreso tra il 1948 e il 2017.

Le informazioni relative ai bacini considerati, tra le quali le coordinate spaziali, le caratteristiche morfologiche e la lunghezza della serie storica sono riportate in allegato B.

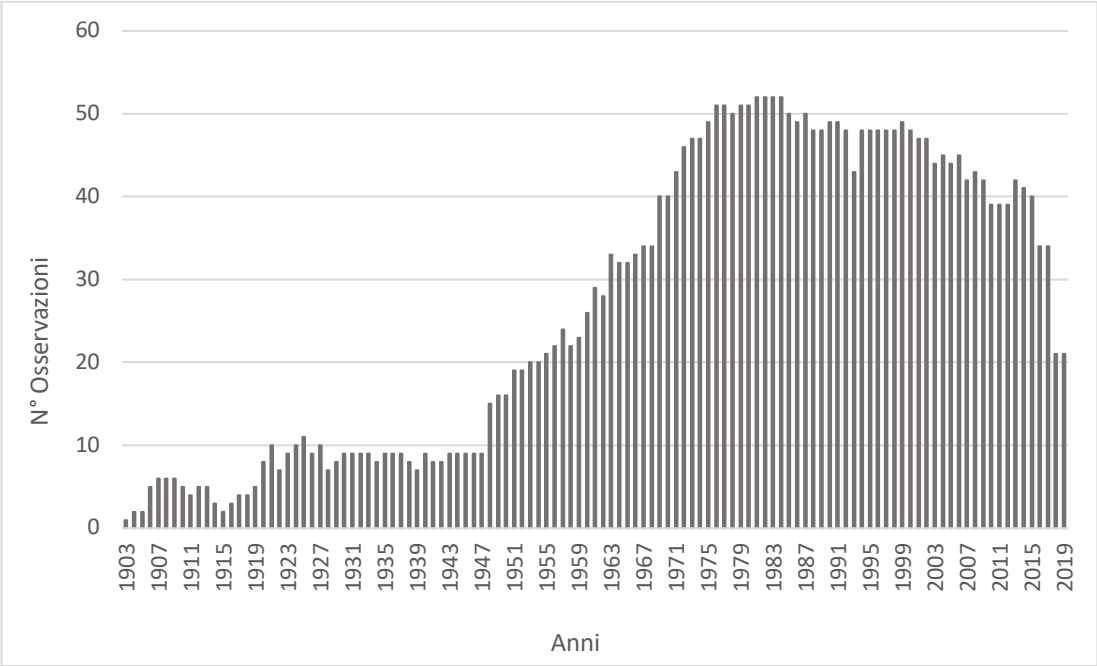


Figura 1.12: Numero di osservazioni delle portate al colmo di piena in funzione degli anni (Francia).

In Figura 1.13 è stata riportata la distribuzione spaziale delle coordinate delle stazioni di misura relative al campione di bacini francesi sul territorio nazionale.

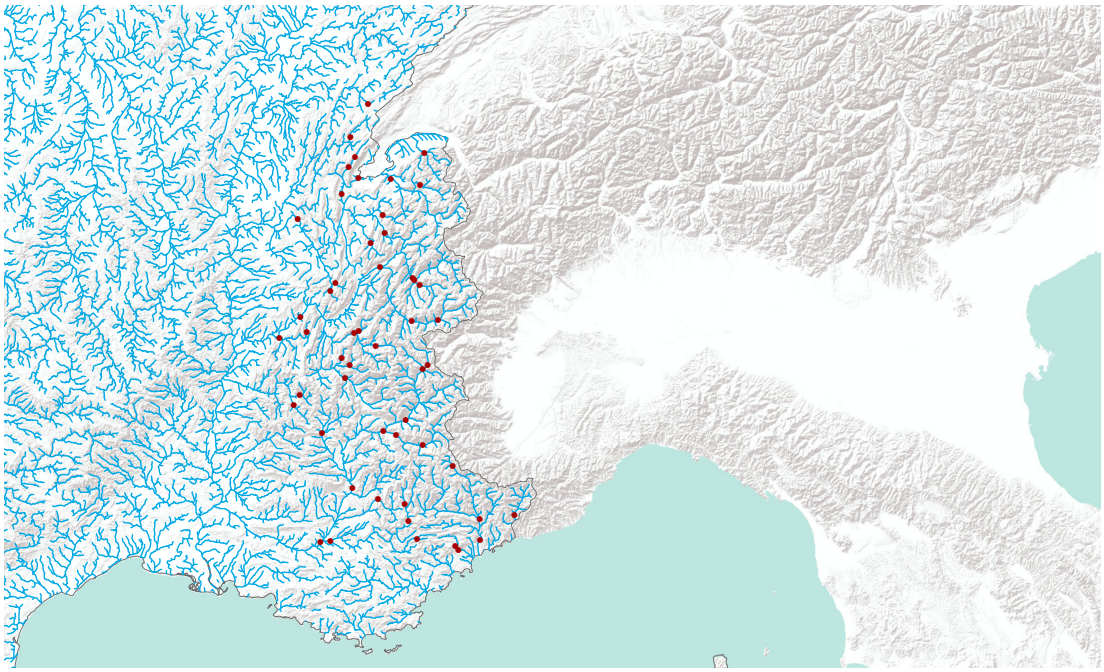


Figura 1.13: Rappresentazione spaziale delle coordinate geografiche delle stazioni di chiusura relative al campione di 52 bacini francesi..

Nei grafici riportati in Figura 1.14 a: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell' area (FR). e in Figura 1.14 b sono stati rappresentati, rispettivamente, gli andamenti della quota minima e della quota media dei bacini in funzione dell'area.

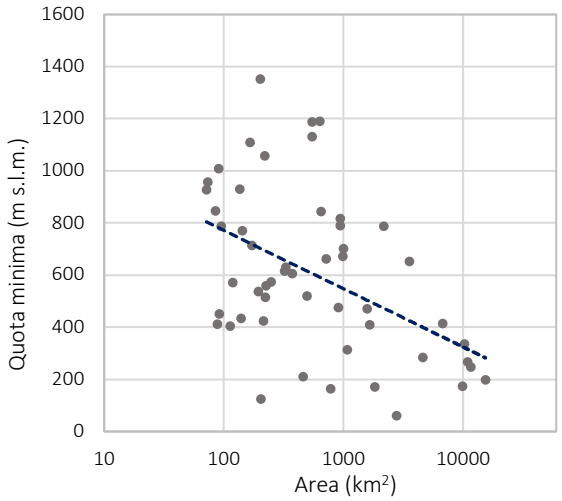


Figura 1.14 a: Rappresentazione della quota minima dei singoli bacini in funzione dell' area (FR).

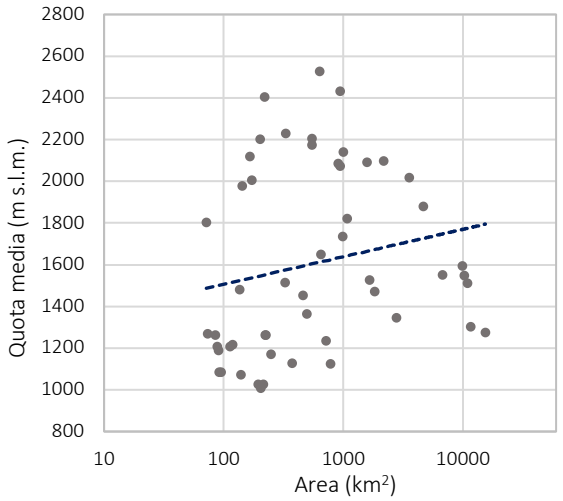


Figura 1.14 b: Rappresentazione della quota media dei singoli bacini in funzione dell' area (FR).

Analogamente a quanto osservato per i bacini austriaci (Figura 1.4 c), si può affermare che, in generale, i bacini francesi con estensione areale maggiore si attestano a quote medie più alte rispetto a quelli di piccole dimensioni (Figura 1.14 b).

Osservando il grafico riportato in Figura 1.14 a è stato possibile individuare un andamento decrescente della quota minima al crescere dell'area.

L'esistenza di un andamento decrescente tra quota minima e area è quindi una caratteristica che può essere confermata per tutto l'arco Alpino.

1.3. ANALISI DEI DATI DELLE MASSIME PIENE ANNUE

I processi e i meccanismi naturali che determinano, in aree montane, la formazione di fenomeni di piena sono fortemente influenzati dalle caratteristiche geo-morfologiche del territorio. La dimensione areale, la forma e le caratteristiche altimetriche dei bacini idrografici sono fattori capaci di condizionare fortemente non solo gli andamenti delle portate ma anche la distribuzione di frequenza delle piene. Le analisi esplorative sulle serie storiche annue si rivelano, per i motivi appena citati, importanti e propedeutiche alla determinazione dei trend delle portate nel tempo (Capitolo 2).

A seguito dell'analisi esplorativa condotta sui parametri morfologici dei bacini costituenti il dataset rappresentativo dell'arco alpino si procede indagando la natura dei rapporti esistenti tra i parametri geo-morfologici caratterizzanti i singoli bacini idrografici e i valori di portata di piena registrati.

1.3.1. Relazione portate al colmo – area del bacino

Inizialmente è stato analizzato il legame esistente tra l'area dei bacini e la rispettiva portata media al colmo. In generale, è stato osservato, per tutti i bacini dell'arco alpino presi in considerazione, un andamento di tipo crescente e ben rappresentato da una linea di tendenza lineare.

I grafici che mettono in relazione l'area e la portata media per i bacini considerati e raggruppati per nazione sono stati riportati nelle Figura 1.15 a, 1.15 b, 1.15 c e 1.15 d.

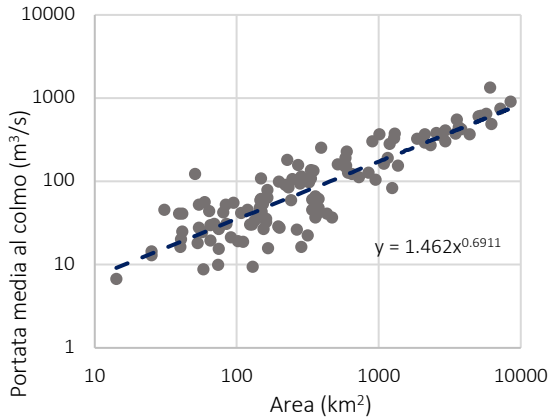


Figura 1.15 a: Relazione tra portata media al colmo e area dei bacini riportata in grafico (bi)logaritmico (AT).

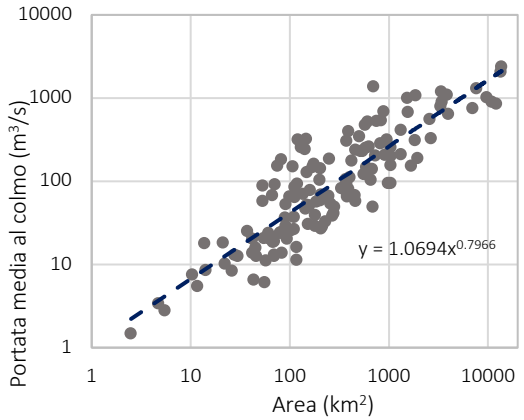


Figura 1.15 b: Relazione tra portata media al colmo e area dei bacini riportata in grafico (bi)logaritmico (ITA).

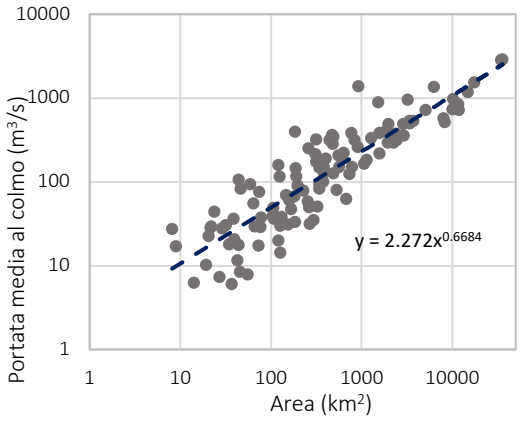


Figura 1.15 c: Relazione tra portata media al colmo e area dei bacini riportata in grafico (bi)logaritmico (CH).

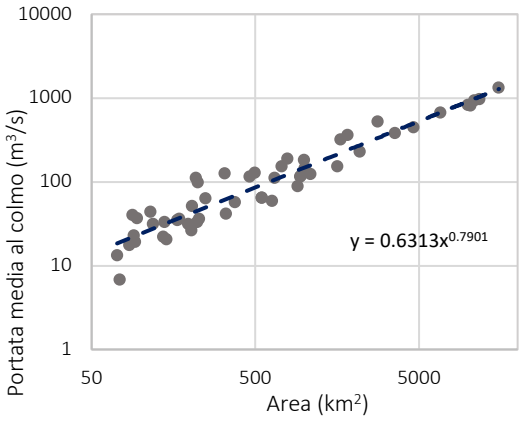


Figura 1.15 d: Relazione tra portata media al colmo e area dei bacini riportata in grafico (bi)logaritmico (FR).

Si riportano di seguito le relazioni ottenute e valide rispettivamente per i bacini austriaci e italiani (Equazioni 1.1 e 1.2), svizzeri e francesi (Equazioni 1.3 e 1.4).

$$\overline{Q_{colmo}} = 1.46 \cdot Area^{0.69} \qquad \text{(Eq. 1.1)}$$

$$\overline{Q_{colmo}} = 1.07 \cdot Area^{0.80} \qquad \text{(Eq. 1.2)}$$

$$\overline{Q_{colmo}} = 2.27 \cdot Area^{0.67} \quad \text{(Eq. 1.3)}$$

$$\overline{Q_{colmo}} = 0.63 \cdot Area^{0.79} \quad \text{(Eq. 1.4)}$$

Attraverso le relazioni individuate è possibile esprimere empiricamente la relazione che intercorre tra la portata al colmo di piena e l'area del bacino idrografico che fa riferimento alla stazione di misurazione. Di conseguenza, è possibile effettuare un paragone tra i quattro gruppi di bacini analizzati.

In particolare, a parità di estensione areale del bacino, la portata al colmo media in Francia è sempre la più bassa. Al contrario, a parità di valore medio di portata al colmo registrato, i bacini con area minore sono italiani e quelli arealmente maggiori sono i francesi.

In generale, si afferma che i fenomeni di piena che si sviluppano sul territorio francese sono di entità più ridotta di quelli che si registrano sulla restante porzione dell'arco alpino.

1.3.2. Relazione portate al colmo – quota media del bacino

Successivamente, è stato sottoposto ad analisi il legame che intercorre tra la portata e le caratteristiche altimetriche del bacino idrografico. Nello specifico, il parametro assunto come descrittore dell'altimetria è la quota media del bacino. Inoltre, siccome è stata individuata una forte influenza del parametro areale sul valore di portata, è stato necessario far riferimento alla portata specifica media al colmo e individuata dal rapporto tra la portata media al colmo e l'area. Procedendo come descritto è stato possibile rimuovere tale dipendenza.

È stata osservata, per tutto il campione di bacini indagati, la presenza di un andamento decrescente e ben descritto da una linea di tendenza lineare della quota media al crescere della portata specifica media al colmo (Figura 1.16 a, 1.16 b, 1.16 c e 1.16 d).

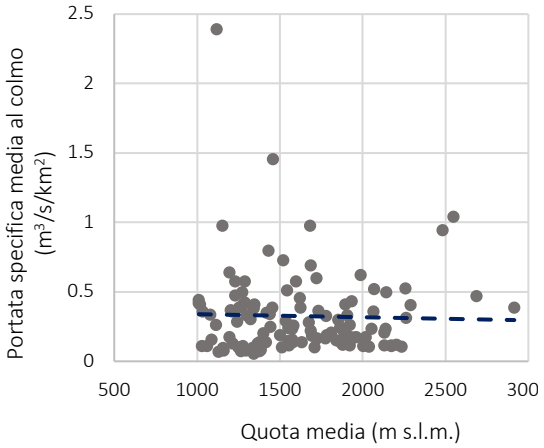


Figura 1.16 a: Relazione tra portata specifica media al colmo e quota media dei bacini (AT).

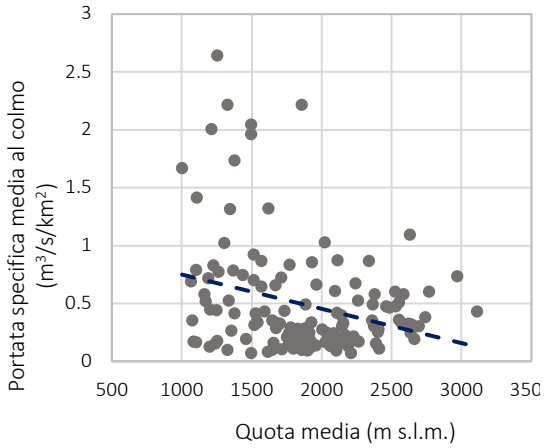


Figura 1.16 b: Relazione tra portata specifica media al colmo e quota media dei bacini (ITA).

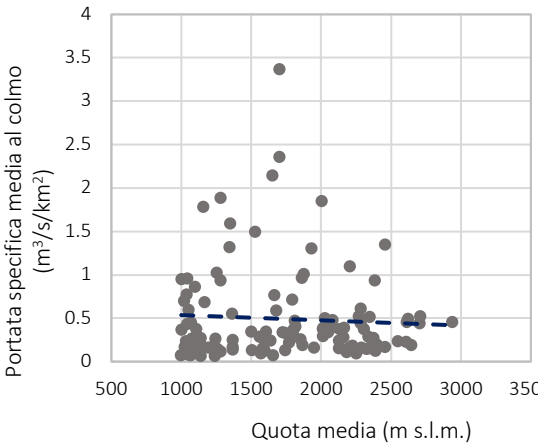


Figura 1.16 c: Relazione tra portata specifica media al colmo e quota media dei bacini (CH).

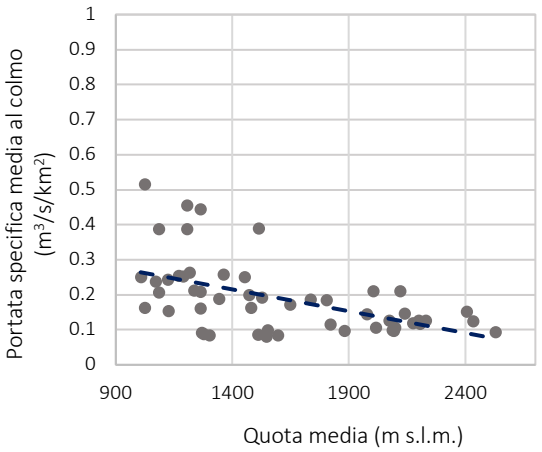


Figura 1.16 d: Relazione tra portata specifica media al colmo e quota media dei bacini (FR).

Il comportamento di carattere decrescente e comune a tutta l'area alpina analizzata, può essere giustificato dalla presenza della neve che ricopre una vasta porzione dei bacini alpini per lunghi periodi dell'anno. Per questo motivo si assiste ad una diminuzione della porzione di superficie contribuente al deflusso e ad un conseguente rallentamento del meccanismo di formazione della piena.

Tuttavia, a seguito di un'osservazione più critica dei grafici riportati in Figura 1.16 è possibile notare come gli andamenti in Italia e in Francia siano molto più marcati rispetto

a quelli austriaci e svizzeri, che invece appaiono lievemente decrescenti. La spiegazione di tale differenza in comportamento è, con grande probabilità, di natura climatica. L'Austria e la Svizzera, trovandosi a latitudini maggiori e non essendo soggette all'influenza del mare, registrano, durante l'anno, temperature in media più basse rispetto a quelle misurate sui bacini italiani e francesi. In corrispondenza dei bacini italiani e francesi, pertanto l'influenza della neve può essere tenuta in conto solitamente in corrispondenza delle vette più alte, mentre per la restante porzione dell'arco alpino, dove la copertura nivale permane al suolo per un periodo di tempo più esteso, tale influenza è estesa ad aree maggiori.

Si sottolinea la presenza di altri fattori, quali la la riduzione della precipitazione liquida all'aumentare della quota, in grado di modificare l'entità delle portate registrate.

1.3.3. Relazione coefficiente di variazione – aree e quote dei bacini

In ultima analisi è stato analizzato l'andamento che il coefficiente di variazione (CV) dei valori di portata al colmo assume se confrontato con l'area e la quota media del bacino.

Il CV, definito dal rapporto tra la deviazione standard e il valor medio delle portate al colmo, rappresenta uno dei parametri chiave nel campo delle analisi regionali delle piene. In particolare, questo parametro statistico controlla la forma della distribuzione di frequenza delle piene e costituisce una misura proporzionale della variabilità rispetto alla media. Il legame tra il coefficiente di variazione e l'area del bacino è stato ampiamente studiato in un'analisi precedente a questo studio (*Blöschl and Sivapalan, 1997*) in occasione della quale era stato dimostrato un andamento decrescente del CV all'aumentare dell'area.

Tale comportamento è stato nuovamente verificato per tutto l'arco alpino (Figura 1.17).

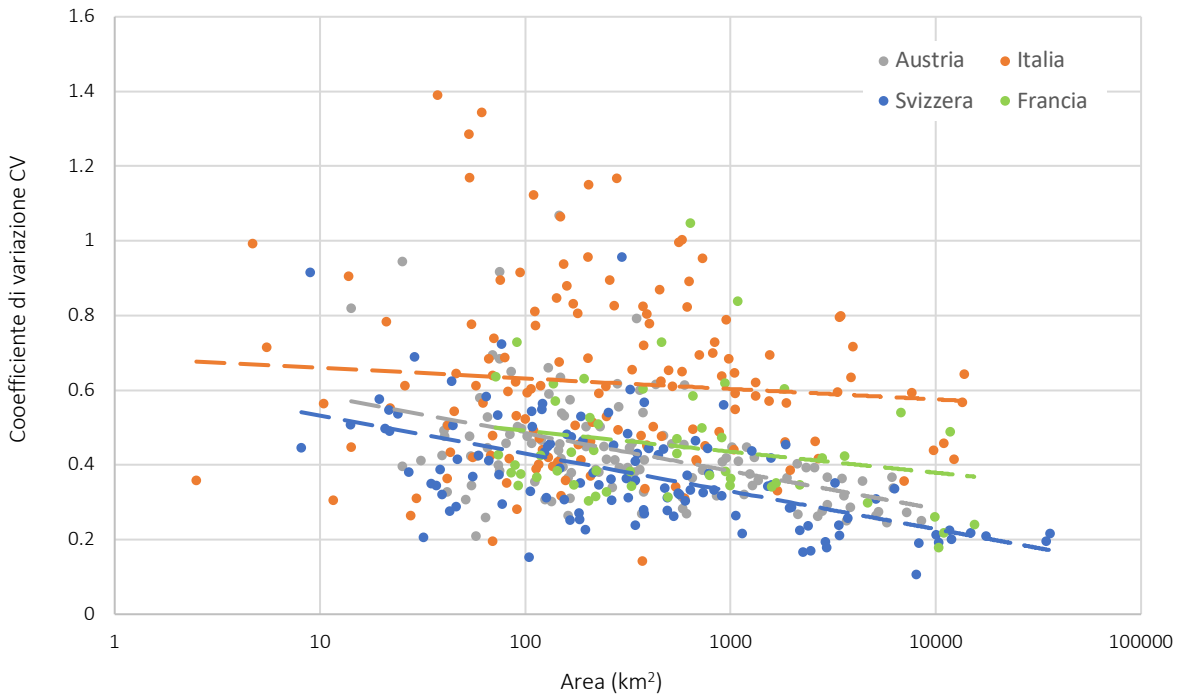


Figura 1.17: Relazione tra il coefficiente di variazione e l'area del bacino per l'Austria (in grigio), l'Italia (in arancione), la Svizzera (in blu) e la Francia (in Verde).

Si riportano nelle Figura 1.18 a, 1.18 b, 1.18 c e 1.18 d i rapporti tra il CV e la quota media di ciascuno dei bacini considerati. Come è possibile osservare, il coefficiente di variazione in funzione dell'area assume, per le coppie di bacini italiani e francesi e austriaci e svizzeri, valori del tutto confrontabili. Al contrario, analizzando il legame tra CV e quota media dei bacini, si osserva che la similitudine non è mantenuta e i trend mostrano segno opposto.

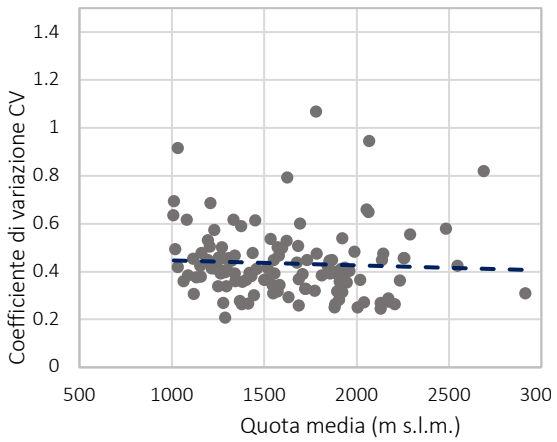


Figura 1.18 a: Relazione tra il coefficiente di variazione e la quota media del bacino (AT).

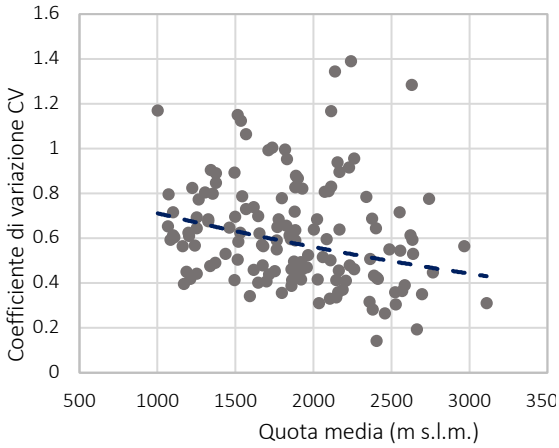


Figura 1.18 b: Relazione tra il coefficiente di variazione e la quota media del bacino (ITA).

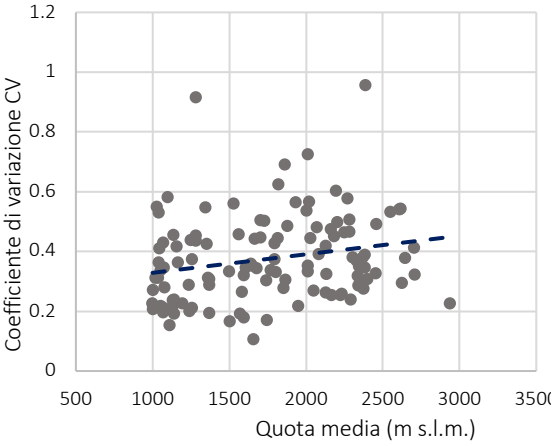


Figura 1.18 c: Relazione tra il coefficiente di variazione e la quota media del bacino (CH).

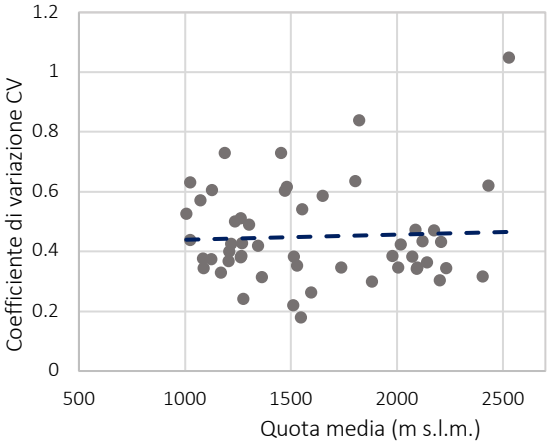


Figura 1.18 d: Relazione tra il coefficiente di variazione e la quota media del bacino (FR).

Infatti, risulta opportuno ricordare che la piena è definita come il prodotto di diversi meccanismi e fenomeni che si manifestano sul bacino, in quali danno luogo a un diverso valore di portata in ragione delle caratteristiche specifiche del singolo bacino.

Fenomeni come le precipitazioni atmosferiche e la fusione nivale, estremamente variabile nel tempo e nello spazio, influenzano il CV. Dunque, il legame tra coefficiente di variazione è quota risulta diverso da quello tra coefficiente di variazione e area.

2. TREND TEMPORALI NELLE SERIE DI PORTATE DI PIENA

La prima analisi condotta rappresenta un tentativo di esaminare le evidenze empiriche di incremento temporale delle portate di piena in montagna che il riscaldamento globale sembra aver causato su questi fenomeni (*Blöeschl et al., 2019*). In particolare, è stato condotto un tentativo di verifica della presenza di fenomeni di incremento temporale dei valori di portata al colmo in corrispondenza dei bacini dell'arco alpino descritti in dettaglio al Capitolo 1. Tale valutazione è stata sviluppata, con l'obiettivo di individuare la presenza di trend, applicando lo stimatore Theil – Sen alle singole serie. Successivamente, è stato applicato il metodo di regressione sui quantili alle regioni con trend omogenei per i picchi annuali.

Nel presente capitolo si fornisce una descrizione sintetica dei metodi di regressione impiegati e delle fasi operative seguite per la loro applicazione. Infine, vengono illustrati e commentati i principali risultati ottenuti.

2.1. MODELLI DI REGRESSIONE

2.1.1. Stimatore Theil – Sen

Lo stimatore Theil – Sen (Theil H., P. Sen, 1950 - 1968), detto anche Sen's Slope, è un metodo statistico di tipo non parametrico utilizzato per le operazioni di interpolazione lineare in un campione di osservazioni.

Lo stimatore Sen's Slope di un campione di punti (x_i, y_i) è definito come la mediana, m, dei valori di pendenza determinati da tutte le possibili rette passanti per tutte le coppie di punti del campione come:

$$m = (y_j - y_i)/(x_j - x_i) \tag{2.1}$$

La stima fornita da questo metodo risulta molto più robusta di quella che si otterrebbe applicando al campione una regressione lineare semplice (OLS Ordinary Least Squares regression) in quanto risulta essere meno sensibile alla presenza di outliers.

Nel campo idrologico, lo stimatore Sen's Slope viene impiegato per individuare la presenza di trend temporali all'interno dei campioni studiati. Ovviamente, valori di m negativi indicano la presenza di un andamento di tipo decrescente mentre valori positivi corrispondono al verificarsi di un trend di tipo positivo.

La significatività statistica dei trend individuati utilizzando lo stimatore Theil -Sen è stata successivamente verificata ricorrendo all'utilizzo del test di Mann Kendall.

Il test di Mann Kendall (anche chiamato M-K test) viene impiegato per analizzare la consistenza dell'aumento (o diminuzione) di una variabile nel tempo (i.e., di un trend). È un test di tipo non parametrico, il che significa che non necessita di assunzioni sulla distribuzione di probabilità della variabile stessa o sulla linearità della tendenza (i.e., del trend), ma la variabile non deve essere autocorrelata nel tempo. L'ipotesi nulla (H_0) del M-K test è che non vi siano tendenze monotoniche nella serie. L'ipotesi alternativa, H_1, è che esista una tendenza positiva o negativa.

Il M-K test analizza la differenza nei segni tra valori precedenti e successivi dei dati nel tempo quindi, nel caso in cui fosse presente una tendenza, i valori dei segni tenderanno ad aumentare o diminuire costantemente. Ciascun valore del campione viene confrontato con il valore che lo precede nella serie temporale, il che risulta in un totale di $n(n-1)/2$ coppie di dati, dove "n" è il numero di osservazioni.

La statistica del test di Mann – Kendall S_{MK} è formulata come segue:

$$S_{MK} = \sum_{k-1}^{n-1} \sum_{j-k-1}^{n} sgn(x_j - x_k) \tag{2.2}$$

$$\text{con} \quad sgn(\theta) = \begin{cases} +1 & se\ \theta > 0 \\ 0 & se\ \theta = 0 \\ -1 & se\ \theta < 0 \end{cases}$$

Sotto l'ipotesi di variabili indipendenti e casualmente distribuite, quando n ≥ 8 (con n dimensione del campione), la statistica S è normalmente distribuita con media pari a zero e varianza:

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{2.3}$$

Ne consegue che la statistica standardizzata Z_{MK} segue la distribuzione normale standard e può essere espressa come:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & se\ S > 0 \\ 0 & se\ S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma} & se\ S < 0 \end{cases} \tag{2.4}$$

Per testare l'ipotesi di assenza del trend, ipotesi nulla H_0, contro l'ipotesi di esistenza di un trend positivo (test a una coda) con significatività α (i.e., la probabilità accettabile che l'ipotesi nulla venga erroneamente rigettata), H_0 viene rigettata quando $Z_{MK} \geq Z_{1-\alpha}$, dove $Z_{1-\alpha}$ è il $100(1-\alpha)^{esimo}$ percentile della distribuzione normale standard. Se invece, si vuole testare l'ipotesi di assenza del trend contro l'ipotesi di esistenza di un trend negativo (altro test a una coda), H_0 viene rigettata quando $Z_{MK} \leq -Z_{1-\alpha}$.

Se l'ipotesi alternativa è l'esistenza di un trend positivo o negativo (test a due code), H_0 viene rigettata quando $|Z_{MK}| \geq Z_{1-\alpha/2}$.

2.1.2. Regressione sui quantili

Si definisce (*Koenker, R. and Portnoy, S.: Quantile Regression,* 1999) il quantile τ di una variabile di risposta Y il numero reale y_τ tale che:

$$Pr\ (Y \leq\ y_\tau) \geq \tau \quad e \quad Pr\ (Y \geq\ y_\tau) \geq 1-\tau \tag{2.5}$$

Se Y è una variabile di tipo continuo le probabilità Pr che compaiono nell'equazione 2.5 coincidono e il quantile risulta avere una definizione unica. Diversamente, se la variabile casuale Y è di natura discreta, le due probabilità non coincidendo definiscono un intervallo chiuso. La definizione univoca della funzione quantile è convenzionalmente il più piccolo elemento all'interno dell'intervallo che definisce le soluzioni possibili. Di conseguenza, si dice funzione quantile di una variabile di risposta Y una applicazione $\tau \rightarrow F_Y^{-1}(\tau)$ in grado di associare un opportuno quantile della variabile casuale a $0 \leq \tau \leq 1$ ed è definita come:

$$Q_Y(\tau) = F_Y^{-1}(\tau) = \inf \{y \in \mathbb{R} : F_Y(y) \geq \tau\}, \qquad per\ \tau \geq 0 \qquad (2.6)$$

Dove F(·) rappresenta la funzione di ripartizione della variabile dipendente Y.

In definitiva, la funzione quantile è la funzione capace di legare i possibili valori assunti da una variabile casuale Y alle probabilità o frequenze con cui tali valori possono essere osservati. Per ogni τ la funzione quantile esprime il valore della variabile casuale Y alla quale è associata un determinato valore di probabilità p che si realizzi un'osservazione inferiore o uguale a Y oppure, al contrario, la probabilità (*1 - p*) che si registri un'osservazione di valore superiore a quello assunto da Y.

Nella maggior parte delle applicazioni la distribuzione di una variabile casuale Y viene descritta a partire da alcuni quantili tipici, tra questi si sottolineano il primo quartile $y_{0.25}$, la mediana $y_{0\text{-}5}$, il terzo quartile $y_{0.75}$ e, posizionato sulla coda destra della distribuzione il novantacinquesimo percentile $y_{0\text{-}95}$.

Per qualunque $0 < \tau < 1$ è possibile definire la "funzione di controllo" lineare a tratti, della quale sono riportati due esempi di rappresentazione in Figura 2.1 e in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, come:

$$\rho_\tau(y) = |y\left(\tau - I(y < 0)\right)| \qquad (2.7)$$

Dove I è una variabile binaria che assume valore 0 o 1 a seconda che sia soddisfatta o meno una data condizione. Nelle figure riportate di seguito si può notare invece la differente

forma assunta dalla funzione di controllo nel caso si considerino rispettivamente quantili piccoli (inferiori alla mediana, Figura 2.1) o quantili elevati (superiori alla mediana, Figura 2.2).

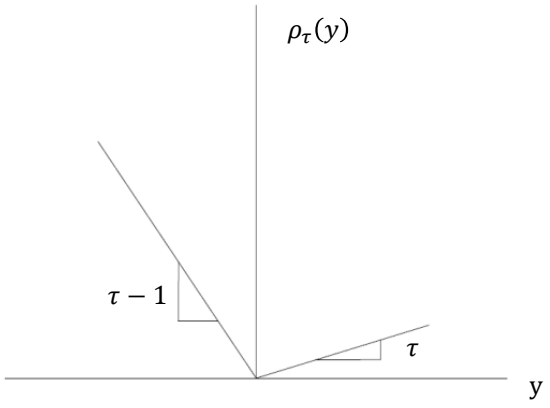


Figura 2.1: Funzione di controllo rappresentativa di piccoli quantili (inferiori alla mediana, quantile 0.5).

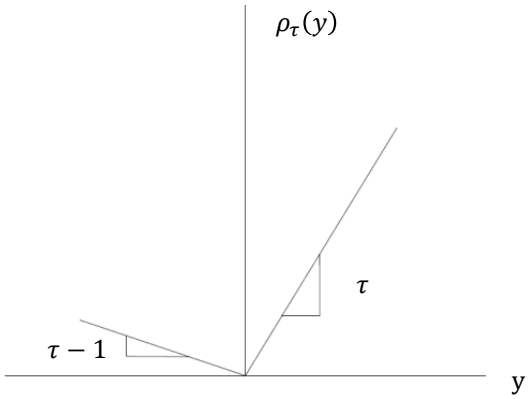


Figura 2.2: Funzione di controllo rappresentativa di grandi quantili (superiori alla mediana, quantile 0.5).

Analogamente al caso della media campionaria, che viene definita come soluzione del problema di minimizzazione della somma degli scarti al quadrato, si può definire il singolo quantile campionario $\xi(\tau)$ come soluzione del seguente problema di minimo:

$$\xi(\tau) = \min_{\xi \epsilon \mathbb{R}} \sum \rho_\tau(y_i - \xi) \qquad (2.8)$$

Ad esempio, si definisce la mediana come soluzione del problema di minimizzazione e sottolineando che in questo caso la funzione di controllo assume una forma di tipo simmetrico. Tale simmetria è tale che l'operazione di minimizzazione della somma degli scarti in valore assoluto deve essere tale che il numero di osservazioni al di sotto della mediana sia pari al numero di osservazioni poste al di sopra.

Minimizzando la funzione $\rho_\tau(y_i - \xi)$ rispetto al valore ottimale ignoto ξ si ottengono le soluzioni $\xi(\tau)$ tra le quali la più piccola corrisponde alla definizione di $Q(\tau)$ precedentemente illustrata.

In conclusione, come il metodo di stima della media vista come minimo di $(y_i - \mu)^2$ può essere applicato per la stima della media lineare condizionata $E(Y|X = x) = x'\beta$ risolvendo la seguente equazione 2.9.

$$\hat{\beta}(\tau) = argmin_{\beta \epsilon \mathbb{R}^p} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \mu(x_i, \beta))^2 \qquad (2.9)$$

La funzione quantile lineare condizionata $Q_Y(\tau|X = x) = x'\beta(\tau)$ può essere stimata risolvendo:

$$\xi(\tau) = \underset{\beta \epsilon \mathbb{R}^p}{min} \sum_{i=1}^{n} \rho_\tau(y_i - \xi(x_i, \beta)) \qquad (2.10)$$

Il modello di regressione lineare con il metodo dei minimi quadrati fornisce una stima della media condizionata della variabile risposta Y. Per poter descrivere in modo più completo la relazione di dipendenza che intercorre tra la variabile di risposta Y e la variabile predittiva X si ricorre all'utilizzo delle regressioni lineari per quantili. Si ricorda che il coefficiente angolare della regressione lineare classica rappresenta l'alterazione operata sulla variabile di risposta e provocata da una variazione unitaria della variabile predittiva. Analogamente, il parametro della regressione per quantili fornisce una stima della mutazione della variabile dipendente Y per uno specifico quantile e determinata da una variazione unitaria di X.

L'applicazione dei modelli di regressione lineare per quantili è di grande rilevanza in campo idrologico. Più precisamente, il vantaggio risultante dall'applicazione di questi modelli è consente l'estensione del campo di applicazione alle serie caratterizzate da osservazioni estreme importanti, ad esempio le serie idrologiche dove gli eventi estremi sono di notevole interesse.

Se si assume che la funzione parametrica $\xi(x_i,\beta)$ assuma la forma di una funzione lineare, il problema di minimizzazione a partire dal quale si ottengono le stime dei parametri può essere risolto in modo efficace applicando un metodo di programmazione lineare (Buchinsky, 1998). Di conseguenza, il modello di regressione quantile lineare può essere espresso come:

$$Y = x'\beta(\tau) + u(\tau) \qquad (2.11)$$

Dove:

Y è la variabile risposta;

- x' un vettore di k variabili esplicative $\{X_1, X_2, \dots X_k\}$;
- $\beta(\tau)$ è il vettore dei parametri;
- $u(\tau)$ il termine di errore con τ = 1, ...99.

La relazione 2.11 è in grado di mostrare come la variabile dipendente Y possa essere espressa come la somma di una componente deterministica e di una componente casuale, rispettivamente rappresentate dal termine $x'\beta(\tau)$ e dal termine di errore $u(\tau)$ che inchiude al suo interno tutti i fattori che influenzano la variabile di risposta ma che non sono osservati o non possono essere controllati.

Il τ – esimo quantile della variabile di risposta Y e dipendente dal vettore delle variabili predittive X può essere espresso come:

$$Q_Y(\tau|x) = x'\beta(\tau) \tag{2.12}$$

Dalla relazione appena illustrata (eq. 2.12) si osserva che il vettore dei parametri β(τ) è legato al valore del quantile condizionato preso in considerazione e può essere stimato tramite la risoluzione di un problema di minimo:

$$\hat{\beta}(\tau) = \min_{\beta \epsilon \mathbb{R}^p} \sum_{i=1}^{n} \rho_\tau(y_i - x_i'\beta(\tau)) \tag{2.13}$$

Esplicitando l'equazione 2.13 per sottolineare la relazione lineare ipotizzata esistente tra il quantile τ della variabile di risposta e le p variabili predittive, si ottiene:

$$Q_Y(\tau|x) = \beta_0(\tau) + x_{i1}\,\beta_1(\tau) + \cdots + x_{ip}\,\beta_p(\tau) \qquad i = 1, \dots, n \tag{2.14}$$

2.2. APPLICAZIONE DEI MODELLI DI TREND SU SINGOLA SERIE STORICA

Inizialmente, con l'obiettivo finale di identificare la presenza di trend temporali nelle serie storiche di portata al colmo di piena riferite ai bacini dell'arco alpino, è stato studiato il trend delle piene medie.

In particolare, per le serie storiche riferite ai singoli bacini è stato calcolato lo stimatore Theil – Sen al fine di identificare la presenza di un andamento monotonico e la sua natura (crescente o decrescente). Il valore assunto dallo stimatore, m, rappresenta la pendenza della linea di regressione che interpola le osservazioni del singolo campione. Il calcolo dello stimatore e l'applicazione del test di Mann Kendall per la verifica della significatività statistica del risultato sono stati eseguiti in RStudio® utilizzando le funzioni riportate in Allegato H.

L'applicazione del metodo di regressione al dataset di bacini alpini è stata condotta considerando:

- Variabile di risposta Y: è la portata al colmo di piena specifica $m^3/s/km^2$ (normalizzata sull'area del corrispondente bacino) in quanto c'è disomogeneità dei dati perché provenienti da bacini diversi;
- Variabile predittiva: è il tempo.

Per ciascun bacino dell'arco alpino è stato calcolato il valore dello stimatore m e la statistica test Z_{MK}. Per verificare la significatività statistica del risultato ottenuto a seguito dell'applicazione del test di M-K, in linea teorica, sarebbe necessario consultare le tabelle che riportano per le combinazioni Z-α il valore di soglia di rifiuto. È normale pratica, tuttavia, per semplificare la procedura interpretativa, calcolare il *p-value*, valore di probabilità associato a tale statistica. In questo modo, scelto il livello di significatività α si ricava il valore di *p-value* al di sotto del quale il risultato del test è statisticamente significativo. È stato scelto un livello di significatività α pari al 5%, di conseguenza, l'ipotesi nulla H_0 viene rigettata quando il valore P di probabilità di rigettare erroneamente l'ipotesi nulla risulta essere inferiore a 0.05.

Dal momento che, per i bacini francesi, gli shapefile associati alle singole serie storiche non erano disponibili è stato necessario procedere alla loro delimitazione geografica. L'operazione di delimitazione è stata condotta in ArcGIS® sfruttando gli strumenti dell'"*Hydrology toolset"* necessari per la modellazione dei flussi idrici sulle superfici. Nello specifico, il DTM con risoluzione a 20m è stato elaborato, per rimuovere eventuali imperfezioni, usando lo strumento "*Fill"*, quindi, con il tool "*Flow Direction"* è stato creato il raster della direzione di deflusso. Infine, usando il comando "*Watershed*", una volta definiti il raster della direzione di deflusso e le coordinate della sezione di chiusura è stato possibile ricavare la forma del bacino.

Tabella 2.1: Risultati complessivi del test del trend applicato alle singole serie storiche (bacini costituenti il campione dell'arco alpino).

Segno trend	Test statisticamente significativi	Test statisticamente non-significativi
Positivo	56	171
Negativo	49	146
Assenza di trend	0	6

In Tabella 2.1: Risultati complessivi del test del trend applicato alle singole serie storiche (bacini costituenti il campione dell'arco alpino). si riporta uno schema riassuntivo dei risultati ottenuti mentre in Allegato C sono stati riportati, per ogni singolo bacino testato il valore dello stimatore m, della statistica del test di Mann-Kendall Z_{MK} e del *p-value* associato a tale statistica.

Per facilitare la visualizzazione dei risultati è stata realizzata una mappa nella quale ciascun bacino idrografico viene rappresentato sulla base del risultato ad esso associato (Figura 2.3).

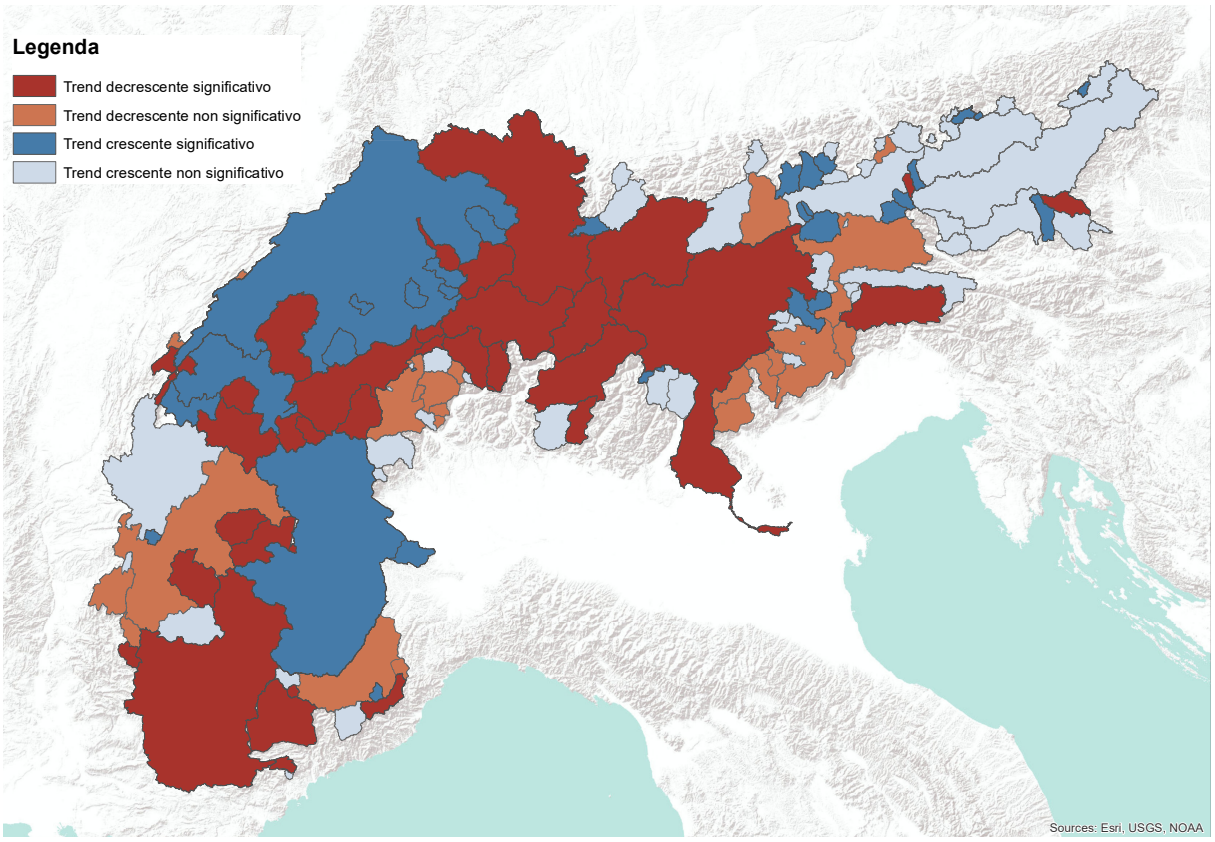


Figura 2.3: Rappresentazione su mappa dei risultati relativi alla presenza di trend ottenuti calcolando lo stimatore Theil - Sen e valutandone la significatività con il test di Mann-Kendall.

Osservando la Figura 2.3 si osserva come, in linea generale, le aree caratterizzate da trend dello stesso segno sono tra di loro vicine. In queste condizioni si parla di coerenza spaziale dei dati. Inoltre, è stato possibile notare che i bacini caratterizzati da trend con andamento crescente e statisticamente significativi (in blu in Figura 2.4) presentano un'estensione areale mediamente superiore rispetto alla restante parte del campione (Tabella 2.2). Tale categoria di bacini, inoltre, è quella che, tra le altre, si distribuisce spazialmente in un'area maggiormente definita e collocata in corrispondenza delle cime più elevate dell'arco alpino.

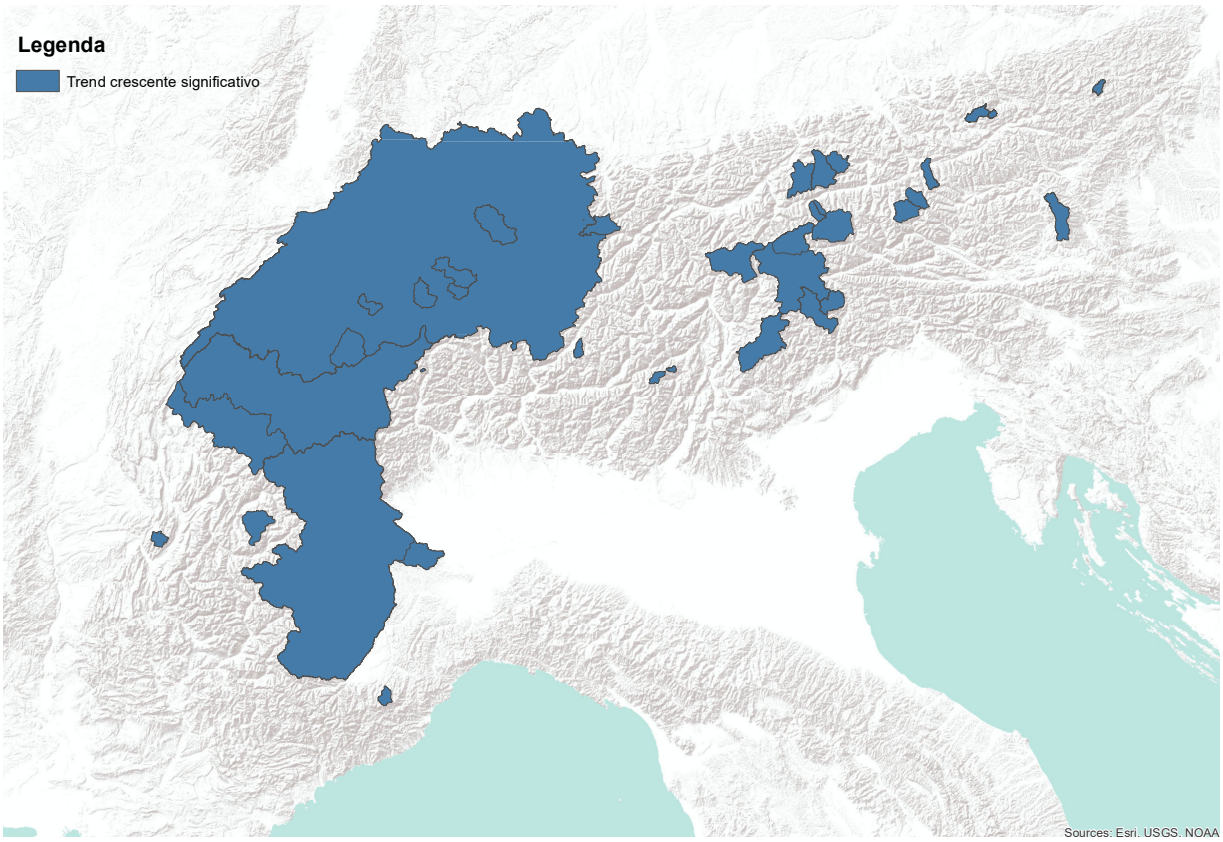


Figura 2.4: Rappresentazione su mappa dei bacini che mostrano trend temporali analoghi.

Tabella 2.2: Media dei valori di Quota media e Area dei bacini appartenenti alle quattro categorie di trend: Trend decrescente significativo, Trend decrescente non significativo, Trend crescente significativo e Trend crescente non significativo.

	Quota media (m s.l.m.)	Area (km^2)
Trend decrescente, test significativo	1794.6	1845.1
Trend decrescente, test non significativo	1806.7	1218.4
Trend crescente, test significativo	1712.0	2663.2
Trend crescente, test non significativo	1683.9	1012.3

Successivamente, risultati ottenuti a seguito dell'applicazione del test Sen's Slope al campione di bacini dell'arco alpino sono stati rappresentati in modo alternativo rispetto a quello proposto in Figura 2.3. Nello specifico, i bacini sono stati colorati sulla base del

valore “% of mean per decade” ossia il valore di aumento o diminuzione della portata media nel corso di un decennio.

Questo tipo di rappresentazione (Figura 2.5) ha consentito il confronto dei risultati ottenuti con quelli che erano già stati individuati da Blöschl et. al., 2019.

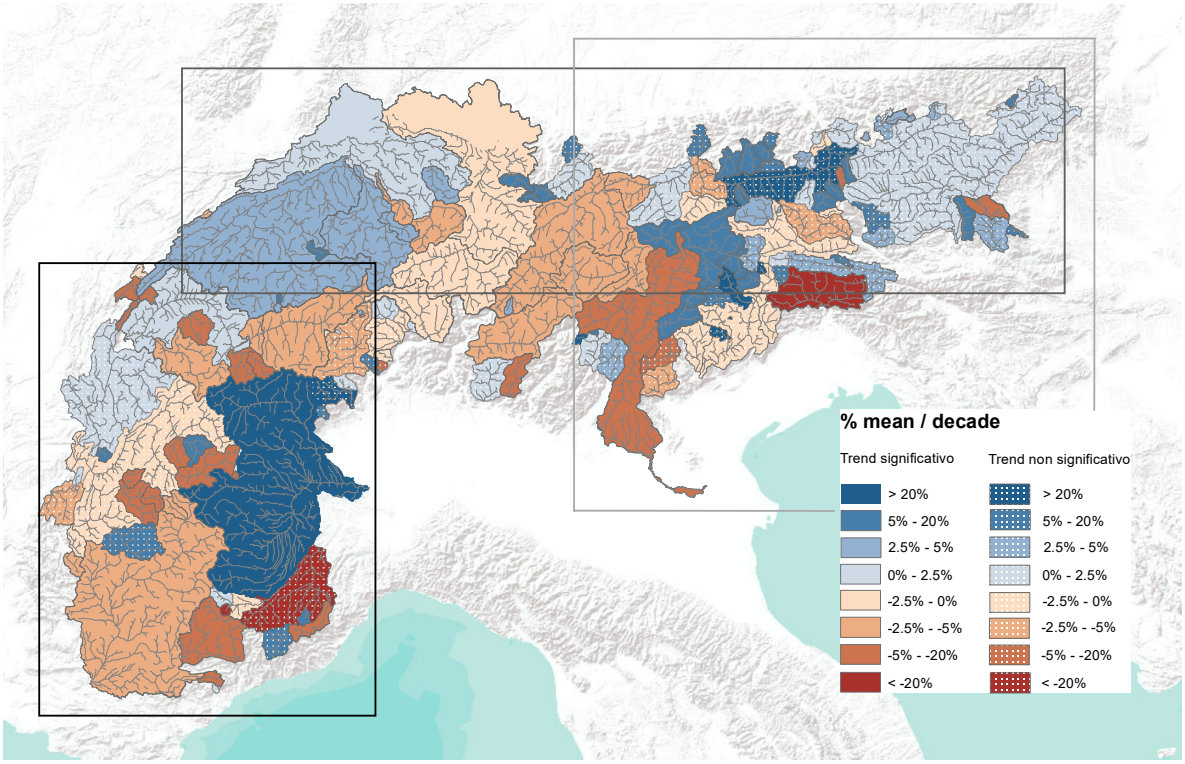


Figura 2.5: Trend relativi alle portate medie sull’arco alpino (intervallo temporale: 1951-2007). Il colore blu indica andamenti crescenti, il rosso andamenti decrescenti. I riquadri sui toni del nero rappresentano le aree sulle quali è stata condotta l’analisi (fine del paragrafo)

In particolare, i risultati ottenuti in sede di studio per l’arco alpino, si sono rivelati consistenti con quelli individuati da Blöschl e che mostravano la presenza di trend crescenti concentrati nelle zone aventi quota maggiore e decrescenti nelle zone più pianeggianti. Osservando la Figura 2.5 si notano però alcune differenze rispetto agli andamenti individuati nel paper di Nature (Blöschl et. al., 2019) ossia un maggior numero di trend decrescenti nella parte centrale delle Alpi e un maggior numero di trend crescenti localizzati in corrispondenza della Pianura Padana piemontese. L’analisi condotta in questa sede, tuttavia, annovera più bacini di quelli che erano stati considerati in precedenza e considera unicamente bacini con altitudine media superiore ai 1000 m s.l.m..

Per i motivi appena citati la presente analisi ha consentito di raggiungere un livello di conoscenza dei trend temporali più approfondito.

A seguito dell'individuazione dei trend relativi alle piene medie sui bacini alpini che costituiscono il dataset alpino l'attenzione è stata focalizzata sugli eventi più estremi e ben descritti dai quantili più elevati (0.75, 0.95). Il metodo adottato per indagare l'andamento di quantili prefissati è la regressione lineare semplice per quantili (eq. 2.15).

$$Q_Y(\tau|x) = \beta_0(\tau) + x_{i1}\,\beta_1(\tau) \qquad (2.15)$$

L'applicazione del modello di regressione semplice per quantili alle serie storiche delle portate specifiche al colmo di piena registrate nell'ambito panalpino è stata condotta utilizzando il pacchetto "*quantreg*" implementato all'interno del software RStudio®.

La stima della τ-esima funzione quantile condizionale della variabile di risposta è fornita dal comando "*rq*" (quantile regression). L'analisi dei trend nelle serie storiche di portata indagate è stata sviluppata prendendo in considerazione quattro valori del quantile τ, rispettivamente 0.25, 0.50, 0.75 e 0.95.

Si riporta di seguito un estratto del codice impiegato per l'implementazione del modello di regressione lineare semplice per quantili.

```
quantili <- c(0.25,0.50,0.75,0.95)
…
quantile_regression[[i]] <- rq(portata~tempo,tau=quantili[i])
intercept <- as.numeric(quantile_regression[[i]]
                        ["coefficients"][[1]][1])
coefficiente_angolare[i] <- as.numeric(quantile_regression[[i]]
                                       ["coefficients"][[1]][2])
```

Nell'ambito degli studi volti alla ricerca dei trend a partire da una serie di osservazioni è necessario verificare la significatività della retta di regressione accertando l'esistenza di una relazione lineare tra le variabili considerate. A tal fine è stato applicato il Test di Student, in quanto basato sul sistema di ipotesi H_0 e H_1 dove:

$$\begin{cases} H_0: \beta_{1,0} = 0 \\ H_1: \beta_{1,1} = \beta_1 \end{cases}$$

Dove $\beta_{1,0}$ è il valore di $\beta_1$sotto l'ipotesi nulla H_0 e $\beta_{1,1}$ è il valore di $\beta_1$sotto l'ipotesi alternativa H_1.

La variabile test di Student è definita come rapporto tra la differenza tra il valore del coefficiente angolare della retta di regressione stimato e il valore sotto l'ipotesi nulla ($\beta_{1,0} = 0$) ed il suo errore standard. Il test prevede il confronto tra il valore test *t di Student* e la soglia critica. Tale soglia viene individuata a partire dal livello di significatività scelto. Nel caso in esame si è assunto un livello di significatività α pari al 95%, di conseguenza l'ipotesi nulla è rifiutata per valori superiori a 1.96, o *p-value* minori o uguali a 0.05.

$$Se \begin{cases} t = \left|\frac{coefficiente\ angolare - \beta_{1,0}}{errore\ standard}\right| > 1.96 & H_0 \text{ è } rifiutata\ (caso\ 1) \\ t = \left|\frac{coefficiente\ angolare - \beta_{1,0}}{errore\ standard}\right| < 1.96 & H_0\ non \text{ è } rifiutata\ (caso\ 2) \end{cases}$$

Quando l'ipotesi nulla è rifiutata (caso 1) la variabile è statisticamente significativa e di conseguenza si può confermare la presenza di trend.

Inizialmente, il modello di regressione lineare per quantili è stato applicato all'intero arco alpino. Per eseguire una analisi accurata è importante avere un numero di osservazioni sufficientemente elevato. Per questo motivo si selezionano solo i dati appartenenti all'arco temporale che ha inizio nel 1951 e termina nel 2007. La consistenza dei dati nel periodo scelto infatti è notevole, in questo modo si garantisce una maggiore robustezza dei risultati.

I risultati derivanti dall'operazione appena descritta sono riportati in Tabella 2.3 dove per ciascun quantile considerato è stato riportato il valore di coefficiente angolare, il valore di errore standard e il valore della variabile test di Student, *t*.

In Figura 2.6 si riportano i valori di portata specifica in funzione dei relativi anni di occorrenza e le quattro rette di regressione ottenute per i quantili, rispettivamente 0.25, 0.5, 0.75 e 0.95.

Tabella 2.3: Regressione per quantili e risultati del Test di Student riferiti all'interno arco alpino (Italia, Francia, Svizzera e Austria). Intervallo temporale considerato: 1951-2007.

Quantile	Coefficiente angolare (m)	Errore standard (e)	Variabile test di student (t)	Esito test
0.25	-0.04	0.03	1.35	Non Superato
0.5	-0.03	0.06	0.57	Non superato
0.75	0.58	0.11	5.37	Superato
0.95	3.67	0.59	6.26	Superato

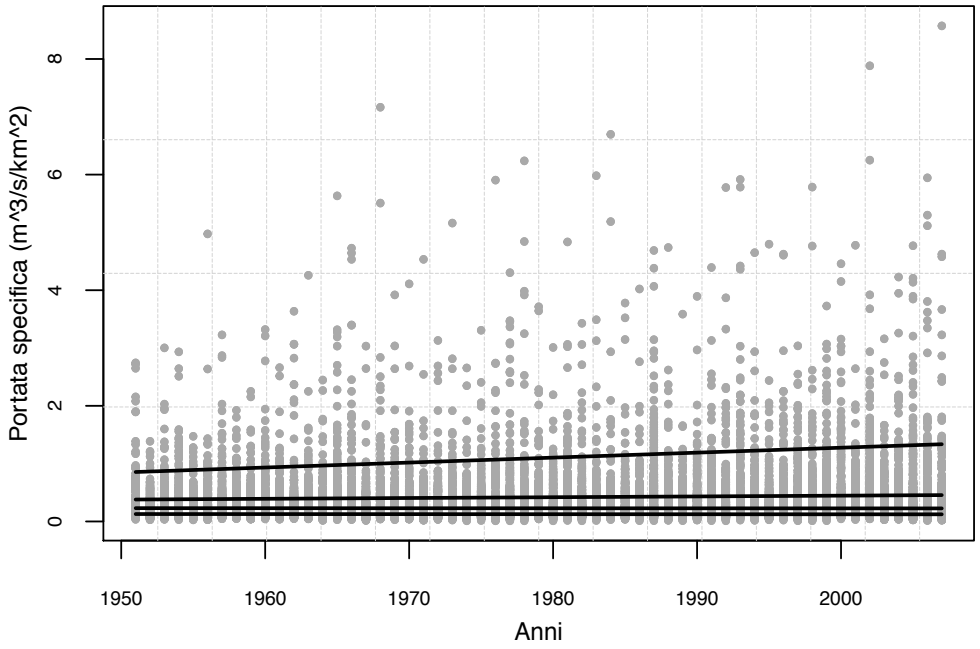


Figura 2.6: Rette di regressione lineare rappresentanti i trend temporali ottenuti per i quantili 0.25, 0.50, 0.75 e 0.95, anni 1951-2007 (Intero arco Alpino).

Sulla base dei risultati ottenuti (Tabella 2.3) è possibile osservare un trend crescente delle portate al colmo di piena negli anni valido per l'intero arco alpino.

Siccome a seguito dell'analisi condotta in precedenza usando lo stimatore Theil – Sen non era stato osservato un comportamento analogo per tutti i bacini dell'arco alpino in termini di trend sulle piene medie, si è voluto verificare tale comportamento anche in termine di eventi di piena estremi. Nello specifico, sono state applicate le regressioni per quantile semplici a bacini collocati in aree diverse, ed è stato valutato il risultato associato ai quantili elevati 0.75 e 0.25.

Inizialmente le regressioni per quantili sono state applicate ai gruppi di bacini associati per nazione comune. I risultati ottenuti sono riportati in Figura 2.7, Figura 2.8, Figura 2.9 e Figura 2.10.

Quantile	m	e	t
0.25	-0.03	0.01	2.27
0.5	0.01	0.03	0.45
0.75	0.10	0.05	2.08
0.95	0.56	0.18	3.09

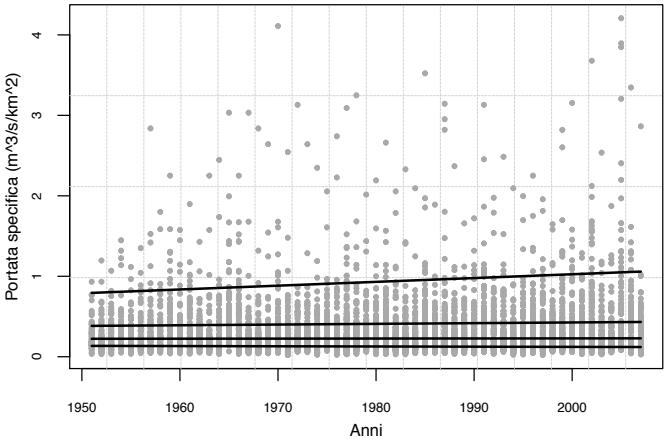


Figura 2.7: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini austriaci (intervallo temporale: 1951-2007).

Quantile	m	e	t
0.25	0.05	0.01	3.55
0.5	0.14	0.03	4.60
0.75	0.43	0.07	6.04
0.95	1.76	0.39	4.53

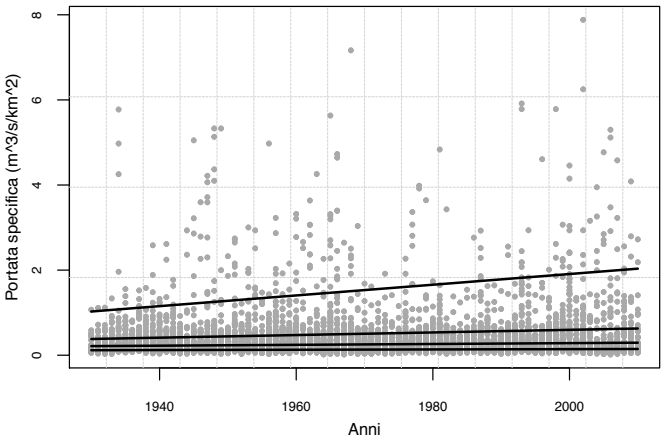


Figura 2.8:Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini italiani (intervallo temporale: 1930-2010).

Quantile	m	e	t
0.25	0.02	0.01	1.66
0.5	0.05	0.03	1.90
0.75	0.46	0.05	9.81
0.95	1.84	0.30	6.24

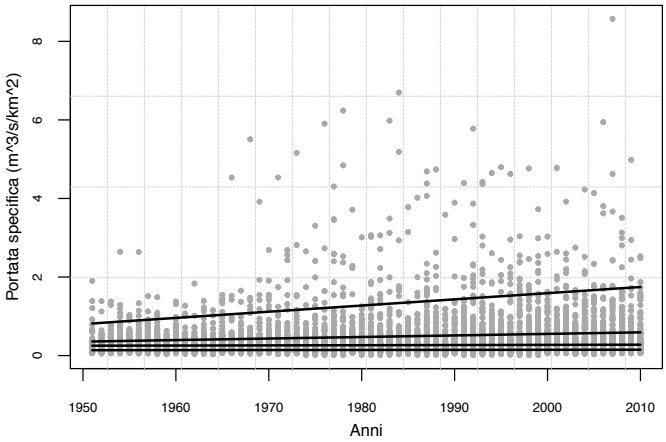


Figura 2.9: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini svizzeri (intervallo temporale: 1951-2010).

Quantile	m	e	t
0.25	-0.01	0.00	2.38
0.5	-0.01	0.01	1.42
0.75	-0.02	0.01	1.47
0.95	-0.01	0.04	0.31

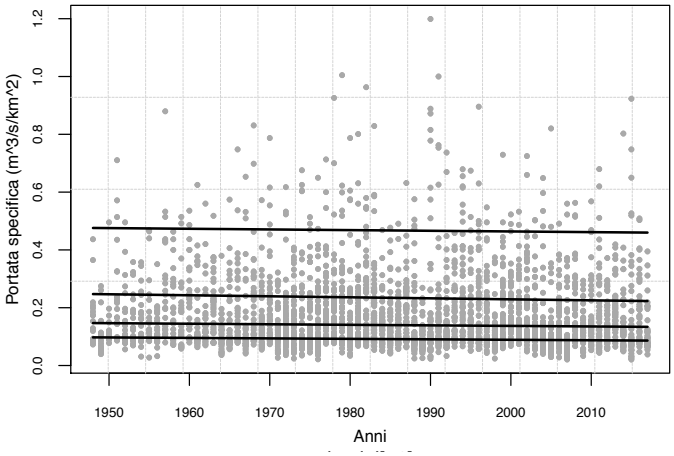


Figura 2.10: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini francesi (intervallo temporale: 1948-2017).

Osservando i risultati riportati in Figura 2.7, Figura 2.8, Figura 2.9 e Figura 2.10 si nota, per i quantili elevati 0.75 e 0.95, la presenza di trend crescenti e significativi per tutti i bacini tranne che per quelli francesi. Per questi ultimi, in particolare, i trend non sono significativi.

In ultima analisi, le regressioni sono state applicate a tre gruppi di bacini selezionati sulla base della loro collocazione geografica e considerando l'intervallo temporale compreso tra il 1951 e il 2007.

I tre gruppi individuati sono:

- Gruppo Ovest: bacini appartenenti alla porzione occidentale dell'arco alpino (Italia occidentale, tutti i bacini francesi e una piccola porzione di bacini svizzeri per un totale di 149 bacini), (riquadro nero in Figura 2.5)
- Gruppo Centrale: tutti i bacini austriaci e svizzeri (236 bacini), (riquadro grigio scuro in Figura 2.5);
- Gruppo Est: tutti i bacini austriaci e i bacini appartenenti alla porzione nord - est della penisola italiana per un totale di 184 bacini (riquadro grigio chiaro in Figura 2.5).

In Tabella 2.4 si riportano, per il gruppo Ovest l'elenco dei bacini italiani considerati e per il Gruppo Est l'elenco dei bacini italiani e svizzeri.

Tabella 2.4: Elenco dei bacini italiani appartenenti al Gruppo Ovest e di quelli italiani e svizzeri appartenenti al Gruppo Est.

Gruppo Ovest			Gruppo Est			
ITA11011	ITA11055	ITA11144	CH2011	ITA11008	ITA12023	ITA12070
ITA11012	ITA11056	ITA11145	CH2053	ITA11081	ITA12024	ITA12071
ITA11013	ITA11058	ITA11146	CH2117	ITA11106	ITA12025	ITA12072
ITA11015	ITA11059	ITA11149	CH2119	ITA11195	ITA12027	ITA12073
ITA11016	ITA11074	ITA11150	CH2151	ITA11196	ITA12030	ITA12075
ITA11017	ITA11075	ITA11154	CH2160	ITA11197	ITA12031	ITA12076
ITA11018	ITA11077	ITA11156	CH2170	ITA11198	ITA12032	ITA12078
ITA11019	ITA11091	ITA11157	CH2203	ITA12001	ITA12033	ITA12079
ITA11020	ITA11093	ITA11164	CH2219	ITA12002	ITA12034	ITA12081
ITA11021	ITA11094	ITA11166	CH2232	ITA12003	ITA12036	ITA12083
ITA11022	ITA11095	ITA11167	CH2244	ITA12006	ITA12038	ITA12084
ITA11023	ITA11096	ITA11169	CH2269	ITA12007	ITA12044	ITA12085
ITA11024	ITA11097	ITA11172	CH2342	ITA12009	ITA12045	
ITA11025	ITA11102	ITA11173	CH2346	ITA12010	ITA12046	
ITA11026	ITA11103	ITA11176	CH2351	ITA12011	ITA12047	
ITA11027	ITA11117	ITA11177	CH2371	ITA12012	ITA12050	
ITA11029	ITA11122	ITA11178	CH2378	ITA12013	ITA12051	
ITA11030	ITA11125	ITA11180	CH2469	ITA12014	ITA12052	
ITA11031	ITA11126	ITA11184	CH2486	ITA12015	ITA12053	
ITA11040	ITA11129	ITA11185	CH2488	ITA12016	ITA12054	
ITA11050	ITA11130	ITA11186	CH2493	ITA12017	ITA12057	
ITA11051	ITA11135	ITA11187	CH2606	ITA12018	ITA12058	
ITA11052	ITA11141	ITA11188	ITA11001	ITA12019	ITA12059	
ITA11053	ITA11142	ITA11189	ITA11005	ITA12020	ITA12063	
ITA11054	ITA11143	ITA11194	ITA11007	ITA12021	ITA12069	

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 2.11, Figura 2.12 e Figura 2.13.

Quantile	m	e	t
0.25	0.00	0.02	0.19
0.5	0.09	0.04	2.16
0.75	0.58	0.07	8.08
0.95	2.58	0.36	7.26

Figura 2.11: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini del Gruppo Centrale (intervallo temporale: 1951-2007).

Quantile	m	e	t
0.25	-0.03	0.01	4.60
0.5	-0.06	0.01	5.15
0.75	-0.02	0.02	0.82
0.95	0.34	0.19	1.82

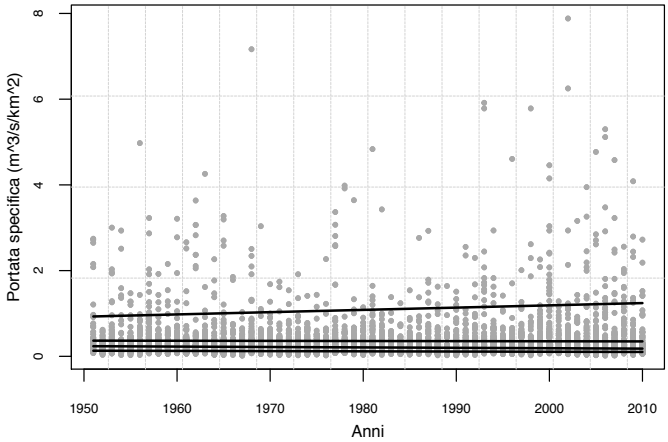


Figura 2.12: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini del Gruppo Ovest (intervallo temporale: 1951-2007).

Quantile	m	e	t
0.25	-0.02	0.02	1.10
0.5	0.01	0.04	0.36
0.75	0.11	0.07	1.62
0.95	0.81	0.29	2.82

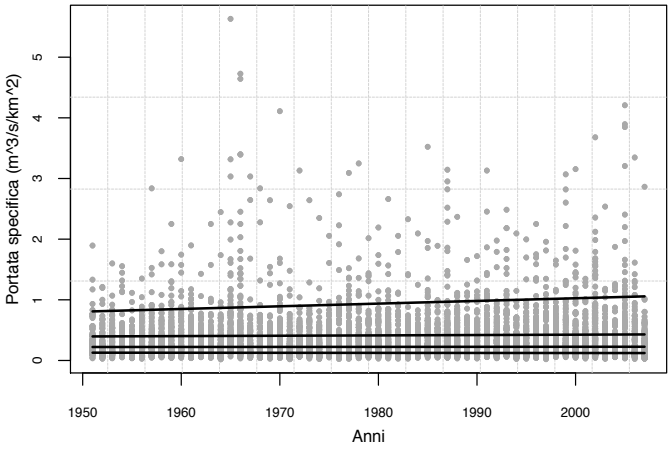


Figura 2.13: Risultati della regressione per quantili semplice applicata ai bacini del Gruppo Est (intervallo temporale: 1951-2007).

In definitiva, sulla base dei risultati ottenuti, è possibile confermare la presenza di un trend crescente per le piene estreme per tutto l'arco alpino. In particolare, si osservano situazioni differenziate nelle porzioni Ovest, centrale e Est dell'arco alpino. Infatti, i valori del coefficiente angolare della porzione est dell'arco alpino sono significativamente inferiori a quelli della porzione centrale dell'arco montuoso analizzato. Questo tipo di comportamento corrisponde alla presenza di una situazione nella quale, a causa del progressivo aumento delle temperature registrato degli ultimi anni, il contributo di carattere accumulativo progressivamente sempre più ridotto. Questa affermazione è sostenuta dal fatto che i valori di coefficienti angolari associati ai quantili elevati più grandi sono in corrispondenza delle cime alpine più alte (Austria e Svizzera) dove l'accumulo di precipitazione in forma solida è massimo.

Per quanto riguarda la porzione Ovest, invece, il coefficiente angolare riferito al quantile 0.95, sebbene lievemente positivo, non risulta statisticamente significativo.

3. ATTRIBUZIONE DEL TREND: ANALISI DI SENSITIVITÀ DEL MODELLO FLOODALP

3.1. DESCRIZIONE DEL MODELLO FLOODALP

Nelle regioni montane, la formazione dei processi di piena è regolata dalla compresenza di diversi meccanismi quali il deflusso generato a seguito delle precipitazioni, l'immagazzinamento idrico fornito dalle precipitazioni solide che si accumulano sul suolo, la caduta della pioggia sulla neve in primavera e sul terreno ghiacciato in inverno, i fenomeni di fusione nivale e i rovesci temporaleschi estivi. Lo studio di questi processi, tradizionalmente, non è stato molto approfondito in quanto, probabilmente, la percezione del rischio derivante da fenomeni di piena, in ambito montano, è ridotta. Il motivo di tale affermazione risiede nella presenza della neve che accumulandosi al suolo non contribuisce direttamente alla formazione del deflusso. Tuttavia, la crescente preoccupazione riguardante i cambiamenti climatici e l'aumento graduale delle temperature medie annue, rendono di importanza non trascurabile l'indagare i processi responsabili della formazione delle piene in ambito montano e l'analisi degli effetti di tali cambiamenti sul regime di frequenza degli eventi di piena.

In questo contesto, il modello geomorfoclimatico *FloodAlp*, sviluppato da Allamano P. et al. (2009) si propone come valido strumento per la simulazione del meccanismo di formazione delle piene nei bacini di alta quota. Il metodo sul quale il modello fonda le sue basi è l'approccio della distribuzione derivata; ossia, la comprensione dei processi di carattere dominante nella formazione delle piene e una forzante stocastica sono tradotti nella formulazione parametrica e in forma analitica della curva di frequenza delle piene. Questo tipo di approccio deriva dalla convinzione che, in contesti complessi, i modelli con una struttura semplice e controllabile possano fornire un prezioso compromesso nelle differenze tra processi naturali e dati stimati.

In particolare, il modello *FloodAlp* considera la precipitazione liquida e lo scioglimento nivale come afflussi principali e attribuisce all'accumulo della neve un fattore sottrattivo nei confronti della formazione dei volumi di piena. L'ipotesi di base consiste nella presenza di un meccanismo di tipo sottrattivo, governato dall'altitudine, capace di ridurre la dimensione di A_c, porzione attiva di bacino, nella formazione della piena. In corrispondenza dei bacini montani A_c dipende dalla quota in corrispondenza della quale si assiste alla transizione tra precipitazione in forma liquida e quella in forma solida identificata, per semplicità dall'isoterma dello zero termico ZT(t) (Figura 3.1).

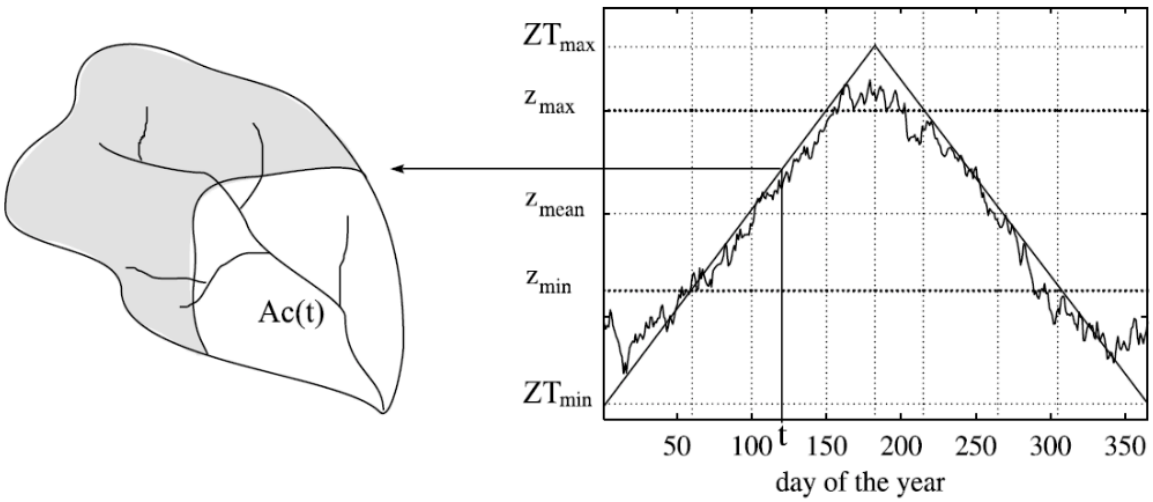


Figura 3.1: Rappresentazione del concetto di area contribuente in funzione del regime climatico del bacino e dell'andamento dello zero termico. (Immagine tratta da Allamano et al., 2009)

Il modello è in grado di integrare i diversi processi coinvolti e restituire i valori di frequenza cumulata associati alle portate specifiche definite dall'utente, operando un filtraggio delle caratteristiche di scarso rilievo mirato a far emergere quelle importanti nell'ambito del meccanismo di risposta dei bacini idrografici.

Tali caratteristiche, delle quali si richiede la definizione dei valori in input al modello, sono:

Caratteristiche geometriche:

- Z max: quota massima (m s.l.m.) del bacino considerato;
- Z min: quota minima (m s.l.m.) del bacino considerato;
- ξ: parametro di flesso della curva ipsometrica del bacino considerato;
- C: coefficiente di picco del deflusso del bacino.

Caratteristiche climatiche a scala di bacino:

- R: precipitazione totale annua (mm);
- α: media annuale dell'altezza di precipitazione h (mm);
- λ: numero di eventi nel determinato periodo di tempo considerato.

Caratteristiche climatiche a scala regionale:

- ZT max: quota massima alla quale si registra lo zero termico durante l'anno;
- ZT min: quota minima alla quale si registra lo zero termico durante l'anno.

Per i motivi appena illustrati, l'applicazione del modello consente lo studio del comportamento di bacini con caratteristiche climatiche e morfologiche diverse e, conseguentemente, di valutare l'impatto del cambiamento climatico nella genesi dei fenomeni di piena.

La struttura del modello e le equazioni analitiche che lo descrivono sono illustrate in dettaglio in Appendice. In Allegato H, invece, si riporta il codice usato in RStudio® per l'applicazione del modello FloodAlp.

A questo punto della trattazione, l'obiettivo si rivolge verso lo studio del modello *FloodAlp* appena illustrato. Nello specifico, l'intento finale è quello di studiarne la struttura e testarne la bontà di stima attraverso la sua applicazione ad un campione di bacini collocati sul territorio italiano. Inizialmente è stata condotta un'analisi di sensitività volta a comprendere le modalità con le quali il modello risponde di fronte a variazioni dei valori dei parametri di input e, nello specifico, all'individuazione delle variabili in grado di influenzare scarsamente il risultato finale fornito dal modello. Successivamente all'applicazione dell'analisi di sensitività, si è voluto proseguire lo studio della struttura del modello indagando il blocco di gestione dei parametri di input. Nello specifico, è stata condotta una cluster analysis mirata all'individuazione di possibili somiglianze tra i set di parametri descrittori propri dei singoli bacini.

Infine, il modello è stato testato procedendo con la sua applicazione ad un campione di bacini strumentati collocati nella porzione Ovest del Nord Italia. La verifica della bontà di stima ottenuta tramite la simulazione è stata condotta mediante confronto tra la curva di

probabilità cumulata generata dal modello e i dati di pioggia e le serie storiche di portata al colmo di piena registrate in corrispondenza delle stazioni idrometriche di misura.

3.2. ANALISI DI SENSITIVITÀ GLOBALE E REGIONALE

Nel contesto delle regioni montane la formazione delle piene è un processo regolato da diversi meccanismi, quali la precipitazione in forma liquida o solida e il carattere della precipitazione. La compresenza o il susseguirsi di questi fenomeni naturali è dovuto alle caratteristiche climatiche proprie dell'area.

Si vuole sottoporre a verifica l'adattabilità del modello *FloodAlp* a stimare correttamente i processi che danno luogo alla formazione delle piene in bacini di alta quota aventi differenti caratteristiche geomorfologiche e contesti climatici. Inizialmente, si vuole testarne la robustezza rispetto alle variazioni dei parametri di input. In particolare, si cerca di comprendere come gli attributi di carattere morfologico e quelli di carattere idrologico di un determinato bacino possano influire sul risultato finale ossia sulla bontà di stima del processo fornita dal modello.

Di conseguenza, con la consapevolezza di come l'input sia capace di influenzare l'output sarà possibile, in futuro, procedere alla fase di applicazione del modello con un "*know-how*" che consente all'utente di avere una maggior capacità di prevedere il risultato finale della simulazione e di saper comprendere le motivazioni per le quali, in determinati casi, la curva di probabilità cumulata stimata dal modello si allontana dalla curva reale osservata.

Questo studio è stato effettuato implementando le analisi di sensitività.

Le analisi di sensitività (Sensitivity Analyses – SA) hanno come principale obiettivo la valutazione della possibilità di attribuire le variazioni nell'output di un modello numerico a variazioni dei parametri di input e rappresentano uno strumento di essenziale necessità nel campo dello sviluppo e della verifica dei modelli analitici che fanno riferimento a sistemi e processi di carattere ambientale (Saltelli et al., 2008).

Questo tipo di analisi viene generalmente impiegato per verificare la robustezza del modello indagato rispetto alle assunzioni di base che lo caratterizzano e alla definizione dei valori di variabili di input non sempre certe. Le SA, quindi, si concentrano

sull'assegnazione di tali incertezze ai rispettivi parametri di input, al contrario delle analisi di incertezza, il cui scopo è la quantificazione delle incertezze dell'output del modello.

Nell'ambito di un precedente progetto di tesi (Brignolo, 2020), il modello era già stato sottoposto ad un'analisi di sensitività di tipo preliminare. In particolare, era stata valutata la sensitività del modello indagato per consentire una valutazione degli effetti prodotti sulla generazione della curva di possibilità pluviometrica indotti da modifiche apportate sui valori dei parametri di ingresso nel modello. Operativamente, questo tipo di analisi era stato condotto inducendo la variazione di un parametro di input alla volta e osservando la forma delle curve di output.

I parametri di input sottoposti a sensitività, nel precedente studio sono stati l'altimetria del bacino, il parametro di flesso della curva ipsografica e le caratteristiche climatiche del modello. Nello specifico, la variazione delle caratteristiche di tipo climatico proprie dei bacini sono state indotte modificando la curva dello zero termico e di conseguenza i parametri ZT_{max} e ZT_{min}.

Si riporta di seguito un estratto sintetico dei risultati ottenuti a seguito dell'applicazione dell'analisi.

Per quanto riguarda l'altimetria del bacino, è emerso che all'aumentare della quota media, ossia traslando il bacino a quote più elevate, il tempo di ritorno legato ad ogni specifica portata aumenta, determinando una diminuzione della frequenza ad essa associata. Un aumento del valore del parametro di flesso della curva ipsografica è responsabile, a parità di tempo di ritorno, di un significativo aumento del valore di portata. Questo comportamento è dovuto al fatto che la curva ipsografica influenza direttamente la capacità di accumulo nivale del bacino.

Infine, è stato possibile dimostrare come l'aumento del regime climatico determina un aumento delle portate ma anche della frequenza con cui queste si verificano. È quindi stata confermata la presenza di trend positivi delle serie storiche delle portate al colmo di piena evidenziata nel Capitolo 2.

La progressiva azione del riscaldamento climatico è quindi responsabile del fenomeno di produzione di incrementi di portata (*Bloeschl et al.*, *2019*), determinando come conseguenza un aumento del rischio idraulico nei bacini montani di alta quota.

L'obiettivo della presente analisi è quello di rafforzamento della componente di sensitività del modello. In questo capitolo viene fornito un sintetico quadro descrittivo delle SA e le stesse sono applicate al modello in esame.

Numerosi studi disponibili in letteratura propongono altrettanti metodi per l'esecuzione delle analisi di sensitività, i quali possono essere classificati in funzione dell'obiettivo ricercato e delle metodologie impiegate per il suo raggiungimento.

Innanzitutto, è necessario sottolineare la differenza tra le analisi di tipo globale e quelle di tipo regionale. Le prime, anche dette GSA (Global Sensitivity Analyses), prevedono la variazione dei parametri di ingresso del modello all'interno dell'intero campo di valori da essi assumibili; se invece i parametri sono fatti variare nell'intorno di un valore nominale, allora le analisi sono di dette tipo regionale (RSA – Regional Sensitivity Analyses).

Inoltre, è possibile effettuare una distinzione tra le analisi quantitative e quelle qualitative.

Si parla di SA quantitative quando l'influenza di un parametro sull'output può essere valutata attraverso una serie di indici di sensitività. Tali indici possono essere di diverso tipo e variare da misure di correlazione tra input e output fino a proprietà statistiche della distribuzione dell'output. Dal momento che per la maggior parte dei modelli il calcolo analitico di questi indici non è possibile, si ricorre generalmente ad una loro approssimazione condotta a partire da un campione di valutazioni eseguite su input e output.

Nelle analisi di tipo qualitativo, invece, la sensitività è valutata attraverso un'ispezione di tipo visivo delle predizioni del modello, grazie all'ausilio di particolari strumenti di visualizzazione, quali gli scatter plot.

Infine, è possibile effettuare una distinzione basata sul metodo di campionamento utilizzato per il calcolo degli indici di sensitività. Si distingue tra metodi OAT e metodi AAT.

Nei metodi OAT (*One At a Time*) le variazioni nell'output si ottengono variando un fattore di input alla volta e mantenendo gli altri fissi. Al contrario, nei metodi AAT (*All At a Time*) tutti i parametri di input sono variati contemporaneamente. In questo modo, la sensitività associata a ciascun fattore tiene conto sia della diretta influenza del parametro sull'output, sia di quella determinata dalle eventuali tra interazioni tra parametri.

Nonostante le analisi globali ricorrano all'utilizzo sia dei metodi AAT, sia di quelli OAT, i primi hanno il vantaggio di cogliere meglio le interazioni tra i parametri di input, permettendo quindi all'utente di analizzare le relazioni esistenti tra specifiche combinazioni di parametri. Tuttavia, l'aspetto negativo risultante dall'applicazione dei metodi AAT risiede nel fatto che i costi di carattere computazionale necessari siano significativamente più elevati.

3.3. OBIETTIVI DELLE ANALISI DI SENSITIVITÀ

Sulla base di quanto si è detto, i tre principali obiettivi delle analisi di sensitività sono (Saltelli et al., 2008):

- *ranking:* realizzazione di una classifica dei parametri di input basata sul relativo contributo dell'i-esimo fattore di ingresso sull'output del modello;
- *screening*: individuazione dei fattori di input, se presenti, che hanno un'influenza trascurabile sulla variabilità output del modello;
- *mapping*: individuazione della regione, all'interno del campo di variabilità dell'i-esimo fattore di input, in grado di fornire valori dell'output significativi (ad esempio estremi).

Le diverse metodologie di SA disponibili sono state appositamente sviluppate per il conseguimento di uno o più tra i tre principali obiettivi individuati. Per questa ragione, l'obiettivo dell'analisi di sensitività ricopre il ruolo di fattore determinante nella scelta del metodo da adottare (Pianosi et al., 2016).

3.4. SAFE TOOLBOX

Nonostante in letteratura siano stati proposti diversi metodi, le analisi di sensitività sono, sotto molteplici punti di vista, ancora di difficile utilizzo (Saltelli et al., 2008). Il motivo risiede nella necessità, da parte dell'utente, di compiere delle scelte di tipo progettuale prima e durante le fasi applicative del metodo.

Nel caso in esame, lo sviluppo dell'analisi di sensitività è stato condotto mediante l'applicazione del toolbox SAFE (Sensitivity Analysis For Everyone – Pianosi et al., 2015). Si tratta di un toolbox creato specificatamente per consentire l'applicazione di diversi metodi di analisi di sensitività, per guidare l'utente nelle scelte necessarie durante l'applicazione di ogni metodo e per fornire strumenti che consentano una visualizzazione e interpretazione dei risultati più efficace.

L'applicazione dei diversi metodi, di conseguenza, risulta essere un'operazione molto semplificata anche per utenti con poca esperienza nel settore. Il punto di forza dello strumento risiede nella sua struttura di carattere modulare, organizzata in cartelle, Figura 3.2) che consente l'applicazione di funzioni, disponibili per diversi linguaggi di programmazione (R Studio®, Python® e Matlab®), per il calcolo degli indici di sensitività secondo metodi diversi. Oltre alle funzioni necessarie per il calcolo delle misure di sensitività, nel toolbox sono implementati strumenti di visualizzazione che risultano di fondamentale importanza per l'interpretazione e la comunicazione dei risultati ottenuti.

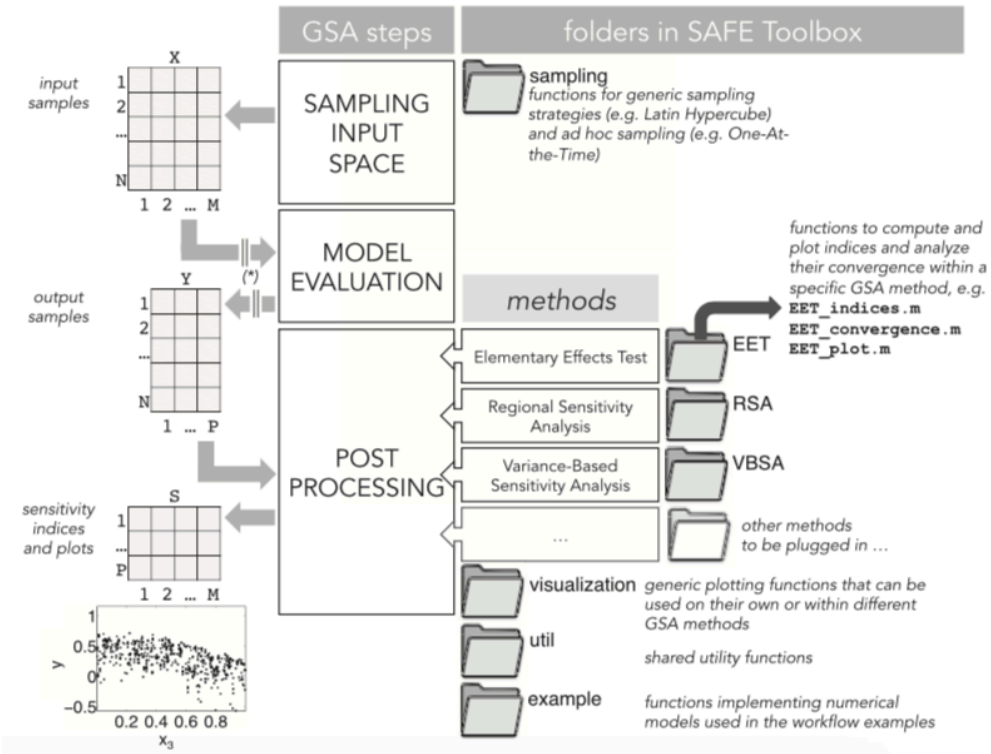


Figura 3.2: Schema illustrativo della struttura di carattere modulare del toolbox SAFE.

La documentazione disponibile per il toolbox SAFE semplifica enormemente il processo applicativo delle analisi. In particolare, la documentazione tecnica, incorporata nelle funzioni di calcolo, è presente sia nella funzione help dell'applicazione desktop che come commenti allegati ai codici delle funzioni. La documentazione tecnica è ulteriormente arricchita da una serie di *workflow*, ossia codici commentati, che permettono all'utente, per mezzo di esempi pratici, di esplorare a pieno le funzionalità del toolbox ed imparare come utilizzare SAFE per applicare uno specifico metodo.

I *workflow* proposti possono quindi essere utilizzati come punto di partenza per l'applicazione del metodo, in quanto i risultati delle SA possono essere ottenuti modificando unicamente le linee di codice specifiche per la definizione del proprio modello e apportando, al più, piccole modifiche.

Gli autori propongono il seguente schema per guidare l'utente nella scelta del metodo più adatto (Figura 3.3). In particolare, il metodo più adatto alle caratteristiche del proprio studio viene selezionato incrociando la colonna dell'obiettivo ricercato con la riga che fa riferimento ai costi computazionali sostenibili.

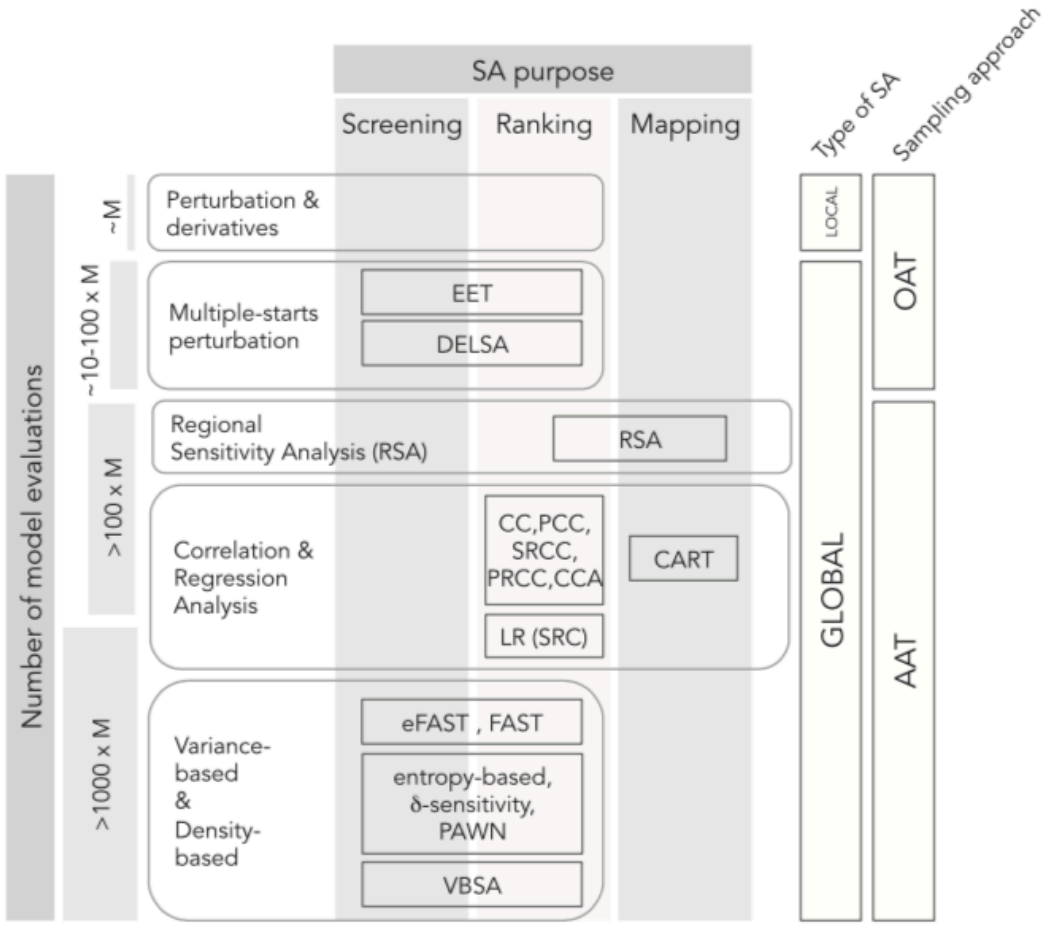


Figura 3.3: Sistema di classificazione delle diverse tipologie di analisi di sensitività basato sugli obiettivi dell'analisi e sulla complessità computazionale (M è il numero di parametri soggetti all'analisi). Pianosi et al., 2016.

Il presente studio si è concentrato sul conseguimento dell'obiettivo di screening, attraverso analisi di sensitività di tipo VBSA e EET. Come si vedrà, infatti, le analisi VBSA hanno fornito risultati poco attendibili in quanto gli intervalli di confidenza relativi agli indici di sensitività risultano ampi, dunque, in accordo con le indicazioni sull'utilizzo di SAFE, si è optato per analisi di tipo EET.

3.4.1. Variance Based Sensitivity Analyses - VBSA

Le analisi di sensitività basate sulla varianza (VBSA) fondano le proprie basi sulla decomposizione della varianza proposta da Sobol (1990) e fanno riferimento ai seguenti principi di base:

- la varianza della distribuzione dell'output del modello è un buon indicatore dell'incertezza del risultato del modello;
- il contributo fornito da un parametro di input sulla varianza dell'output è una misura di sensitività.

Tra i numerosi indici di sensitività che possono essere calcolati, nella comune pratica si è soliti calcolare due coefficienti sensitività per ciascuna variabile di input: l'indice first order (*main effect*, S_i^F) e l'indice *total order* (S_i^T). La formulazione dei due indici, proposta da Saltelli et al. (2008) è riportata nelle formulazioni 3.1 e 3.2.

$$S_i^{VBM} = \frac{V_{Xi}(E_{X\sim i}(y|X_i))}{V(y)} = \frac{V(y) - E_{Xi}[V_{X\sim i}(y|x_i)]}{V(y)} \tag{3.1}$$

$$S_i^{VBT} = \frac{V_{Xi}(V_{Xi}(y|X_{\sim i}))}{V(y)} = 1 - \frac{V_{X\sim i}[E_{Xi}(y|x_{\sim i})]}{V(y)} \tag{3.2}$$

Dove:

- X_i è l'i-esimo fattore di input;
- $X_{\sim i}$ fa riferimento all'intero vettore dei parametri di input escluso l'i-esimo;
- E è il valore atteso;
- V la varianza.

Gli indici *first order* misurano il diretto contributo dell'i-esimo fattore di input sulla varianza dell'output. Gli indici *total order* invece misurano il contributo generale fornito dall'i-esimo parametro di ingresso sull'output tenendo conto del suo effetto diretto e della sua possibile interazione con gli altri parametri, condizione che potrebbe amplificare l'effetto individuale.

Entrambi gli indici di sensitività possono essere utilizzati per operazioni di ranking, tuttavia soltanto l'indice *total order* risulta rilevante nell'ambito dello screening in quanto tiene conto sia dell'interazione dell'i-esimo parametro di ingresso sull'output che delle interazioni tra i diversi fattori. Di conseguenza un valore di *total order* pari a zero è

condizione necessaria e sufficiente affinché un fattore possa essere considerato non influente sull'output del modello.

3.4.2. Elementary Effect Test – EET

Il metodo di Morris, anche noto come EET (*Elementary Effect Test*), è il metodo più usato nel campo delle analisi di sensitività aventi come obiettivo principale lo screening. L'applicazione del metodo è volta all'identificazione delle variabili di input meno influenti sull'output quando l'applicazione di altre metodologie, quali la VBSA, non sono applicabili per via dei costi computazionali. È stato dimostrato (Campolongo et al, 2007) che le misure di sensitività prodotte da EET posso essere usate come proxy (indicatore) dei *total effect indices* ottenuti con VBSA. Per questo motivo EET è un metodo particolarmente adatto per lo screening (Sarrazin et al.,2016).

Come gli altri metodi di screening EET fornisce misure di sensitività di tipo qualitativo. Le misure di questo tipo consentono di identificare i fattori di carattere non-influente sull'output o di ordinare i fattori di input a seconda della loro importanza. Tuttavia, non è possibile quantificare esattamente l'importanza di ciascuna variabile di ingresso sull'output del modello studiato.

In questo metodo, la media di r differenze finite (chiamate anche *Elementary Effects*, EE), è adottata come misura di sensitività. In particolare, la media degli EE è in grado di fornire una valutazione dell'influenza complessiva del fattore i-esimo sull'output del modello.

La formulazione matematica che descrive gli EE è descritta dall' Equazione 3.3:

$$EE^j = \frac{g\left(\bar{x}^j_{1,\dots,}\bar{x}^j_i + \Delta^j_i, \dots, \bar{x}^j_M\right) - g\left(\bar{x}^j_{1,\dots,}\bar{x}^j_i, \dots, \bar{x}^j_M\right)}{\Delta^j_i} \cdot C_i \quad ; \tag{3.3}$$

$$con \quad y = g(\boldsymbol{x}) = g(x_1, x_2, \dots, x_M)$$

Dove:

- x è il vettore dei parametri di input;
- y l'output;
- g è la funzione di trasformazione input – output.

È comune pratica calcolare, oltre alla media, la deviazione standard degli EE. Quest'ultima proprietà statistica ha il vantaggio di fornire informazioni sul grado di interazione dell'i-esimo parametro di input con gli altri parametri. Infatti, più il valore di deviazione standard è alto più il parametro interagisce con gli altri, al contrario, un basso valore di deviazione standard indica che l'effetto del fattore i-esimo sull'output è praticamente indipendente dai valori assunti dagli altri fattori in input al modello.

3.5. APPLICAZIONE DEL METODO VBSA

I metodi esistenti, come è stato precedentemente illustrato, differiscono per obiettivo, metodo di campionamento, strategia di calcolo degli indici, interpretazione e visualizzazione dei risultati.

L'applicazione dell'analisi di sensitività è un processo di carattere sequenziale, di conseguenza a prescindere dal metodo selezionato è necessario, in linea generale, seguire alcuni passaggi comuni a tutti i metodi e che possono essere così riassunti:

- experimental setup;
- scelta del metodo SA;
- input sampling;
- model evaluation;
- post processing

L'operazione di *experimental setup* rappresenta la fase preliminare e fondamentale di ogni analisi di sensitività. Durante questo passaggio del processo l'utente deve scegliere i parametri di input del modello da sottoporre all'analisi di sensitività e definire il valore fissato di tutti gli altri fattori che, pur facendo parte dei parametri di ingresso del modello, non saranno sottoposti ad analisi. Successivamente alla definizione dei parametri di input,

risulta necessario definire l'output di carattere scalare prodotto dal modello studiato. Conclusa la fase di impostazione di base dell'analisi di sensitività la scelta successiva ricade sulla selezione del metodo più adatto al caso in esame.

Quindi si procede alla scelta del metodo di campionamento (*input sampling*) e all'applicazione del modello (*model evaluation*). In Figura 3.4 si riporta uno schema sintetico che illustra le tre fasi principali che devono essere seguite durante l'applicazione di qualunque tipo di analisi di sensitività.

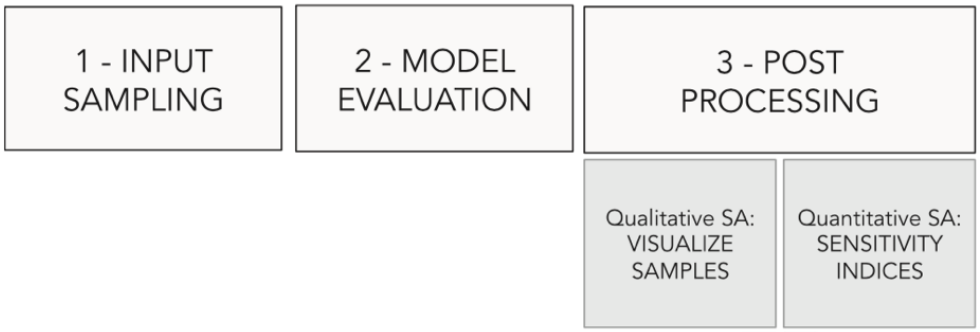


Figura 3.4: Rappresentazione dei tre passaggi fondamentali per l'applicazione di qualsiasi tipo di analisi di sensitività (Pianosi et al., 2016).

Come in tutte le analisi, la fase più importante è il *post processing* ossia l'interpretazione dei risultati ottenuti. In Figura 3.5 viene sottolineato uno dei punti di forza delle analisi di sensitività ossia il vantaggio di poter analizzare i risultati ottenuti sia da un punto di vista quantitativo, mediante l'interpretazione degli indici di sensitività, sia da un punto di vista qualitativo. Si fornisce, per completezza e chiarezza di trattazione, un esempio di post processing (Pianosi et al., 2016) coincidono con gli indici di sensitività. Figura 3.5, dove si riporta un esempio della possibile rappresentazione grafica degli indici, si nota elevata sensitività per le variabili X_1 e X_3. Il valore di output del modello, quindi, risulta maggiormente influenzato dai valori assunti da queste due variabili.

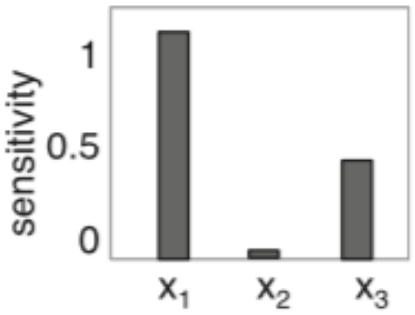


Figura 3.5: Esempio di rappresentazione grafica degli indici di sensitività (Pianosi et al., 2016).

In alternativa, la visualizzazione dei risultati di un'analisi di sensitività può essere condotta da un punto di vista qualitativo. L'esempio proposto utilizza come metodo di visualizzazione dei risultati gli scatter plot ottenuti plottando gli N campioni di output del modello rispetto ai valori assunti dall'i-esima variabile dell'N-esimo campione di osservazione (un punto per ciascuna coppia input – output (j= 1, …, N)). Scatter plot di tipo uniforme denotano bassa sensitività a differenza dell'emergere di pattern riconoscibili, condizione che denota elevata sensitività.

I risultati ottenuti mediante calcolo quantitativo degli indici (Figura 3.5) sono quindi concordi a quelli ottenuti qualitativamente (senza la necessità di ricorrere al calcolo degli indici) e riportati in Figura 3.6.

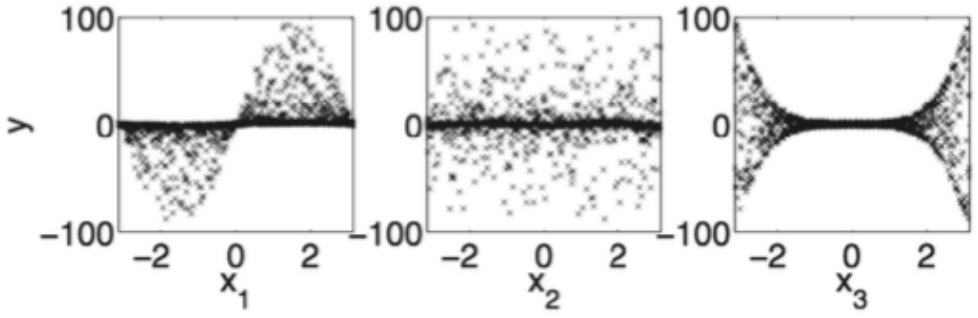


Figura 3.6: Scatter plots (o dotty plots) per la valutazione della sensitività per via qualitativa (Pianosi et al., 2016).

Questa duplice possibilità di valutazione della sensitività, come verrà illustrato, si rende molto vantaggiosa nei casi in cui l'interpretazione dei valori assunti dagli indici di sensitività risulta difficoltosa.

Vengono di seguito descritte le analisi condotte sul modello *FloodAlp* seguendo gli step generali descritti, utilizzando i metodi VBSA e EET e facendo riferimento ai 140 bacini di alta quota italiani.

La prima analisi alla quale si sottopone il modello Hypsometric è l'analisi basata sulla varianza VBSA.

Si presentano di seguito, in formato schematico le diverse fasi dell'analisi.

Experimental setup

Definizione dei parametri di input da sottoporre ad analisi di sensitività:

- Z max: quota massima (m s.l.m.) del bacino considerato;
- Z min: quota minima (m s.l.m.) del bacino considerato;
- ξ: parametro di flesso della curva ipsometrica del bacino considerato;
- R: precipitazione totale annua (mm);
- α: media annuale dell'altezza di precipitazione h (mm);
- λ: numero di eventi nel determinato periodo di tempo considerato.

Parametri di input con valore fissato e quindi non sottoposti ad analisi di sensitività:

- C: coefficiente di picco del deflusso del bacino assunto pari a 0.5 per tutti i bacini considerati;
- ZT max: quota massima alla quale si registra lo zero termico durante l'anno, assunta pari a 3000 m s.l.m.;
- ZT min: quota minima alla quale si registra lo zero termico durante l'anno, assunta pari a 0 m s.l.m.

Output del modello

Dal momento che l'output originale del modello è la curva di distribuzione di frequenza delle piene ma VBSA richiede un output di tipo scalare, si sceglie la portata specifica (q) relativa al tempo di ritorno T 50 anni.

Conclusa la fase di impostazione delle caratteristiche relative al modello in analisi si procede con l'analisi di sensitività vera e propria. Per poter creare il campione di dati sui quali verranno calcolati gli indici di sensitività è necessario procedere alla definizione dei range di variabilità dei parametri. Gli intervalli di variabilità dei parametri, nella pratica comune, sono definiti sulla base del loro significato fisico o sulla base dei valori reperibili in letteratura. Nel presente studio si sceglie di assumere come valore massimo e minimo per la definizione dei range di variabilità il massimo e il minimo valore registrato per ciascun parametro per i 140 bacini italiani oggetto di studio. Si riportano i valori selezionati in Tabella 3.1.

Tabella 3.1: Range di variabilità dei parametri da sottoporre a SA.

	Z max (m s.l.m.)	Z min (m s.l.m.)	ξ (-)	R (mm)	α (mm)	λ (-)
min	1924	-3	-0.5	684.8	3.9	1.4
max	4743	2535	4.3	2142	292.8	53.8

<u>Input sampling e model evaluation</u>

L'approccio di campionamento richiesto per questo tipo di analisi è AAT. In particolare, il metodo AAT selezionato è il campionamento tramite ipercubo latino (Latin hypercube Sampling - LHS), metodo statistico impiegato per la generazione di un campione casuale di valori dei parametri a partire da una distribuzione multidimensionale (ogni campione è descritto dai sei parametri sottoposti a SA). Per poter costruire gli stimatori degli indici *first* e *total order* è necessario però che il campione X generato casualmente tramite LHS venga ulteriormente ricampionato affinché si ottengano tre campioni XA, XB e XC di dimensioni, rispettivamente, N, N e N*M (N dimensione del campione di base e M numero di parametri da sottoporre a SA). La funzione che implementa questa specifica strategia di sotto campionamento, necessaria per il calcolo degli indici secondo VBSA, è implementata nel pacchetto SAFE sotto il nome di "*vbsa_resampling*".

A causa dell'operazione di ricampionamento, essenziale per il calcolo degli indici di sensitività, il numero totale di valutazioni del modello, ossia il numero di volte che il

modello dovrà essere applicato, è pari a N*(M+2). A causa dei costi computazionali richiesti e delle caratteristiche della macchina di calcolo utilizzata per l'analisi, N è stato assunto pari a 2000.

Post processing

Si riportano in Tabella 3.2 gli indici di sensitività ottenuti per i sei parametri sottoposti all'analisi e in Figura 3.7 una loro rappresentazione grafica.

Tabella 3.2: Indici di sensitività ottenuti applicando il metodo VBSA e considerando come grandezza indice per la descrizione dell'output del modello la portata specifica q associata ad un tempo di ritorno T di 50 anni.

Parametro	Main order index Si	Total order index STi
Z max	0.0111	0.9148
Z min	0.0159	0.922
ξ	0.0811	0.9212
R	0.0216	0.9194
α	0.0128	0.9287
λ	0.0507	0.9297
somma	0.1932	5.5358

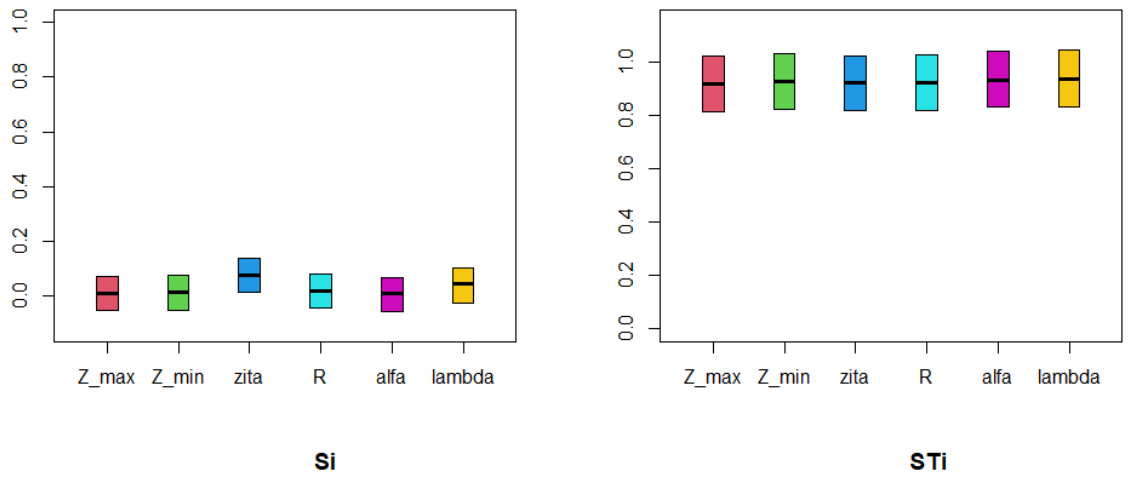


Figura 3.7: Rappresentazione grafica degli indici di sensitività ottenuti applicando il metodo VBSA e considerando come grandezza indice per la descrizione dell'output del modello la portata specifica q associata ad un tempo di ritorno T di 50 anni.

I valori assunti dai *total order indices* (STi in Figura 3.7) consentono, come spiegato precedentemente, di identificare i parametri con influenza trascurabile sull'output. Per questo motivo, nel campo dello *screening* si fa riferimento unicamente ai valori assunti dagli STi.

I valori ottenuti hanno una variabilità molto ridotta e, siccome gli intervalli di confidenza, oltre ad essere abbastanza ampi, si sovrappongono non è possibile isolare dagli altri nessun parametro e quindi identificare, se presente, quale di questi ha un'influenza trascurabile sull'output del modello. Tuttavia, osservando i valori degli STi, sembrerebbe emergere che tutti i parametri hanno lo stesso peso sull'output del modello.

Siccome i costi computazionali sono elevati non è stato possibile incrementare la dimensione del campione per cercare di ridurre l'ampiezza degli intervalli di confidenza e, come conseguenza la robustezza del risultato, si segue quanto consigliato da Pianosi et al. (FAQ del toolbox SAFE riportate sul sito del toolbox[2]). In particolare, si procede con l'implementazione di un metodo più snello dal punto di vista computazionale. Il metodo scelto, la cui applicazione è descritta in dettaglio al § 3.7, è EET.

Successivamente, dopo aver valutato la sensitività dei parametri in modo quantitativo si vuole valutare la sensitività in modo qualitativo. Pertanto, si visualizza l'output del modello rispetto ai campioni generati casualmente utilizzando gli scatter plots (Figura 3.8).

[2] https://www.safetoolbox.info/faqs/

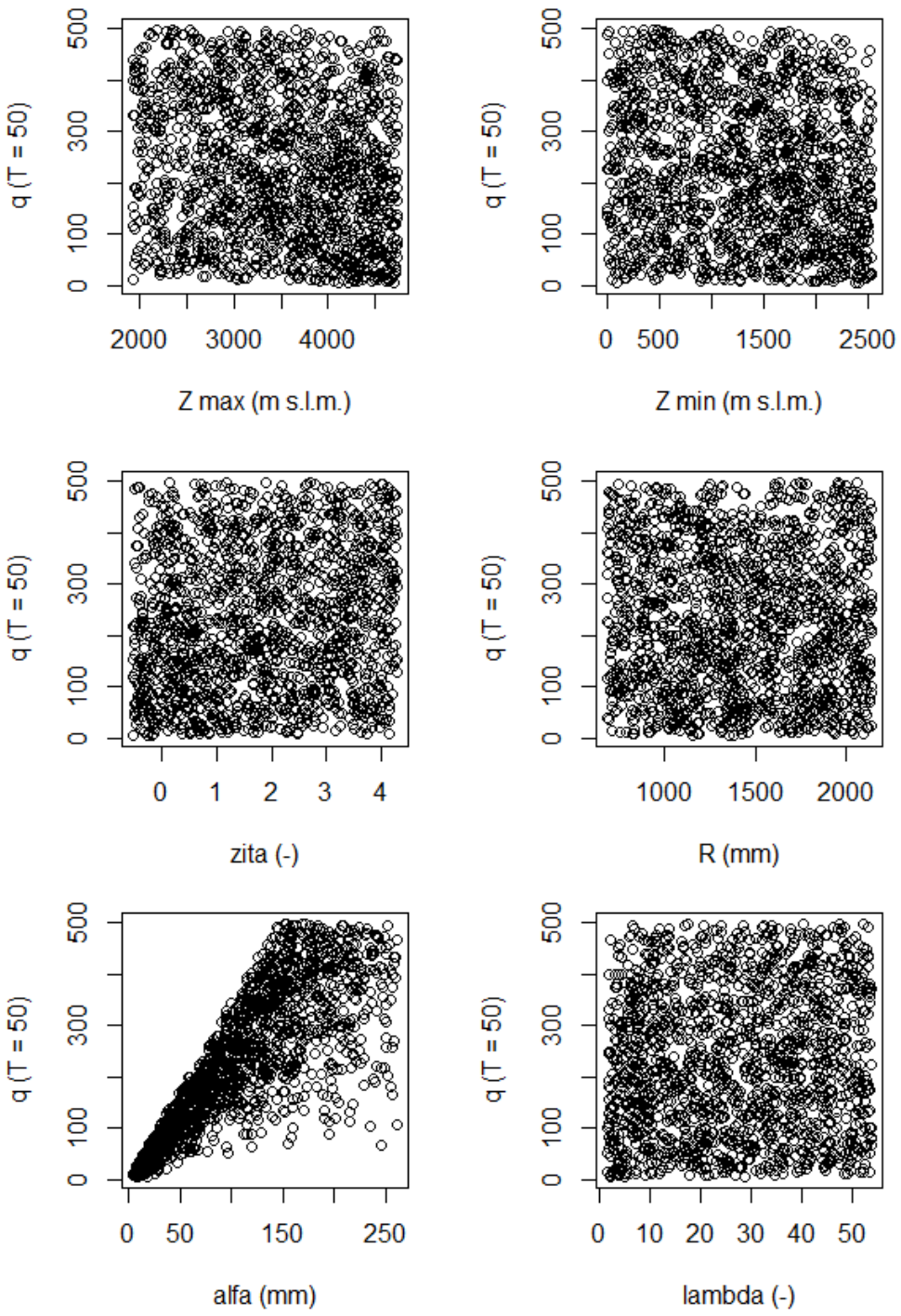


Figura 3.8: Scatter plot per la visualizzazione dell'output del modello (q T=50 anni) rispetto ai valori assunti dalle singole variabili di input del modello.

L'unica informazione derivabile dall'interpretazione degli scatter plot riguarda il parametro α. Infatti, il pattern che emerge da un'osservazione dello scatter plot α - output, denota che la sensitività legata a tale parametro è molto elevata. In altre parole, l'output del *modello FloodAlp* è molto sensibile alle variazioni di valore assunte dal parametro α.

Le informazioni che possono essere estratte tramite interpretazione dei valori assunti dagli indici VBSA sono ridotte. In particolare:

- Sembrerebbe esserci forte interazione tra i parametri di input da momento che gli STi assumono valori molto simili tra loro ed elevati;
- La sensitività legata al parametro α è alta.

A seguito dell'applicazione della VBSA sorge la necessità di comprendere più a fondo l'entità delle interazioni tra i parametri e, se esistenti, come queste siano in grado di fornire una spiegazione ai risultati ottenuti.

Pertanto, con lo scopo di ampliare il livello conoscitivo relativo alle variabili di input, si procede all'applicazione dello strumento di visualizzazione *coloured scatter plot.* Questo strumento di visualizzazione è implementato all'interno del toolbox SAFE come funzione che prende in nome di "*scatter_plot_interaction*".

Per la creazione degli scatter plot si usa il campione di osservazioni casuali XA ottenuto durante il secondo ricampionamento di VBSA.

Tale funzione consente di visualizzare l'interazione tra coppie di parametri tramite il confronto tra i valori assunti dall'i-esimo fattore e quelli assunti dal k-esimo fattore. Ciascun punto, uno per ogni campione di osservazione j, sullo scatter plot corrisponde alla coppia (x_i^j, x_k^j). Questo tipo di visualizzazione consente di individuare le interazioni tra i parametri di ingresso al modello, le quali sono evidenziate dall'emergere di pattern colorati. I colori corrispondono al valore output associato all'osservazione j-esima.

Il risultato ottenuto in seguito all'applicazione della funzione è riportato in Figura 3.9.

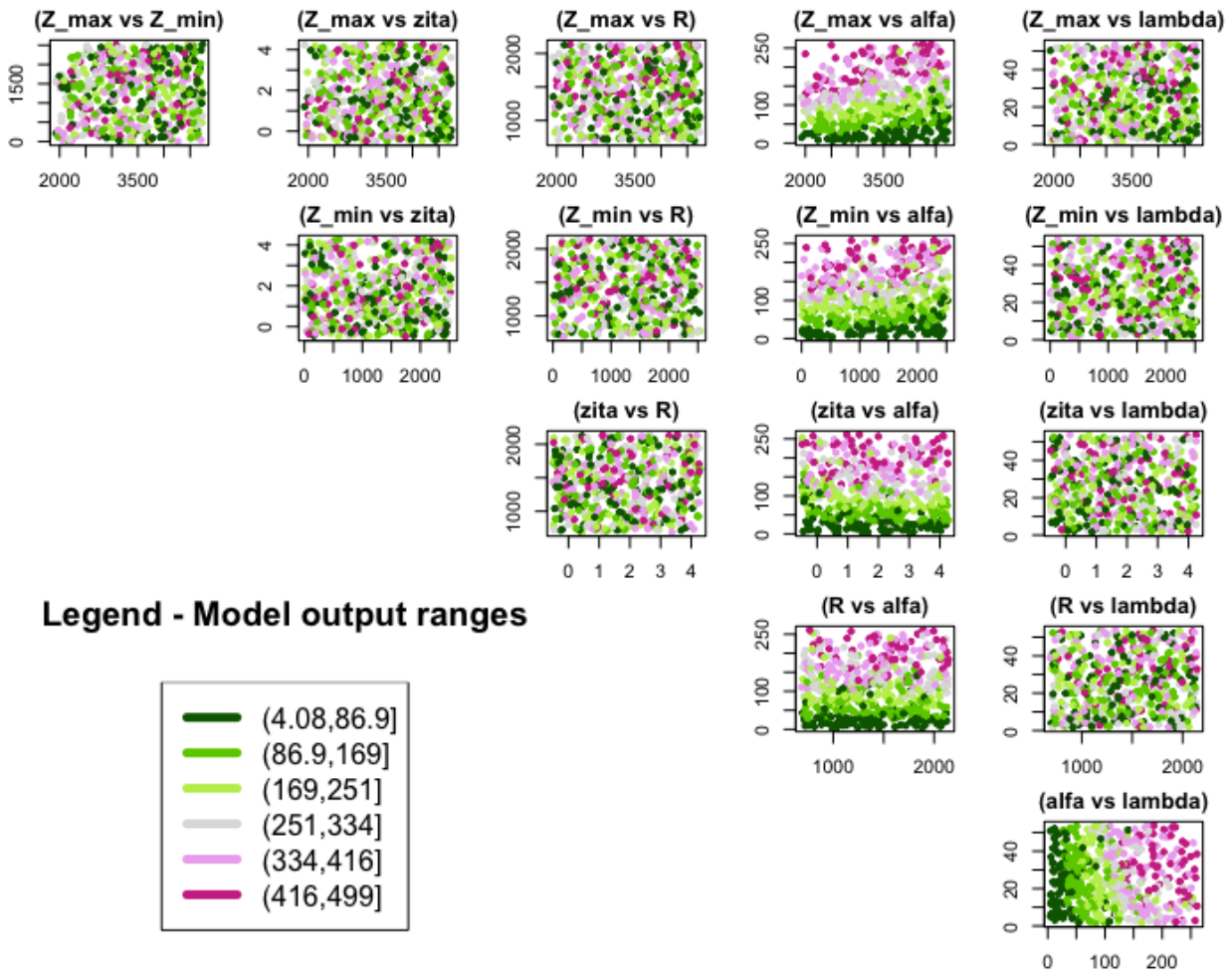


Figura 3.9: Coloured scatter plots per l'individuazione di interazioni tra parametri. L'output del modello è la portata specifica associata al tempo di ritorno T 50 anni.

Le linee isocolore che appaiono all'interno degli scatter plot riguardanti il parametro α non sono classificabili come pattern e di conseguenza non sono indicatori di interazione tra parametri. L'unica informazione estraibile da tali andamenti è che il valore del quantile q (T = 50) cresce all'aumentare del valore di α. Ossia, come sarebbe già stato possibile immaginare analizzando il significato delle due quantità, α e q (T = 50 anni), più piove maggiore è la portata associata ad un fissato tempo di ritorno.

Lo strumento grafico impiegato non si rivela in grado di fornire alcuna informazione a proposito dell'interazione tra i parametri a causa dell'assenza di pattern riconoscibili all'interno dei singoli scatter plot.

Nonostante dagli scatter plot non emergano interazioni visibili tra parametri non significa che tali interazioni siano inesistenti ma che, molto probabilmente, queste non sono visibili a causa dell'elevato numero di parametri che variano contemporaneamente, nel caso in esame pari a sei. Al fine di riuscire ad identificare l'esistenza di qualche interazione tra i parametri si applica un'analisi di sensitività locale.

3.6. ANALISI DI SENSITIVITÀ LOCALE

A seguito della realizzazione degli scatter plot colorati è stata condotta un'analisi più semplice per tentare di evidenziare la presenza di interazioni tra i sei parametri di input del *modello FloodAlp*. In particolare, si procede con l'applicazione di un'analisi di sensitività di tipo locale. Con il termine locale si vuole intendere che non tutti i parametri di input del modello saranno sottoposti contemporaneamente a SA come è stato fatto per l'applicazione della SA globale con SAFE.

Siccome i coloured scatter plot ottenuti facendo variare contemporaneamente i sei parametri di input del modello non hanno permesso l'estrazione di informazioni utili per l'identificazione della presenza di interazioni tra i parametri, per tentare di consentire l'individuazione di tali relazioni insistenti tra i fattori, se presenti, si sottopone il modello ad una analisi di sensitività locale di tipo qualitativo. In particolare, si fanno variare unicamente coppie di parametri e si mantengono fissi gli altri quattro, quindi si utilizza lo strumento coloured scatter plot per evidenziare la presenza di eventuali interazioni.

Operativamente si considera, come bacino di riferimento, un bacino descritto dai valori medi dei singoli parametri riferiti ai 137 bacini italiani e facendo variare all'interno del range di variabilità misurato nel caso italiano solo coppie di parametri. Si riportano in Tabella 3.3 le caratteristiche morfologiche e idrologiche che descrivono il bacino medio preso come riferimento. Per quanto riguarda i range di variazione dei parametri si rimanda alla Tabella 3.1.

Tabella 3.3: Caratteristiche morfologiche e climatiche del bacino medio di riferimento.

	Z max (m s.l.m.)	Z min (m s.l.m.)	ξ (-)	R (mm)	α (mm)	λ (-)
Valore medio	3333.5	1266	1.89	1413.4	133.1	26.7

Per semplificare l'interpretazione dei grafici si è deciso adottare non più un quantile fissato, ossia la portata specifica relativa ad un tempo di ritorno T pari a 50 anni, ma un parametro adimensionale.

L'ipotesi del modello tale per cui le serie di portate al colmo di piena siano distribuite secondo una distribuzione di Gumbel consente di confrontare il valore di CA della distribuzione stimata dal modello con un valore fisso. Di conseguenza, più il valore di CA ottenuto si allontana dal valore 1.14, coefficiente di asimmetria della Gumbel, maggiore sarà l'entità della distorsione generata dal modello.

Si realizzano i grafici di confronto facendo variare due parametri alla volta, mantenendo fissi gli altri quattro e scegliendo come output del modello il coefficiente di asimmetria della distribuzione stimata dal modello. Si riportano in Figura 3.10 i grafici ottenuti. I diversi colori delle celle che compongono le matrici dei grafici sono determinati sulla base del valore dell'entità della grandezza indice scelta per rappresentare il risultato del modello, CA. Per semplificare l'interpretazione di tali grafici sono state tracciate le curve di livello.

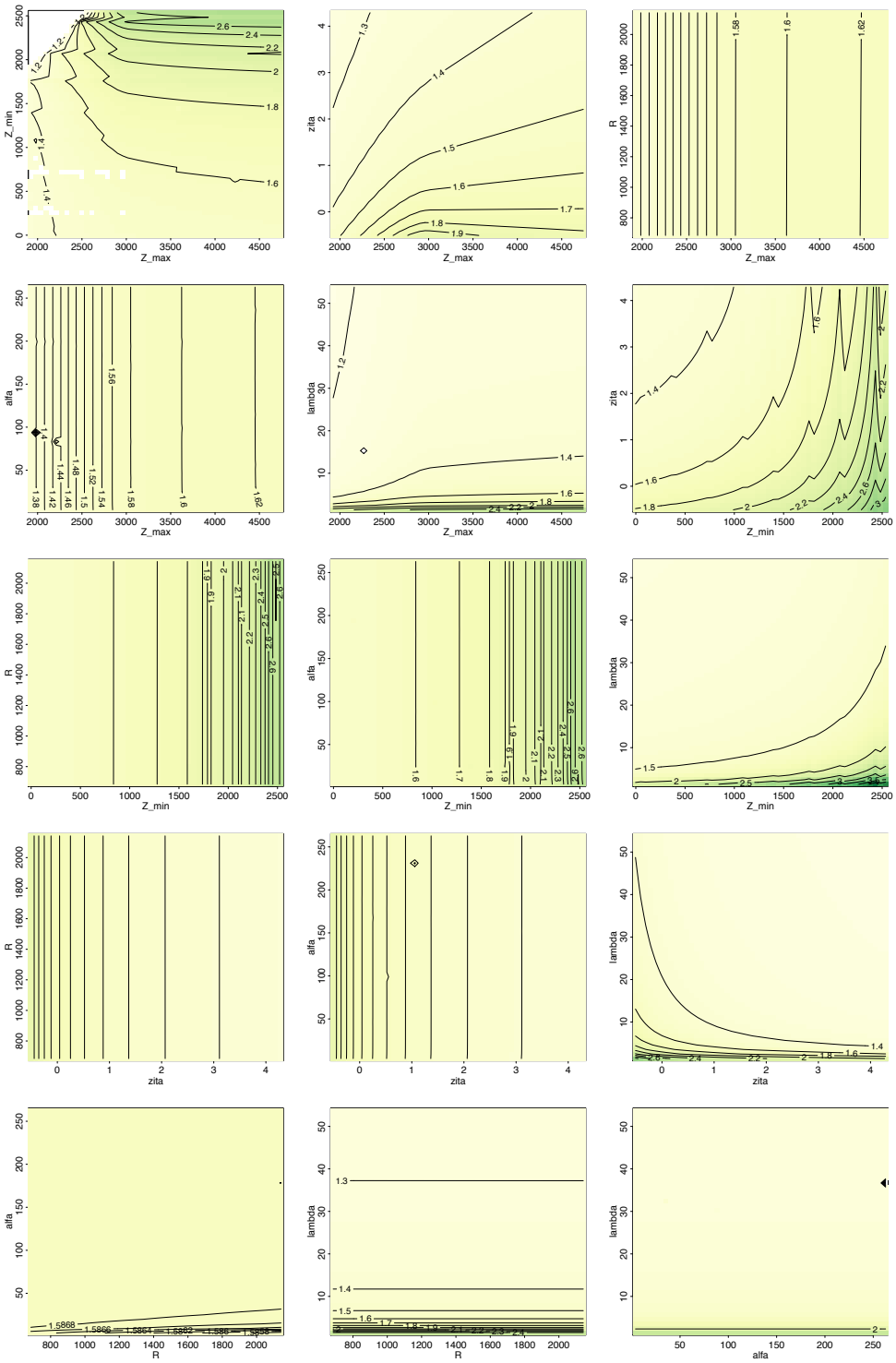


Figura 3.10: Grafici con curve di livello ottenuti applicando l'Equazione 3.4 e facendo variare due parametri alla volta.

Il calcolo del momento di terzo ordine della distribuzione (CA) con la procedura descritta in Appendice, tuttavia, genera delle oscillazioni, osservabili in Figura 3.10, che potrebbero determinare incongruenze di calcolo. Per questo motivo, nel caso del momento di terzo ordine si è assunto che *F(-x)* fosse pari a zero per ogni valore di x. L'equazione per il calcolo dei momenti (Eq. 31 Appendice) assume quindi la seguente forma semplificata

$$(X^r) = r\int_0^{\infty} x^{r-1}(1 - F(x))dx \tag{3.4}$$

Tale ipotesi semplificativa è ritenuta valida in quanto le curve di livello, ottenute dal calcolo dei momenti seguendo le due diverse modalità, seguono lo stesso andamento. A titolo di esempio si riporta, in Figura 3.11, la sovrapposizione dei grafici con curve di livello ottenuti nei due casi per la coppia di parametri Z_{max} – Z_{min}. Le differenze evidenziabili da tale confronto sono sufficientemente ridotte da consentire valida l'approssimazione.

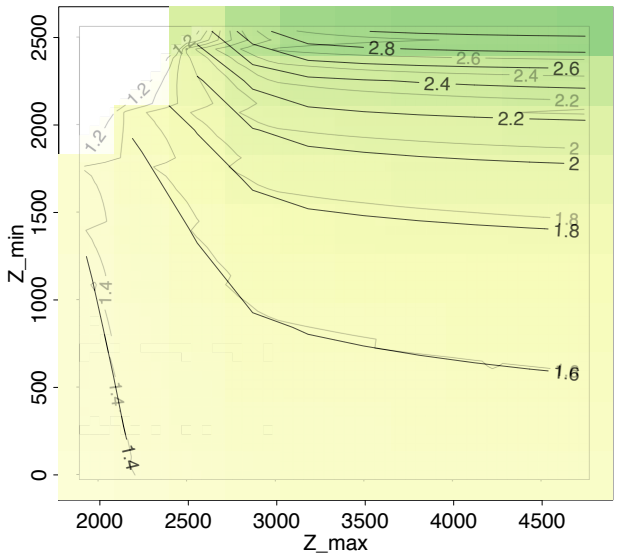


Figura 3.11: Sovrapposizione dei grafici con curve di livello ottenuti applicando le Equazioni 3.4 e 3.5 per la coppia di parametri Zmax e Zmin.

Si riportano di seguito, in Figura 3.12, i grafici ottenuti adottando come variabile di output del modello il coefficiente di variazione della distribuzione generata dal modello calcolato impiegando l'Equazione 3.4.

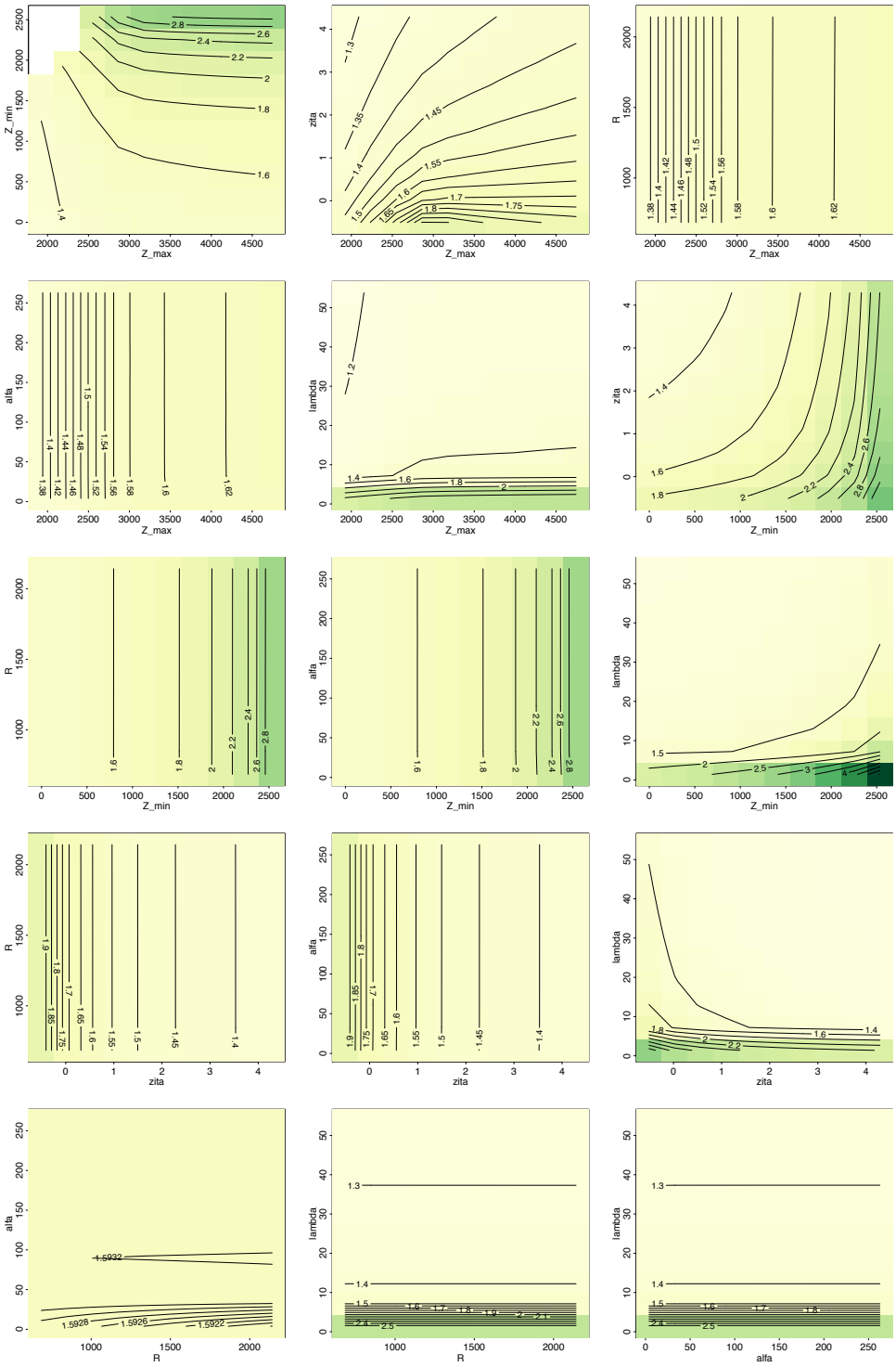


Figura 3.12: Grafici con curve di livello ottenuti applicando l'Equazione 3.5 e facendo variare due parametri alla volta.

Osservando la Figura 3.12 possono essere effettuate le seguenti considerazioni:

- la presenza di curve di livello con andamento orizzontale o verticale all'interno dei singoli grafici è indice di bassa sensitività del modello a variazioni indotte da variazioni dei valori della coppia di parametri indicati sulle ascisse e sulle ordinate del grafico;
- nel caso di grafici che mostrano curve di livello orizzontali o verticali, è possibile dichiarare che la variabile, rispettivamente sulle ascisse o sulle ordinate, non ha alcun effetto sul valore assunto dal coefficiente di asimmetria CA.

Sulla base dell'ultima considerazione è stato possibile identificare due parametri con influenza trascurabile sul valore di CA: il parametro di pioggia α e la precipitazione totale annua R.

Spostando l'attenzione sui grafici che mostrano la presenza di andamenti delle curve di livello di tipo inclinato è possibile capire quale tra le grandezze considerate possa essere classificata come influente sull'output del modello. Tale parametro, nel caso in cui la grandezza indice è il momento di terzo ordine della distribuzione, è con molta probabilità λ in quanto, se confrontato con Z_{min} e ξ, è in grado di produrre forti cambiamenti di asimmetria anche quando la variazione del valore da esso assunto è molto ridotta. In particolare, dall'osservazione della Figura 3.12 si può affermare che CA è fortemente controllato da Z_{min}, Z_{max}, ξ e λ; e il suo valore aumenta al crescere di Z_{min} e al diminuire di ξ e λ.

In conclusione, l'analisi di sensitività locale si è rivelata uno strumento soddisfacentemente valido ai fini di escludere, in via preliminare ad un'analisi di sensitività globale, più complessa e impegnativa dal punto di vista computazionale, di individuare i parametri con influenza trascurabile su un determinato output del modello.

Nel caso in cui la grandezza indice è il coefficiente di asimmetria della distribuzione di probabilità cumulata generata dal modello è stato possibile dire che due grandezze sono ininfluenti e le altre quatto sono influenti ma con un grado difficilmente valutabile. Per valutare più concretamente la priorità di influenza dei restanti quattro parametri è necessario ricorre ad un'analisi più completa, l'analisi di sensitività globale.

3.7. APPLICAZIONE DEL METODO EET

Per tentare raggiungere l'obiettivo dichiarato, ossia lo screening dei parametri, si applica il metodo EET. La valutazione dei valori di media degli EE dovrebbe, infatti, fornire indicazioni riguardanti l'influenza complessiva del fattore i-esimo sull'output del modello e di conseguenza consentire l'individuazione dei parametri con influenza trascurabile sull'output del modello.

La fase di *experimental setup* è, in questo caso, analoga a quella effettuata per il metodo VBSA e descritta al § 3.5.

A differenza di quanto effettuato per la VBSA, la strategia di campionamento adottata e necessaria a selezionare i punti $\bar{x}^j$ $(j = 1, \dots, r)$ e le variazioni di input Δ_i è la strategia OAT con design type, consigliato dagli autori di SAFE nel workflow, di tipo *radial-based*. Il *radial-based design* prevede che le variazioni Δ_i siano prese a partire dallo stesso punto (valore assunto dal parametro), selezionato casualmente e appartenente al range di variabilità del parametro.

Ricordando che M è il numero di parametri di input da sottoporre a sensitività, il calcolo della media e della deviazione standard degli EE di M fattori input richiede che il numero di valutazioni totali del modello necessario sia pari a r*(M+1) (con r numero di EE). Nel rispetto delle indicazioni fornite dagli sviluppatori di SAFE (Figura 3.3) si è scelto r pari a 100. In questo modo il modello è stato applicato a 700 campioni di parametri generati casualmente.

<u>Post processing</u>

Per completezza di trattazione si riportano in Tabella 3.4 gli indici di sensitività ottenuti per i sei parametri sottoposti all'analisi con il metodo EET.

Tabella 3.4: Indici di sensitività calcolati secondo il metodo EET.

Parametro	Mean (EE)	Std (EE)
Z max	138.76	105.53
Z min	121.44	129.04
ξ	95.43	144.5
R	0.01	0.008
α	572.55	178.65
λ	116.47	128.54

In Figura 3.13 sono rappresentati gli indici di sensitività con i relativi intervalli di confidenza ottenuti per i diversi parametri di input. Gli intervalli di confidenza sono generati tramite *bootstrapping* a partire dal campione generato casualmente. La dimensione del campione ottenuto tramite *bootstrapping* è pari a 100.

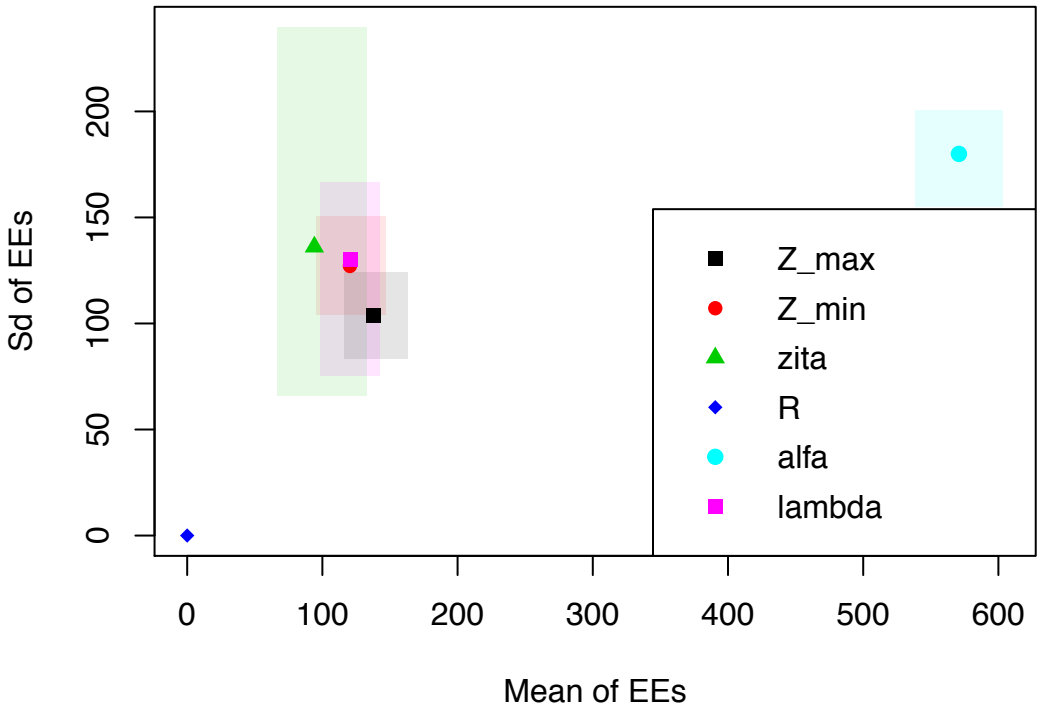


Figura 3.13: Rappresentazione grafica degli indici ottenuti applicando EET. I punti rappresentano i valori ottenuti, i rettangoli in trasparenza gli intervalli di confidenza.

Si ricorda che la media degli EE da informazioni sull'influenza complessiva del fattore i-esimo sull'output mentre la deviazione standard fornisce informazione sull'interazione dell'i-esimo parametro di input sugli altri.

Pertanto, sulla base dei risultati ottenuti tramite l'analisi in particolare osservando i valori assunti dalla media degli EET, nascono le seguenti considerazioni:

- α è il parametro che influenza maggiormente l'output del modello;
- R ha influenza trascurabile sull'output del modello.

La prima considerazione, riguardante la relazione di tipo lineare di tipo crescente che lega il parametro α al quantile q (T 50) e già individuata in Figura 3.8 è facilmente giustificabile.

Infatti, si ricorda che il modello definisce la distribuzione di probabilità per punti, cioè calcola il valore di probabilità associato ai valori di q campionati uniformemente all'interno di un intervallo e localmente, cioè in corrispondenza di un determinato valore di q, il valore di probabilità è inversamente proporzionale ad alfa e direttamente proporzionale a q (Equazione 3.5).

$$P_{Q_{AM}}(q) = \exp\left(-\lambda^* \cdot exp\left(-\frac{q - SM^*}{C \cdot \alpha}\right)\right) \tag{3.5}$$

Dove:

- λ^* è il parametro che tiene conto della riduzione del numero di eventi di piena dovuta alla presenza del regime invernale (regime I) durante il quale si ha solo accumulo di neve;
- SM^* è il coefficiente che tiene conto del processo di scioglimento nivale.

Di conseguenza, se si fissa un tempo di ritorno specifico, il valore del quantile q (T 50) crescerà al crescere di α.

A questo punto si vuole capire, il motivo per il quale, il parametro R sia privo di influenza sull'output del modello.

La risposta va ricercata nelle equazioni che definiscono il modello *FloodAlp* e in particolare all'interno delle equazioni necessarie a stimare il contributo della neve alla formazione della portata liquida. Questo contributo, dentro al modello è espresso dal parametro SM(t).

L'entità della fusione nivale, espresso tramite il parametro SM(t), ovviamente dipende dal regime delle temperature, e, come conseguenza diretta, dipende dal giorno giuliano t. Si ricorda che $f_c(t)$ è la funzione che descrive l'andamento dell'area contribuente nei diversi giorni dell'anno, e che essa può assumere valori compresi tra 0 e 1.

Per un bacino d'alta quota, in inverno, ad esempio, si può considerare SM(t) pari a zero in quanto il contributo fornito dalla fusione nivale è nullo. Analogamente è possibile affermare che, sulla base della definizione della funzione che descrive l'andamento dell'area contribuente, durante il periodo invernale i valori assunti da $f_c(t)$ sono i più bassi dell'intero anno giuliano. Al contrario, in estate, le due funzioni $f_c(t)$ e SM(t) raggiungono il proprio valore massimo. Per questo motivo, il comportamento di SM(t) può essere considerato simile a quello di $f_c(t)$ che è caratterizzato da un andamento di tipo triangolare. Per semplicità, al momento della formulazione del modello (Allamano et al., 2009), è stato assunto che SM(t) fosse una funzione lineare di $f_c(t)$ del tipo (Equazione 3.6):

$$SM(t) = SM^* \cdot fc(t) \tag{3.6}$$

Dove:

SM* è il coefficiente che lega linearmente l'SM di ogni giorno all'area contribuente di ogni giorno. La determinazione di tale coefficiente deriva dall'equivalenza tra il volume di neve accumulato totale e il volume di neve fusa(Eq. 3.7).

$$\frac{R}{365} \cdot \int_0^{\tilde{t}} \left(1 - f_c(t)\right) \cdot dt = SM^* \cdot \int_0^{\tilde{t}} f_c(t) \cdot dt \tag{3.7}$$

La definizione di SM* è tale da consentire la chiusura di un bilancio. Come conseguenza derivante dalla definizione di questo parametro si ha che tutto il volume accumulato, sotto forma di precipitazione solida, dovrà sciogliersi completamente.

Si procede quindi con l'analisi dell'Equazione 3.7, in quanto l'unica all'interno del modello a contenere il parametro R.

Il primo membro rappresenta il volume di neve accumulata totale e il secondo membro l'area contribuente del bacino considerato moltiplicata per SM*.

L'accumulo di neve è determinato dalla moltiplicazione della pioggia media di ogni giorno (R/365) con l'integrale che descrive l'area di accumulo nivale. Di conseguenza, solo una parte di R andrà ad accumularsi.

A questo punto, a titolo d'esempio, per dimostrare quanto R sia ininfluente sull'output del modello, si considera un bacino posizionato a bassa quota. Se il bacino è basso, la precipitazione cadrà principalmente in forma liquida e quindi $f_c(t)$ tenderà ad uno. Il bilancio di contributi (Eq 3.7) dice che se $f_c(t)$ è sempre vicino ad uno allora la quantità precipitazione di forma solida accumulata sarà bassa. Perciò, la quantità di neve accumulata non dipende unicamente dalla precipitazione R ma anche da quanto nevica, condizione determinata dalla quota del bacino considerato.

In sostanza, il contributo alla portata liquida fornito dallo scioglimento nivale, SM, è strettamente dipendente dall' interazione tra i mm di pioggia annui (R) e l'integrale che descrive l'attitudine del bacino ad accumulare neve, ossia l'integrale a primo membro dell'equazione 3.7.

Di conseguenza, la funzione di distribuzione probabilità assume valori diversi al variare dei due parametri, R e l'attitudine del bacino ad accumulare neve, considerati insieme.

Perciò, sottoporre a sensitività il parametro R da solo, e non abbinato all'integrale, risulta essere privo di significato. Avrebbe più senso, in linea teorica, basandoci sulle equazioni che compongono il modello, sottoporre a sensitività il parametro SM*. Operativamente, però, il fatto che SM* sia legato a numerosi parametri del modello, come mostrato dall'Equazione 3.8,

$$SM^* = f(Z_{max}, Z_{min}, \zeta, R) \tag{3.8}$$

rende complessa l'interpretazione del risultato derivante da una SA.

Tuttavia, nell'ambito delle analisi di sensitività, l'assunzione di diverse variabili scalari di output al modello potrebbe fornire risultati diversi, in particolare, un diverso ordine di importanza delle variabili di input. Il motivo risiede nella capacità di diverse variabili di output di descrivere diversi comportamenti del modello (Noacco et al., 2019).

Quindi si procede con l'applicazione del metodo EET adottando due nuove variabili di output del modello: il coefficiente di asimmetria CA (momento di 3°odine della distribuzione di probabilità) e un parametro che prende il nome di "slope".

Nel presente ambito di studio, l'applicazione delle analisi di sensitività si pone come strumento di supporto necessario alla comprensione di quanto e, sulla base del valore assunto da quale parametro, il modello sia in grado di alterare la distribuzione di frequenza delle piogge osservata. Per tale ragione si decide di adottare un parametro alternativo al quantile q (T 50) e capace di esprimere questa alterazione.

Il primo parametro preso in considerazione è il momento di terzo ordine della distribuzione stimata dal modello: il coefficiente di asimmetria (CA) o *skew*. Rimanendo in un "mondo perfettamente Gumbel" λ non è in grado di influire su CA in quanto il CA di tale distribuzione assume un valore costante pari a 1.14. Quando però vengono generate delle varianti di Gumbel (il modello va a perturbare la Gumbel) è naturale assistere alla presenza di valori di CA che si distanziano da 1.14.

In Figura 3.14 si riporta il risultato dell'analisi di sensitività condotta considerando come output del modello il coefficiente di asimmetria (*skewness*).

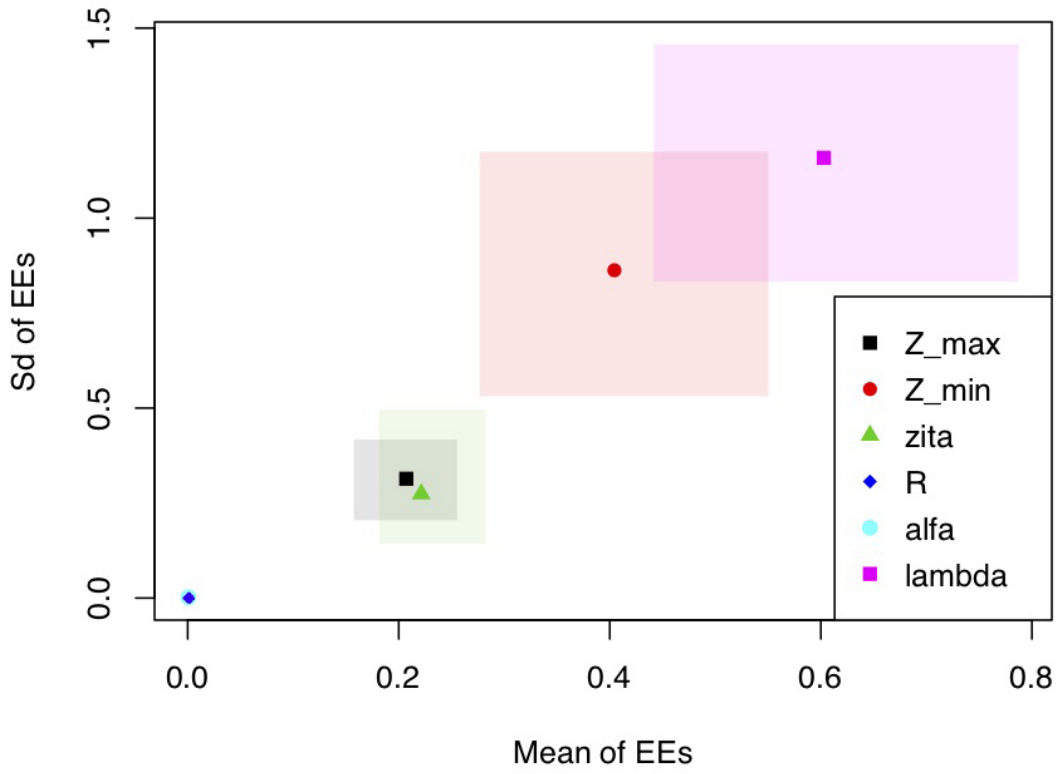


Figura 3.14: Risultato derivante dall'applicazione di EET con output del modello: CA. I punti rappresentano i valori degli indici ottenuti, i rettangoli in trasparenza gli intervalli di confidenza.

I risultati ottenuti e rappresentati graficamente in Figura 3.14 confermano quanto ipotizzato durante l'interpretazione dell'analisi di sensitività locale: i parametri R e α non influiscono sul valore assunto da CA e il parametro caratterizzato dall'influenza più rilevante è senza dubbio λ.

Il secondo parametro adottato è rappresentato dal rapporto tra la pendenza della curva stimata dal modello e la pendenza della curva ottenuta dai dati osservati. La distribuzione di frequenze ottenuta dal modello assume la forma di una retta in carta probabilistica di Gumbel e la pendenza di tale retta è di fatto un α riferito alle portate. Di conseguenza, il rapporto tra le due pendenze può essere espresso come segue:

$$\frac{\alpha_Q}{\alpha_{piogge}} = \frac{\alpha\ delle\ portate\ (stimato\ dal\ modello)}{\alpha\ delle\ piogge\ (dato\ di\ input)} \tag{3.9}$$

Dove il parametro α_{piogge} è il valore di α in input al modello e che assumerà valori selezionati casualmente all'interno del suo intervallo di variabilità.

L'output del modello, così definito, risulta adimensionale.

Il risultato dell'analisi di sensitività condotta considerando come output del modello il parametro "*slope*" è riportato in Figura 3.15.

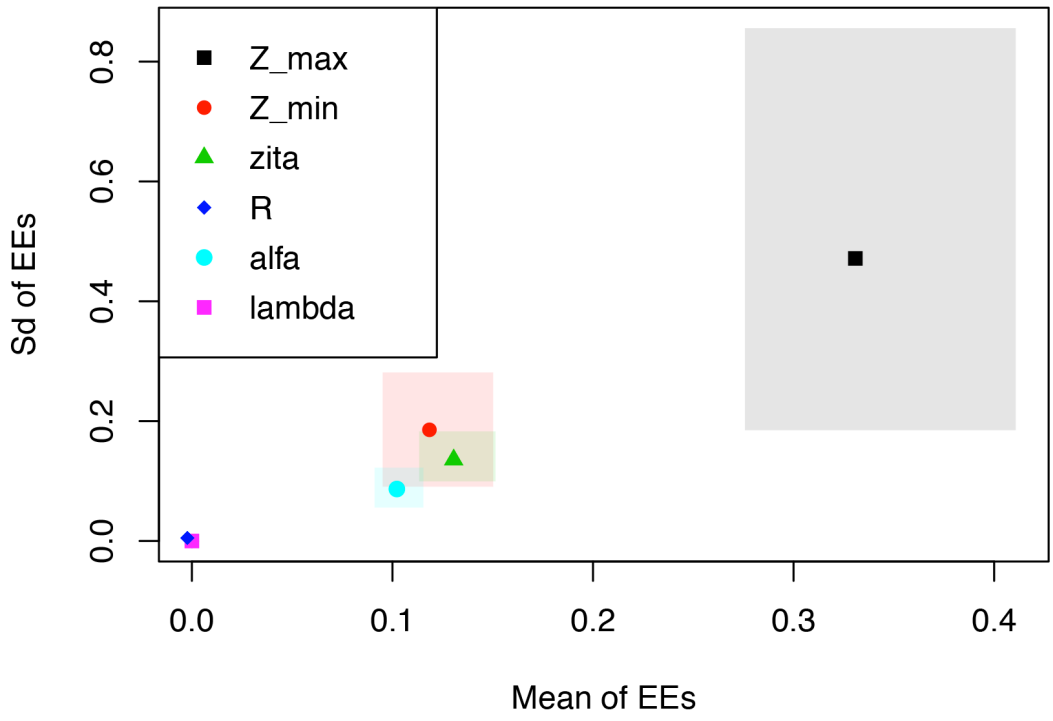


Figura 3.15: Risultato derivante dall'applicazione di EET con output del modello: SLOPE. I punti rappresentano i valori degli indici ottenuti, i rettangoli in trasparenza gli intervalli di confidenza.

Osservando i risultati ottenuti (Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15), è possibile dichiarare che, come atteso, al variare del parametro di output adottato l'ordine di influenza delle variabili di input del modello varia. Tuttavia, nonostante l'adozione di differenti definizioni del parametro descrittivo dell'output, R, ossia la precipitazione media annua, risulta sempre ininfluente sul risultato ottenuto.

Dal momento che il parametro R, considerato singolarmente, risulta avere un'influenza trascurabile sull'output, l'obiettivo di screening è raggiunto.

4. CLASSIFICAZIONE DEI BACINI SECONDO FLOODALP: CLUSTER ANALYSIS

A seguito dell'applicazione delle analisi di sensitività al modello indagato è stata realizzata una cluster analysis. L'obiettivo di tale scelta risiede nella volontà di ricerca di un livello di conoscenza preliminare più approfondito prima di procedere con l'applicazione del modello *FloodAlp* al campione di bacini italiani. Si è intrapreso uno studio volto all'analisi del blocco dei parametri di input, in particolare, focalizzato verso la ricerca di una possibile suddivisione del campione in gruppi omogenei al loro interno e descritti da determinati set di variabili.

In particolare, l'idea alla base di questa analisi preliminare è quella di verificare l'esistenza di bacini, tra quelli che costituiscono il campione, per i quali la stima fornita dal modello non è sufficientemente fedele ai dati realmente osservati e di ricercare eventuali similitudini dei parametri descrittori ad essi relativi. Se tali set di parametri venissero individuati si potrebbe definire una limitazione di applicabilità del modello testato.

In questa sezione viene quindi descritto il procedimento adottato per verificare la possibilità di raggruppamento dei 140 bacini costituenti il campione italiano (§ 1.1.2) sulla base delle loro caratteristiche morfologiche e idrauliche.

A questo proposito, si è effettuato, inizialmente, un raggruppamento empirico e, successivamente, si è ricorso all'impiego di strumenti di aggregazione quali il metodo *k-means* e il metodo di *Ward*.

Il campione di bacini impiegato viene di seguito rappresentato graficamente sulla base dei seguenti parametri descrittori:

- Z max: quota massima (m s.l.m.) del bacino considerato;
- Z min: quota minima (m s.l.m.) del bacino considerato;
- ξ: parametro di flesso della curva ipsometrica del bacino considerato;
- R: precipitazione totale annua (mm);
- parametri di pioggia α e λ: rispettivamente media annuale dell'altezza di precipitazione h (mm) e numero di eventi nel determinato periodo di tempo considerato.

Per la determinazione dei parametri di pioggia α e λ sono state utilizzate le serie storiche di portata al colmo di piena sotto l'ipotesi che queste assumano una distribuzione associabile a quella di Gumbel.

La funzione di probabilità cumulata alla Gumbel è descritta dall'equazione 4.1:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\theta_1}{\theta_2}}} \tag{4.1}$$

Dove θ_1 e θ_2 rappresentano i parametri della distribuzione, che possono essere correlati ai momenti di primo e secondo ordine (rispettivamente media μ e deviazione standard σ) utilizzando le seguenti espressioni (eq. 4.2 e 4.3):

$$\theta_1 = \mu - \gamma_E \cdot \theta_2 \quad ; \quad \theta_2 = \frac{\sigma \cdot \sqrt{6}}{\pi} \tag{4.2, 4.3}$$

γ_E= *costante di Eulero pari a 0.5772*

In definitiva, α e λ possono essere calcolati utilizzando le equazioni 4.4 e 4.5.

$$\alpha = \theta_2 \tag{4.4}$$

$$\lambda = \exp\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right) \tag{4.5}$$

Si osserva che α è unicamente dipendente dalla deviazione standard σ, mentre λ mostra anche una dipendenza dal valore medio di precipitazione.

Nello specifico, siccome si è fatto riferimento a dati di tipo idrometrico piuttosto che idrologico, è stato necessario effettuare una conversione che tenesse conto della durata critica dell'evento d. Operativamente, la determinazione dei parametri di pioggia è stata condotta applicando le seguenti equazioni:

$$\alpha = \frac{\theta_2 \cdot 3.6 \cdot d}{C \cdot Area\ bacino}\theta_2 \quad ; \quad \lambda = exp\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right) \qquad (4.6, 4.7)$$

Dove:

- θ_1 e θ_2 rappresentano i parametri della distribuzione;
- d è la durata critica dell'evento, pari a 24 ore;
- C è il coefficiente di picco del deflusso del bacino e assunto pari a 0.5 per tutti i bacini considerati.

I valori dei parametri descrittori di input del campione italiano sono riportati in Allegato F.

Gli andamenti che descrivono le caratteristiche di ciascun bacino sono stati confrontati per mezzo di *spaghetti plot*, un metodo di visualizzazione dei dati impiegato per la ricerca di affinità o di trend all'interno di campioni composti da osservazioni di tipo multiparametrico.

Per poter effettuare un confronto tra grandezze fisiche differenti relative a bacini idrografici differenti, ciascun parametro descrittore è stato normalizzato in modo tale che potesse assumere valori compresi tra 0 e 1. In particolare, per ciascun parametro descrittore, gli estremi del range di variazione [0,1] sono stati definiti in modo che corrispondessero al massimo e al minimo valore di tale parametro misurati sul campione di bacini considerati.

Dal campione di 140 bacini italiani considerati sono stati eliminati tre bacini, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 4.1, in quanto definiti da un valore del parametro di pioggia λ estremamente elevato. Tale inconveniente, può essere attribuito, con grande probabilità, al fatto che la distribuzione di Gumbel non sia in grado di descrivere bene i dati di portata al colmo di piena registrati in corrispondenza delle sezioni di chiusura dei bacini. Questa operazione è stata effettuata al fine di ottenere un set di valori uniformemente

distribuiti all'interno del range [0,1]. Se i tre bacini non fossero stati rimossi, la maggior parte dei valori si sarebbe attestata nei pressi del limite inferiore del range di variazione.

Tabella 4.1: Parametri descrittori dei tre bacini esclusi dal campione di 140 bacini italiani.

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P (mm/anno)	α	λ
11091	Dora Baltea a Ponte di Mombardone	4727	2402	1011	1.16	1412.47	4.84	4553.33
11117	Breuil a Alpette	3072	2459	1797	-0.11	1146.62	16.80	72.59
11130	Dora di Rhemes a Notre Dame	3562	2664	1717	-0.08	1056.62	5.01	405.90

Si riporta in Figura 4.1 l'andamento degli spaghetti plot per ciascuno dei 137 bacini analizzati, a seguito della normalizzazione dei parametri descrittori.

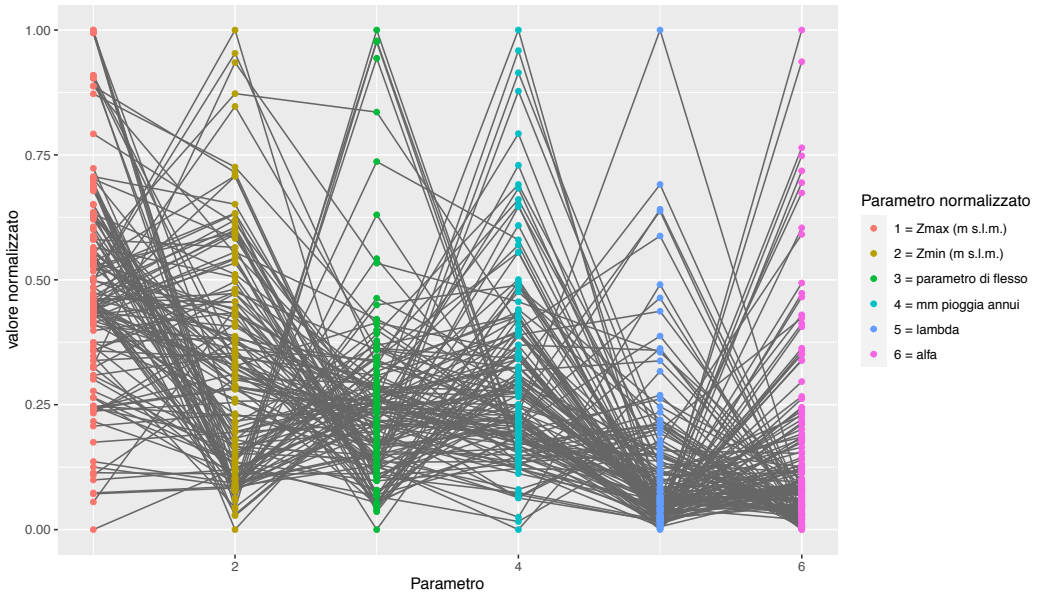


Figura 4.1: Andamento degli spaghetti plot per ciascuno dei 137 bacini analizzati: ogni linea grigia si riferisce ad un bacino e collega i valori di ogni parametro descrittore relativi a tale bacino.

4.1. RAGGRUPPAMENTO MEDIANTE VALUTAZIONE VISIVA (EMPIRICA)

Il metodo di carattere osservazionale è stato applicato ad un secondo grafico, riportato in Figura 4.2 e costruito a partire da quello riportato in Figura 4.1.

Tale grafico è stato definito, al fine di suddividere i bacini in gruppi omogenei dal punto di vista dell'andamento dei parametri, sulla base delle seguenti considerazioni:

- i parametri Z_{max} e Z_{min} di ogni bacino sono stati sostituiti con Z_{mean} (quota media del bacino) al fine di poter meglio individuare la presenza di trend all'interno del campione;
- vista la ridotta attendibilità del valore assunto dal parametro α dei bacini considerati, tale parametro è stato escluso dall'analisi osservazionale. Infatti, il parametro di pioggia α è stato definito per tutti i bacini considerati applicando la formula razionale a serie storiche di portate al colmo di piena in corrispondenza delle corrispondenti sezioni di chiusura e impiegando un valore costante del coefficiente di deflusso (C = 0.5).

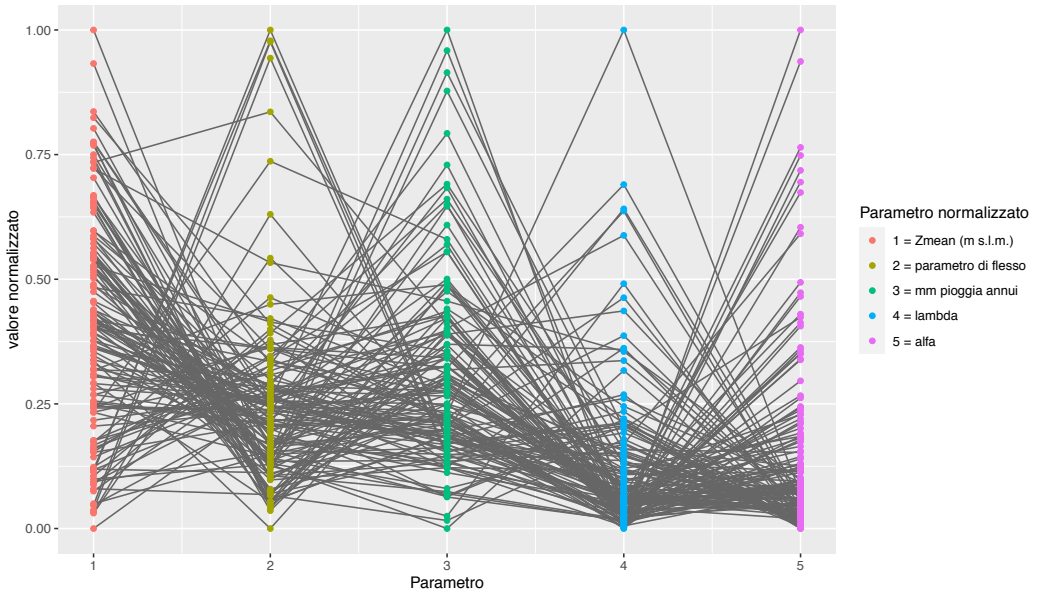


Figura 4.2: Andamento degli spaghetti plot per ciascuno dei 137 bacini analizzati dopo la sostituzione di Zmax e Zmin con Zmean.

In prima battuta, sono stati estratti i bacini descritti dagli andamenti responsabili della formazione dei tre picchi in corrispondenza dei parametri ξ, R e λ (v. Figura 4.2).

In particolare, i tre gruppi di bacini con andamento simile riportati nelle Figura 4.3 a, 4.3 b e 4.3 c, sono stati ottenuti dal campione di 137 bacini italiani considerato imponendo le seguenti soglie:

- parametro di flesso $\xi > 0.45$;
- precipitazione totale annua $R > 0.45$;
- parametro di pioggia $\lambda > 0.25$.

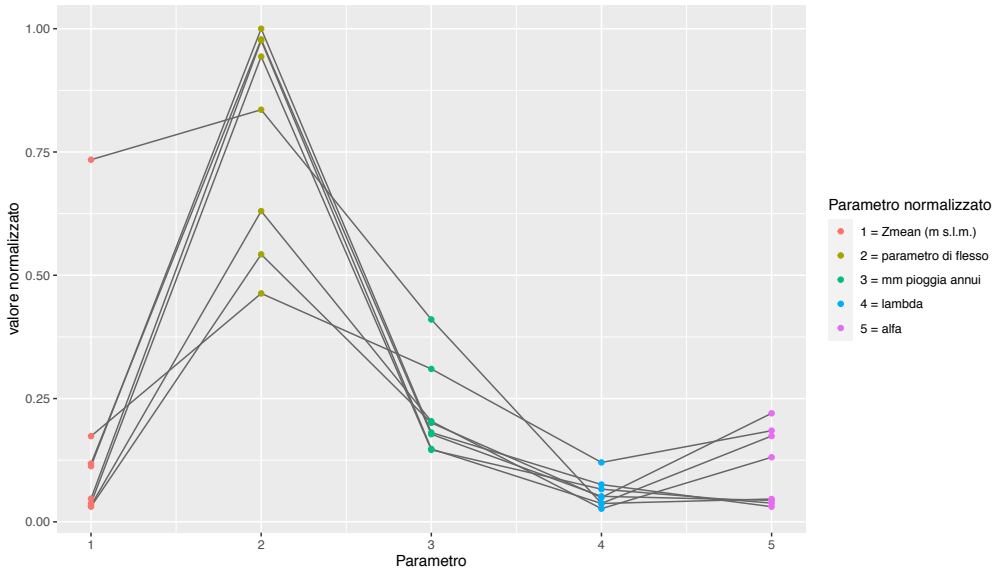


Figura 4.3 a: Rappresentazione mediante spaghetti plot degli 8 bacini ricadenti all'interno del gruppo A ($\xi > 0.45$)

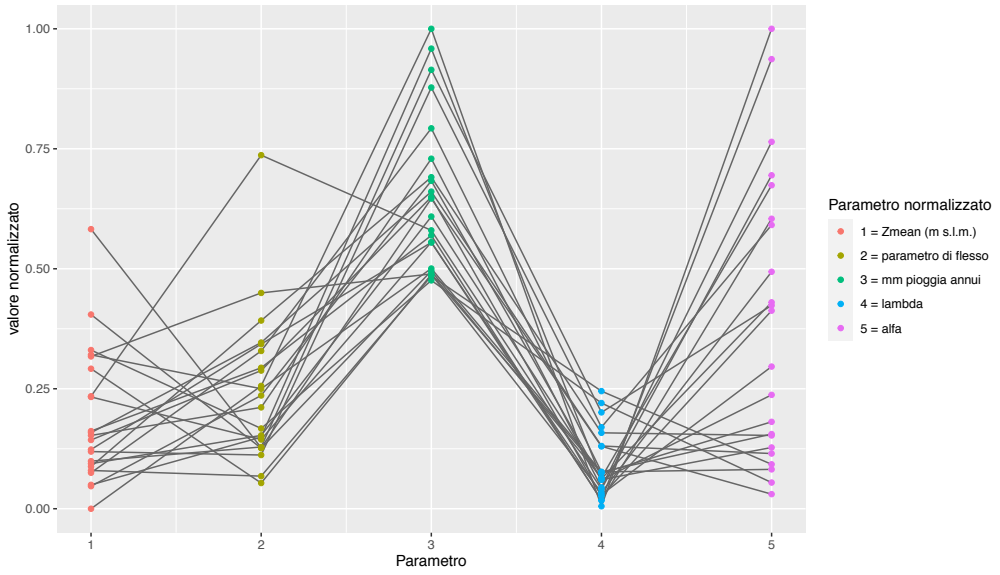


Figura 5.3 b: Rappresentazione mediante spaghetti plot dei 22 bacini ricadenti all'interno del gruppo B (R > 0.45)

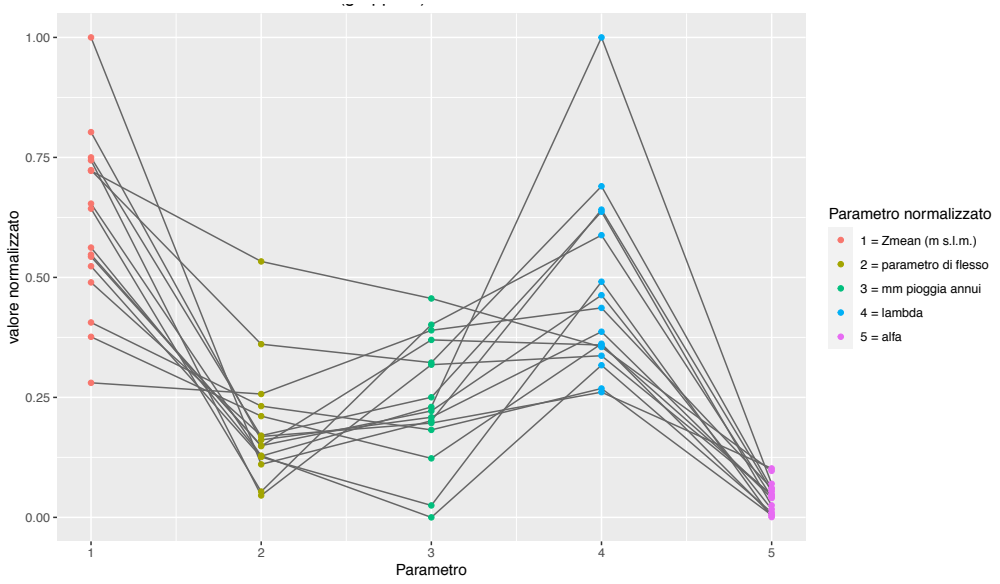


Figura 5.3 c: Rappresentazione mediante spaghetti plot dei 16 bacini ricadenti all'interno del gruppo C (λ > 0.25)

A questo punto, al fine di verificare l'impossibilità di individuare ulteriori gruppi tra i bacini rimanenti, riportati in Figura 4.4, è stata reiterata l'analisi impiegando una nuova normalizzazione dei valori assunti dai parametri descrittori. Gli estremi del nuovo range di variazione [0,1] sono stati valutati come nella precedente analisi, considerando però unicamente i bacini che non compaiono nelle Figura 4.3 a, 4.3 b e 4.3 c. (v. Figura 4.5).

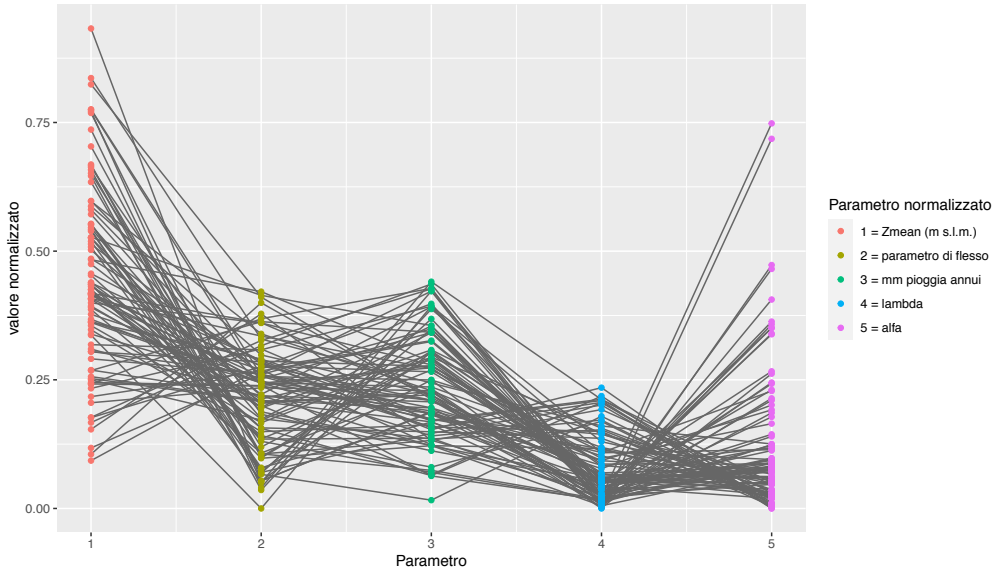


Figura 4.4: Rappresentazione mediante spaghetti plot dei 91 bacini italiani non classificati nei gruppi A, B e C precedentemente individuati.

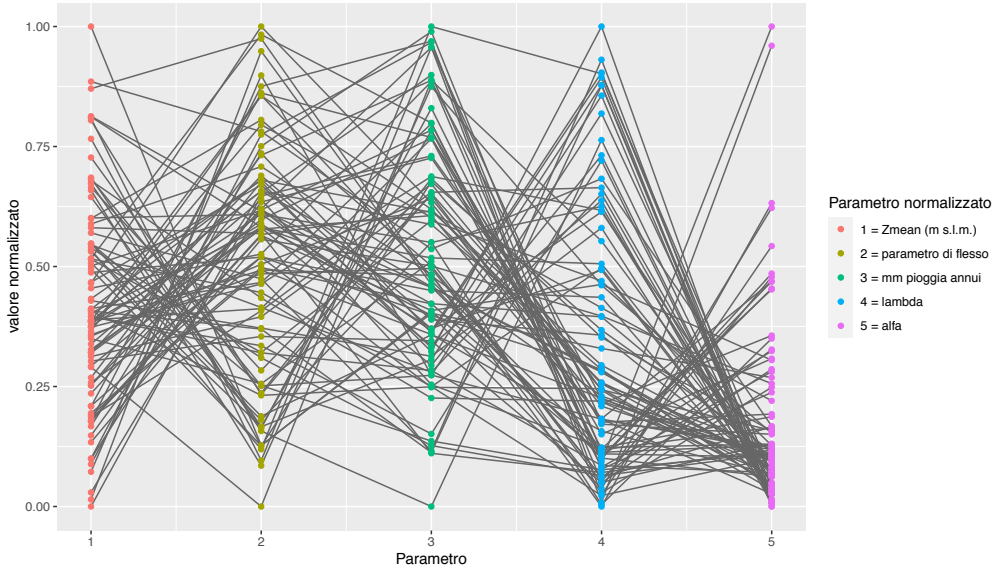


Figura 4.5: Rinormalizzazione dei 91 bacini non precedentemente classificati.

Siccome a seguito dell'operazione di rinormalizzazione è risultato possibile individuare potenziali ulteriori gruppi si è proseguita l'operazione di raggruppamento. In particolare, è stato seguito il procedimento descritto nel flow chart riportato in Figura 4.6.

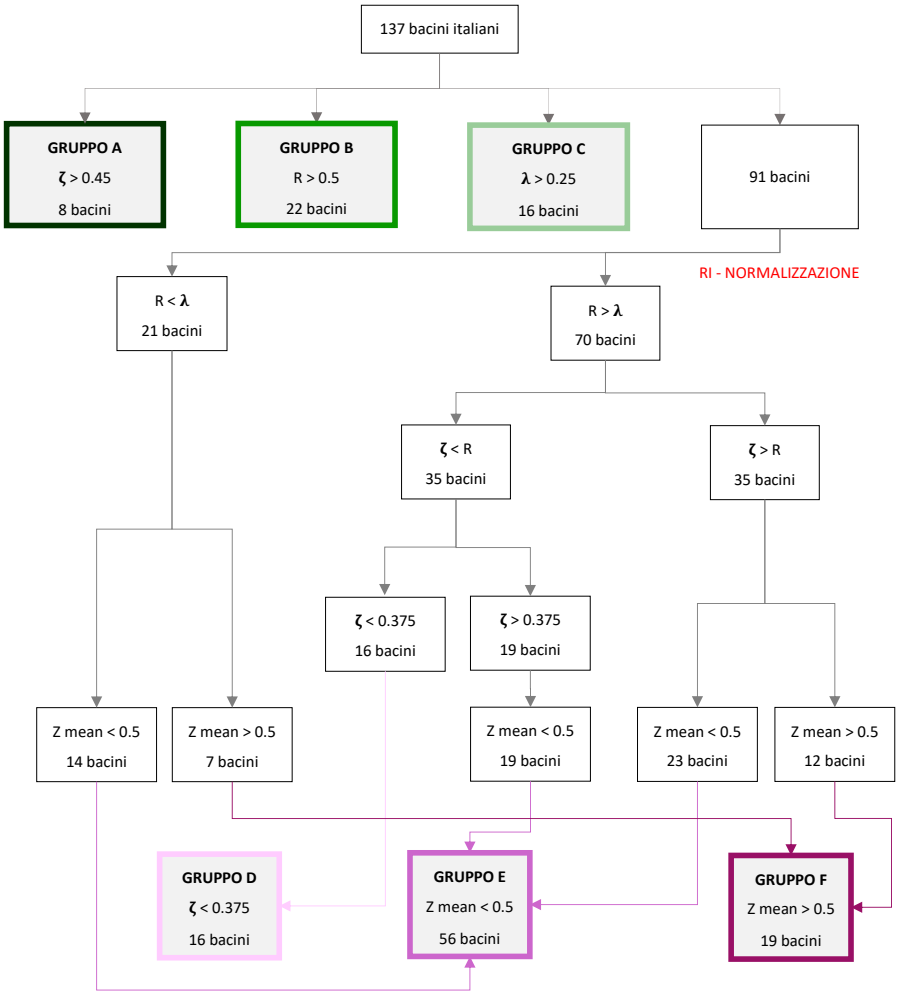


Figura 4.6: Flow chart che descrive le operazioni di raggruppamento eseguite sul campione di 137 bacini italiani considerato. I riquadri con bordatura colorata fanno riferimento ai gruppi finali (A, B, C, D, E, F).

Come è possibile osservare, inizialmente sono stati separati i bacini aventi valore del parametro λ maggiore di quello assunto dal parametro R da quelli caratterizzati da un valore di R maggiore di λ (gruppo B). Successivamente, si è proceduto a quattro ulteriori suddivisioni. In definitiva sono stati individuati sei gruppi di bacini con andamento simile e identificati dalle bordature di colore diverso dei riquadri in Figura 4.6.

Si riportano in Figura 4.7 a, 4.7 b e 4.7 c i grafici relativi ai gruppi 4, 5 e 6.

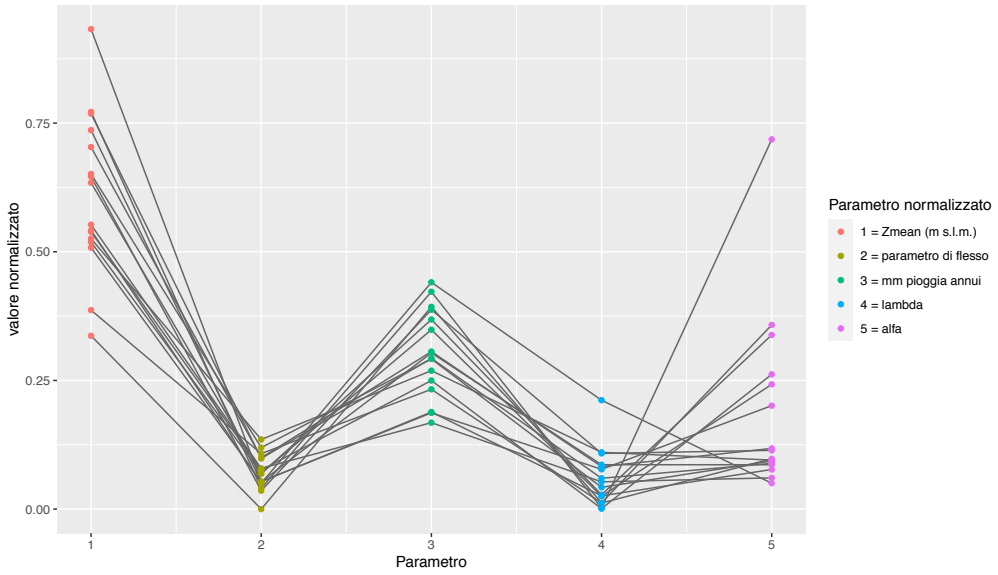


Figura 4.7 a: Andamento degli spaghetti plot relativi al gruppo D (16 bacini).

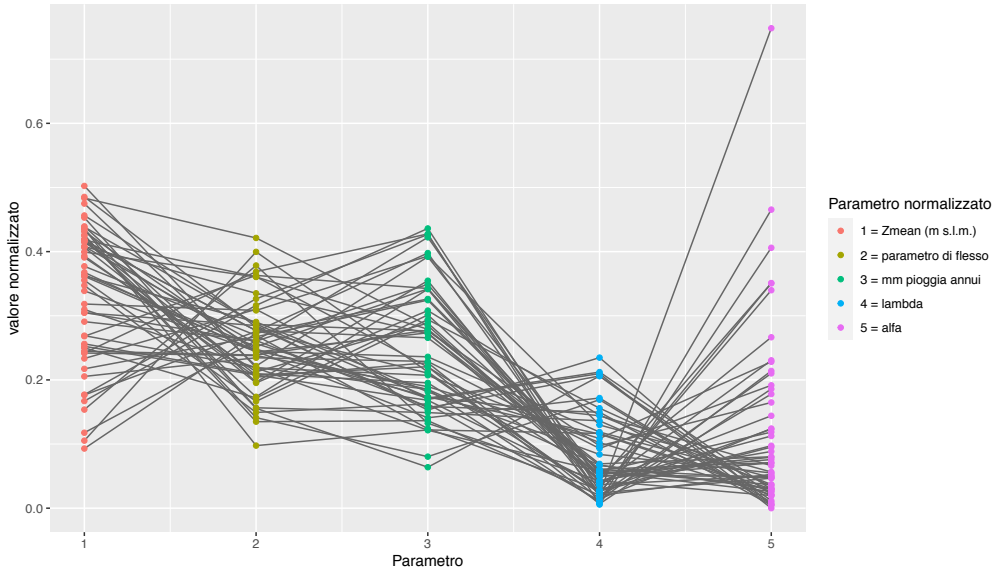


Figura 5.7 b: Andamento degli spaghetti plot relativi al gruppo E (56 bacini).

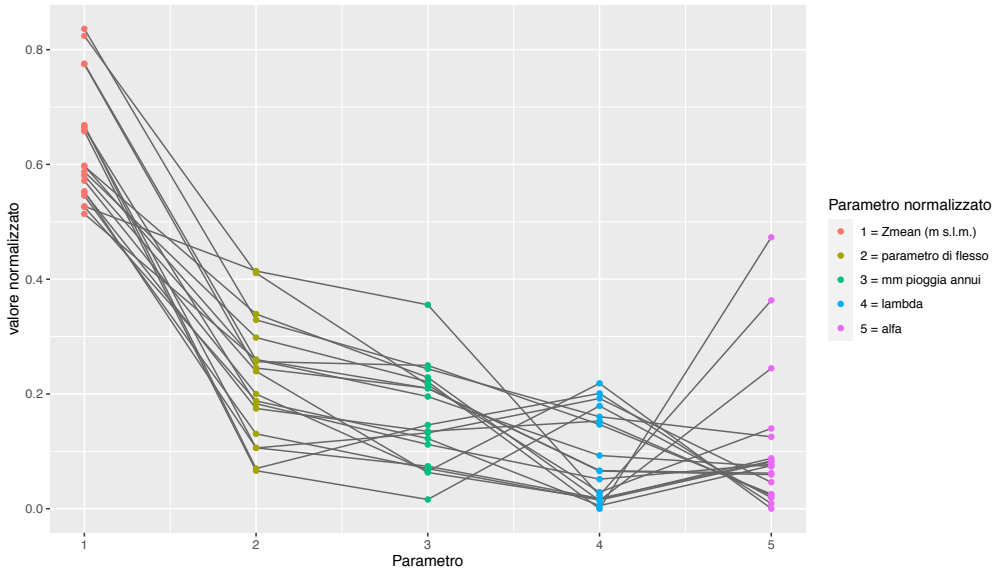


Figura 5.7 c: Andamento degli spaghetti plot relativi al gruppo F (19 bacini).

L'operazione di classificazione empirica dei bacini appartenenti al campione studiato ha consentito l'individuazione di sei gruppi di bacini. In particolare, rappresentando tramite *spaghetti plot* i set di parametri descrittori dei bacini appartenenti ai singoli gruppi individuati empiricamente, è stato possibile individuare sei andamenti diversi che verranno in seguito utilizzati a supporto dei metodi di aggregazione.

4.2. METODO K-MEANS

A seguito dell'analisi di carattere empirico, è stato applicato il metodo di aggregazione *k-means* per realizzare la suddivisione del campione di bacini iniziale in gruppi caratterizzati da combinazioni di parametri caratteristici simili. Come verrà successivamente illustrato (§ 4.3.2), i risultati ottenuti a seguito della valutazione di carattere empirico, sono stati adottati come criterio di base per l'applicazione del metodo aggregativo *k-means*.

4.2.1. Cenni teorici sul metodo

Il metodo *k-means* è un algoritmo di aggregazione diffusamente impiegato nel campo dell'analisi dei gruppi o *clustering*. Con il termine *clustering* si fa riferimento all'insieme di

tecniche di analisi multivariata dei dati impiegate per l'individuazione di gruppi omogenei all'interno di campione. In linea generale, i metodi di clustering si basano sull'individuazione di misure di similarità, o dissimilarità, tra gli elementi che compongono il campione studiato.

L'algoritmo di apprendimento non supervisionato *k-means* (MacQueen, 1967), appartiene alla famiglia dei metodi di clustering di tipo partizionale. I metodi appartenenti a questa famiglia sono in grado di generare una partizione del campione di osservazioni minimizzando una certa funzione di costo che, nel caso di *k-means* coincide con la varianza totale all'interno di ogni singolo gruppo. La funzione obiettivo che si vuole minimizzare è espressa come:

$$\sum_{j=1}^{k}\sum_{i=1}^{n} \parallel X_i^{(j)} - C_j \parallel^2 \tag{4.8}$$

Dove:

- k = è il numero di cluster;
- $X_i^{(j)}$ = osservazione i-esima del campione;
- C_j = indicatore della distanza tra osservazione e cluster.

Il numero di cluster all'interno dei quali aggregare le singole osservazioni deve essere definito a priori da parte dell'utente. L'algoritmo, una volta definito il numero di cluster k, segue la seguente procedura iterativa:

- selezione dei centroidi di primo tentativo: la prima operazione consiste nella selezione casuale di k osservazioni dal campione studiato. Questi k campioni sono utilizzati dall'algoritmo come centroidi di primo tentativo. Un centroide è il punto nello spazio corrispondente al valor medio assunto dalle osservazioni appartenenti al cluster stesso;
- assegnazione: ciascuna osservazione che compone il campione viene assegnata al centroide più vicino e in modo tale che la distanza euclidea tra osservazione e cluster sia minimizzata;

- calcolo dei nuovi centroidi: i nuovi k centroidi vengono ricalcolati a partire dai valori assunti dalle osservazioni assegnate all'i-esimo cluster. In particolare, i nuovi cluster coincidono con i baricentri dei cluster ottenuti nel precedente step;
- iterazione fino a convergenza del risultato: le ultime due operazioni descritte vengono rieseguite in loop fino a quando la posizione dei centroidi rimane invariata.

4.2.2. Applicazione del metodo

Il metodo *k-means* è stato impiegato facendo le seguenti assunzioni:

- il numero di gruppi in cui classificare i bacini è stato scelto pari a sei, coerentemente con quanto ottenuto dall'analisi di tipo empirico (la validità di questa scelta sarà oggetto di discussione nel § 4.3);
- dal momento che i centroidi di primo tentativo sono determinati mediante estrazioni casuali di osservazioni dal campione considerato, per arrivare a convergenza del risultato di classificazione nel caso di multiple applicazioni dell'algoritmo al campione, è stato assunto, in R Studio, un valore di *nstart* pari a venti. In particolare, è stato verificato che per valori di *nstart* maggiori o uguali a cinque, il risultato della suddivisione in cluster rimane invariato;
- la definizione dei centroidi di primo tentativo non è stata demandata all'algoritmo di calcolo (che generalmente svolge questa operazione mediate estrazione casuale all'interno del campione), bensì, sono state impiegate le curve medie dei sei gruppi ottenuti empiricamente. Tali curve congiungono i valori medi di ciascun parametro descrittore (v. Figura 4.8).

L'algoritmo di classificazione è stato applicato al campione di dati in esame tramite l'impiego della funzione *kmeans* (*stats* package) in RStudio®.

Il codice, realizzato appositamente per il caso in esame, è riportato in Allegato H.

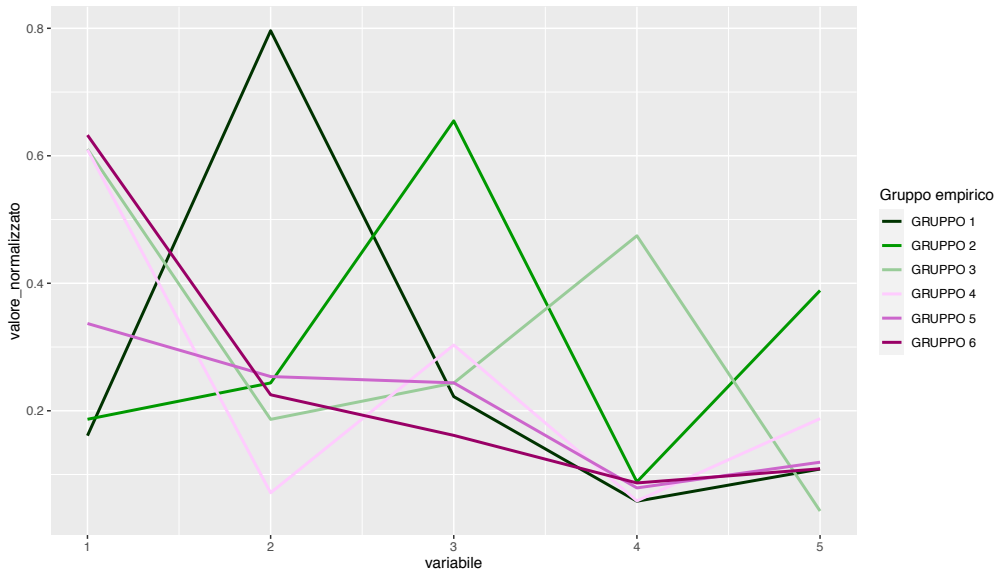


Figura 4.8: Curve medie relative ai sei gruppi identificati empiricamente e assunte come centroidi di primo tentativo per l'applicazione del metodo di aggregazione k-means.

I risultati ottenuti, riportati in Figura 4.9 a, 4.9 b, 4.9 c, 4.9 d, 4.9 e, 4.9 f. consistono in sei grafici analoghi a quelli mostrati in Figura 4.3 a, 4.3 b e 4.3 e in Figura 4.7 a, 4.7 b e 4.7 c.

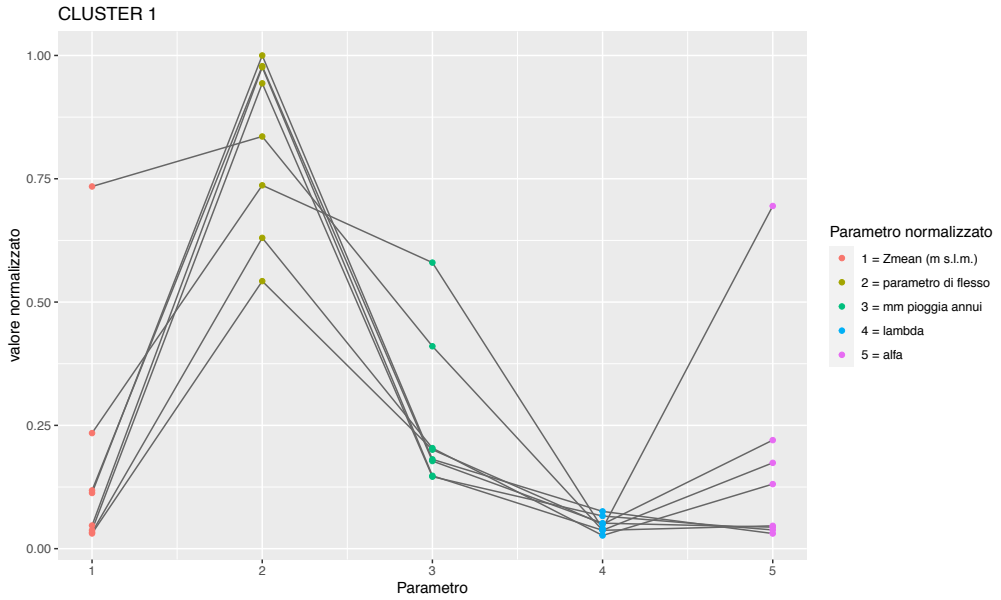


Figura 4.9 a: Cluster 1 ottenuto a seguito dell'applicazione del metodo di aggregazione k-means (8 bacini).

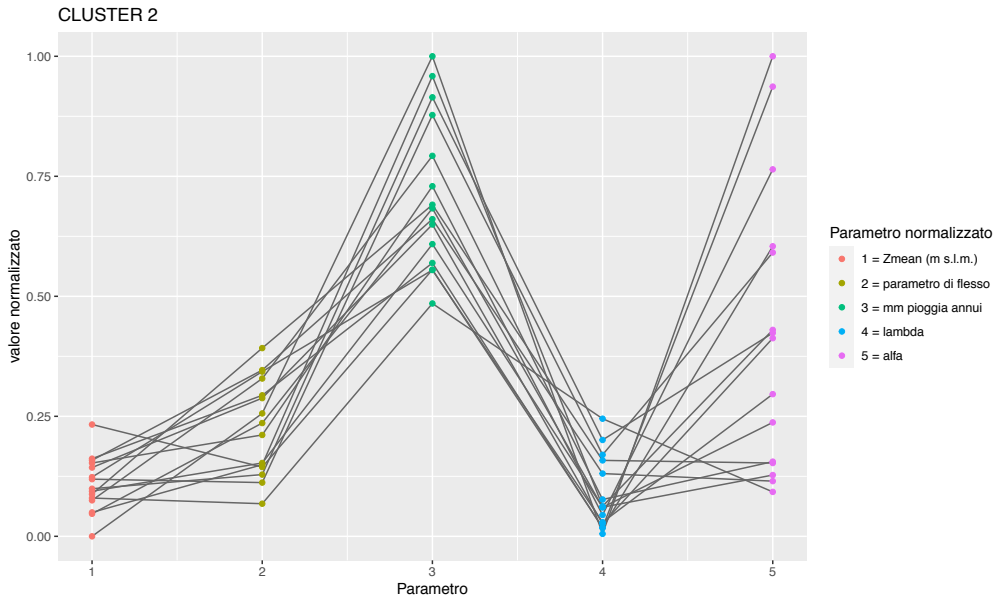


Figura 5.9 b: Cluster 2 ottenuto a seguito dell'applicazione del metodo di aggregazione k-means (15 bacini).

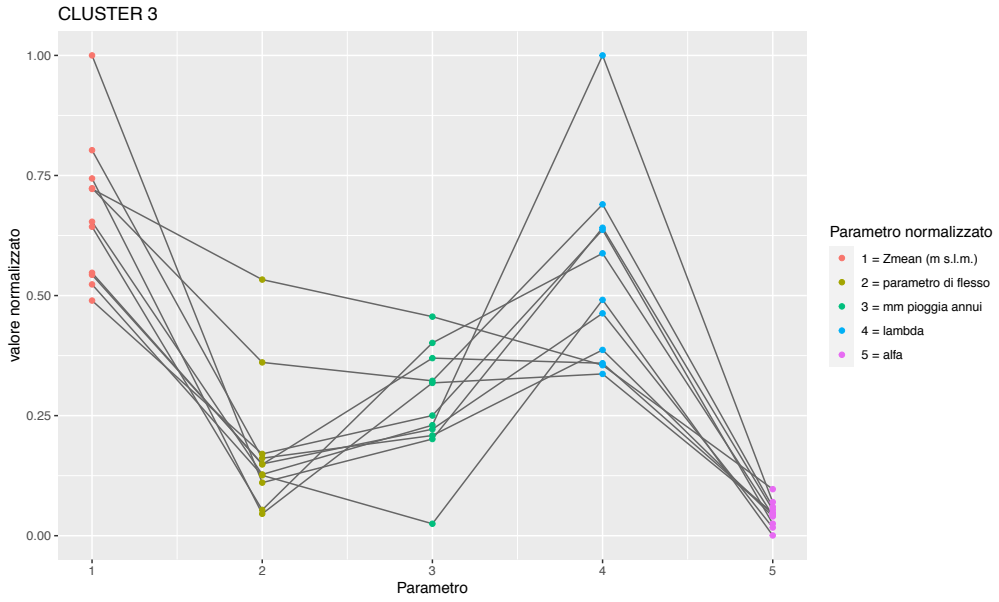


Figura 5 9 c: Cluster 3 ottenuto a seguito dell'applicazione del metodo di aggregazione k-means (11 bacini).

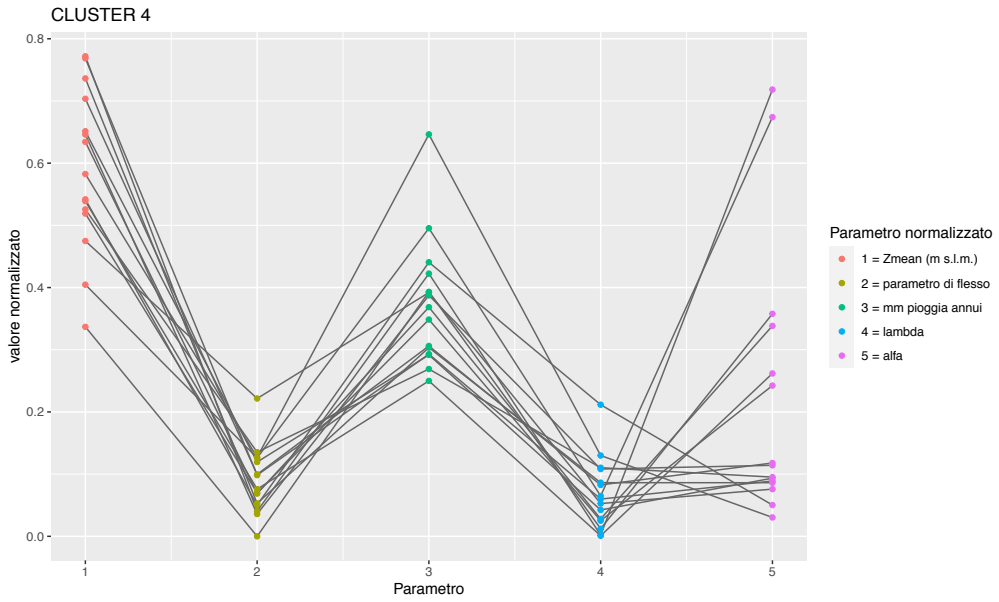


Figura 5.9 d: Cluster 4 ottenuto a seguito dell'applicazione del metodo di aggregazione k-means (15 bacini).

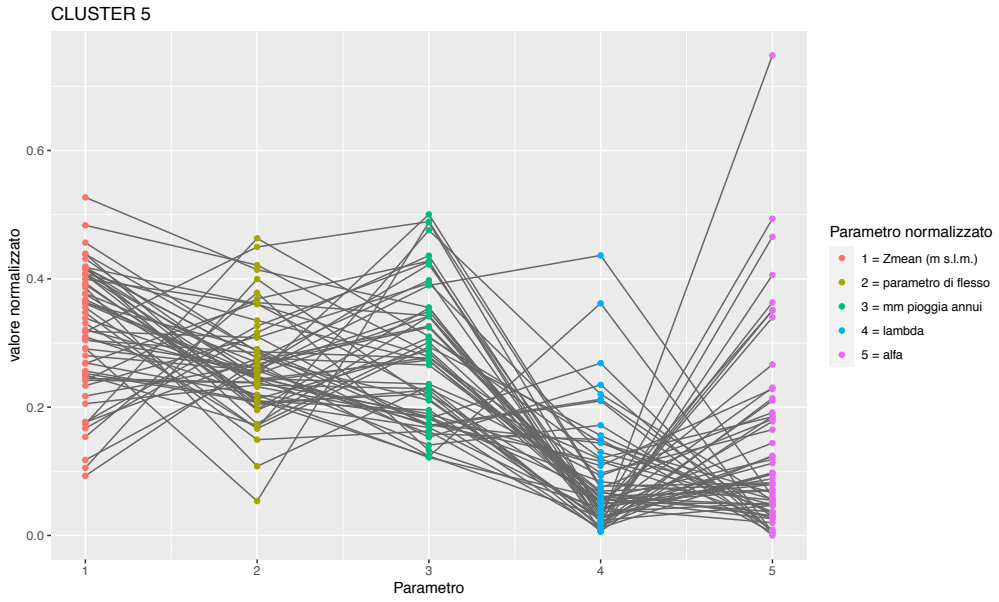


Figura 5.9 e: Cluster 5 ottenuto a seguito dell'applicazione del metodo di aggregazione k-means (58 bacini).

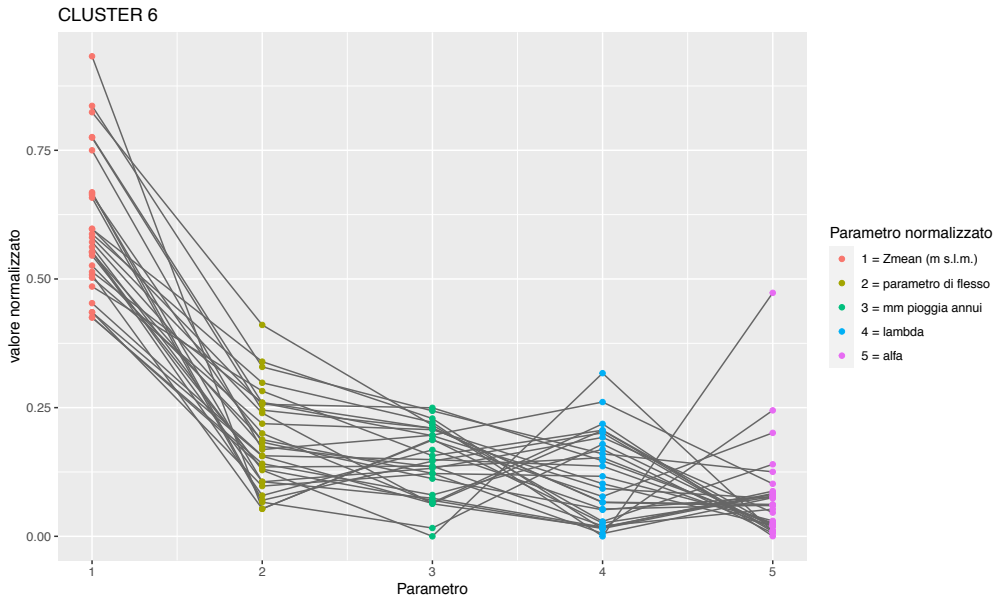


Figura 5.9 f: Cluster 6 ottenuto a seguito dell'applicazione del metodo di aggregazione k-means (30 bacini).

4.3. METODO DI WARD

Infine, per verificare la validità del numero di gruppi impiegato nelle analisi precedenti o se sia necessaria una sua variazione per ottenere un risultato globale più attendibile, è stata svolta un'ulteriore analisi di aggregazione per mezzo del metodo di aggregazione gerarchica di *Ward*.

4.3.1. Cenni teorici sul metodo di aggregazione gerarchica di Ward

Gli algoritmi di clustering gerarchico sono, tipicamente, di due tipi: agglomerativo o divisivo. I metodi agglomerativi partono da una partizione iniziale formata da n gruppi, ciascuno formato da una sola unità (tanti gruppi quante sono le osservazioni del campione studiato), per giungere, attraverso successive fusioni dei gruppi meno distanti tra loro, alla condizione in cui si ha un unico gruppo contenente tutte le unità. Gli algoritmi di tipo divisivo, invece, sono caratterizzati da una partizione iniziale formata da un unico gruppo comprendente l'intero campione. Attraverso passi successivi si giunge alla generazione di

una gerarchia di partizioni ottenute dividendo il gruppo iniziale in gruppi progressivamente più omogenei internamente. Di conseguenza, i primi sono detti di tipo *bottom-up*, mentre i secondi del tipo *top-down*.

Il risultato dei metodi aggregativi di tipo gerarchico prende la forma di un dendrogramma.

Il metodo di *Ward* (Ward, 1963) è un metodo di aggregazione gerarchica di tipo agglomerativo.

L'algoritmo, ad ogni passaggio, effettua una aggregazione delle osservazioni in classi individuando le coppie di cluster che determinano un minimo aumento della varianza totale all'interno del gruppo a seguito dell'unione. La misura di dissimilarità adottata è la distanza euclidea tra l'osservazione e il valore medio delle osservazioni appartenenti al gruppo.

In definitiva, la bontà dell'operazione di raggruppamento è considerata tanto migliore quanto più i gruppi risultano internamente omogeni e differenti l'uno dagli altri.

In genere, la determinazione del numero di classi finali non è univoca, a meno che non siano presenti motivazioni a priori per la sua determinazione. Operativamente, quindi, si effettua una prima analisi senza specificare il numero di classi finali, si analizza il dendrogramma ottenuto e si sceglie a che punto tagliarlo. Successivamente si può procedere con una seconda analisi specificando il numero di classi e quindi, a seguito di un'analisi dei risultati, stabilire se la clusterizzazione ottenuta è da ritenersi attendibile per i dati in esame.

4.3.2. Applicazione del metodo

Il metodo di aggregativo Ward è stato applicato al campione di bacini italiani tramite l'utilizzo della funzione *hclust* ("stats" package) in RStudio.

Il codice, realizzato appositamente per il caso in esame, è riportato in Allegato H.

Il dendrogramma ottenuto è riportato in Figura 4.10.

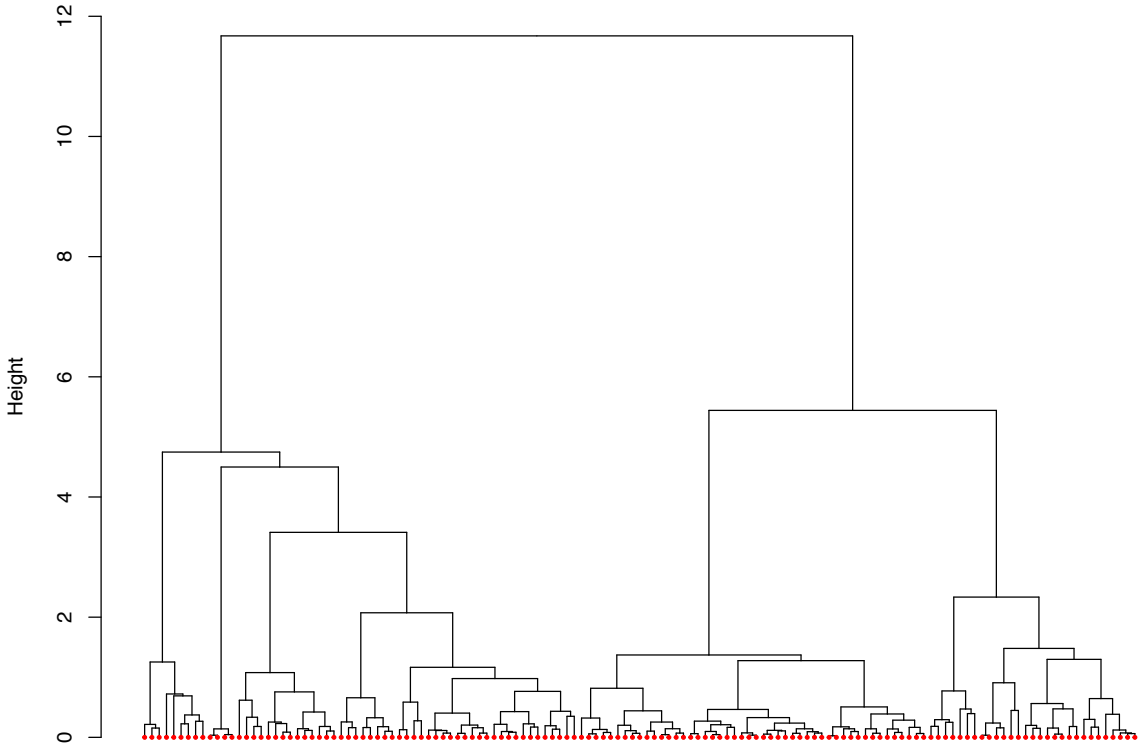


Figura 4.10: Dendrogramma ottenuto tramite l'implementazione della funzione hclust in R Studio e *risultante dall'applicazione del metodo di aggregazione di Ward sul campione analizzato. Ciascun punto rosso rappresenta uno dei 137 bacini italiani.*

Quando si effettuano analisi che prevedono l'implementazione di algoritmi di aggregazione, il processo di scelta del numero di gruppi all'interno dei quali classificare le osservazioni che compongono un determinato campione rappresenta una delle fasi di maggior rilievo.

In linea generale, si procede effettuando successivi tagli del dendrogramma ad altezze diverse. I tagli vengono effettuati ad altezze progressivamente inferiori così da consentire l'individuazione del numero di cluster che ottimizza la suddivisione del campione studiato in gruppi omogenei. In prima battuta si è intrapresa questa strada andando ad effettuare i tagli sul dendrogramma che consentissero di ottenere un numero di gruppi pari a cinque, sei e sette (+/- 1 rispetto al numero di gruppi ottenuti applicando *k-means*).

Si riportano di seguito le suddivisioni ottenute.

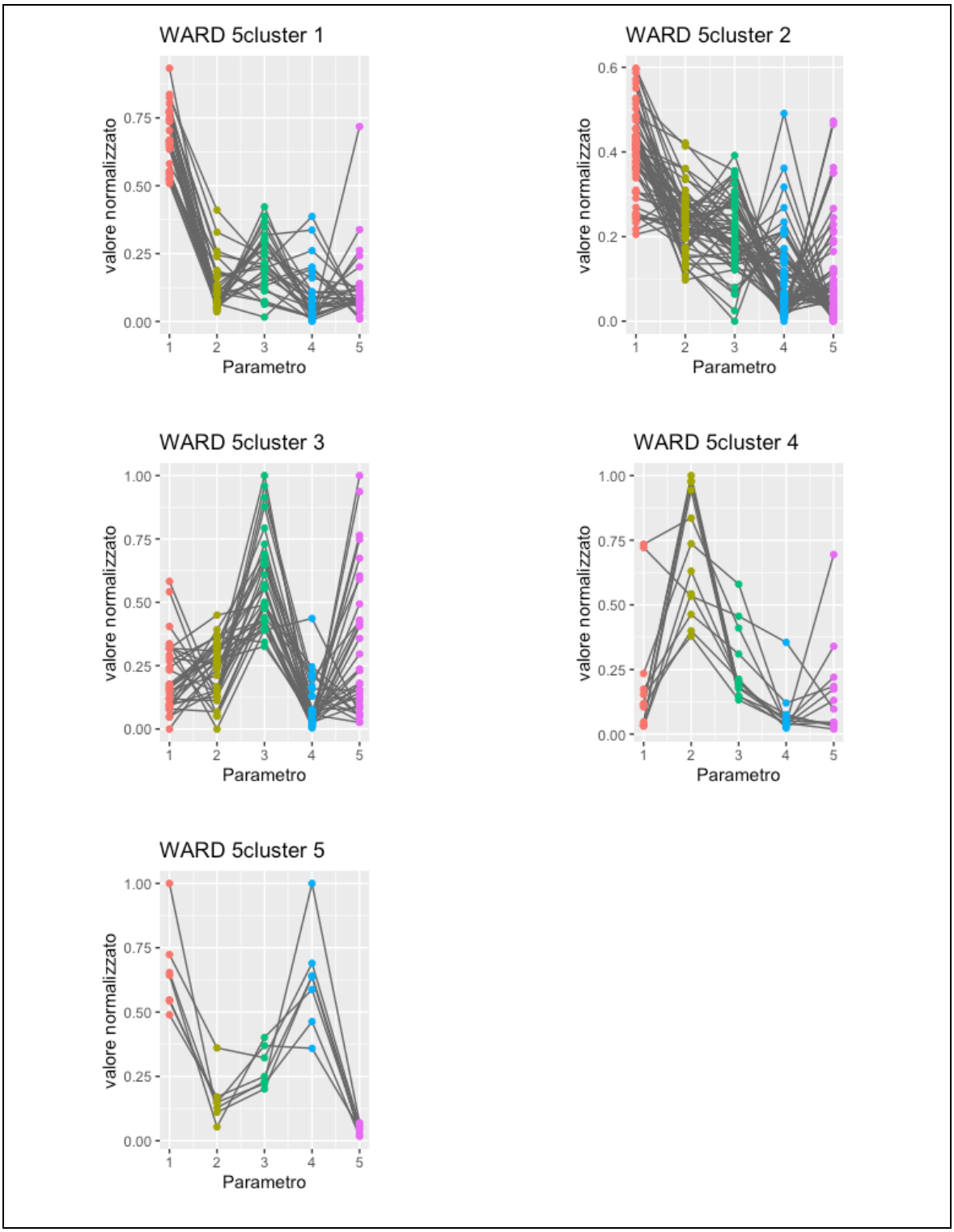


Figura 4.11: Spaghetti plot ottenuti tagliando il dendrogramma in modo tale da ottenere un numero di gruppi k pari a 5. (Sulle ascisse: Parametro 1: altitudine media del bacino, Parametro 2: parametro di flesso, Parametro 3: R, Parametro 4: λ e Parametro 5:α).

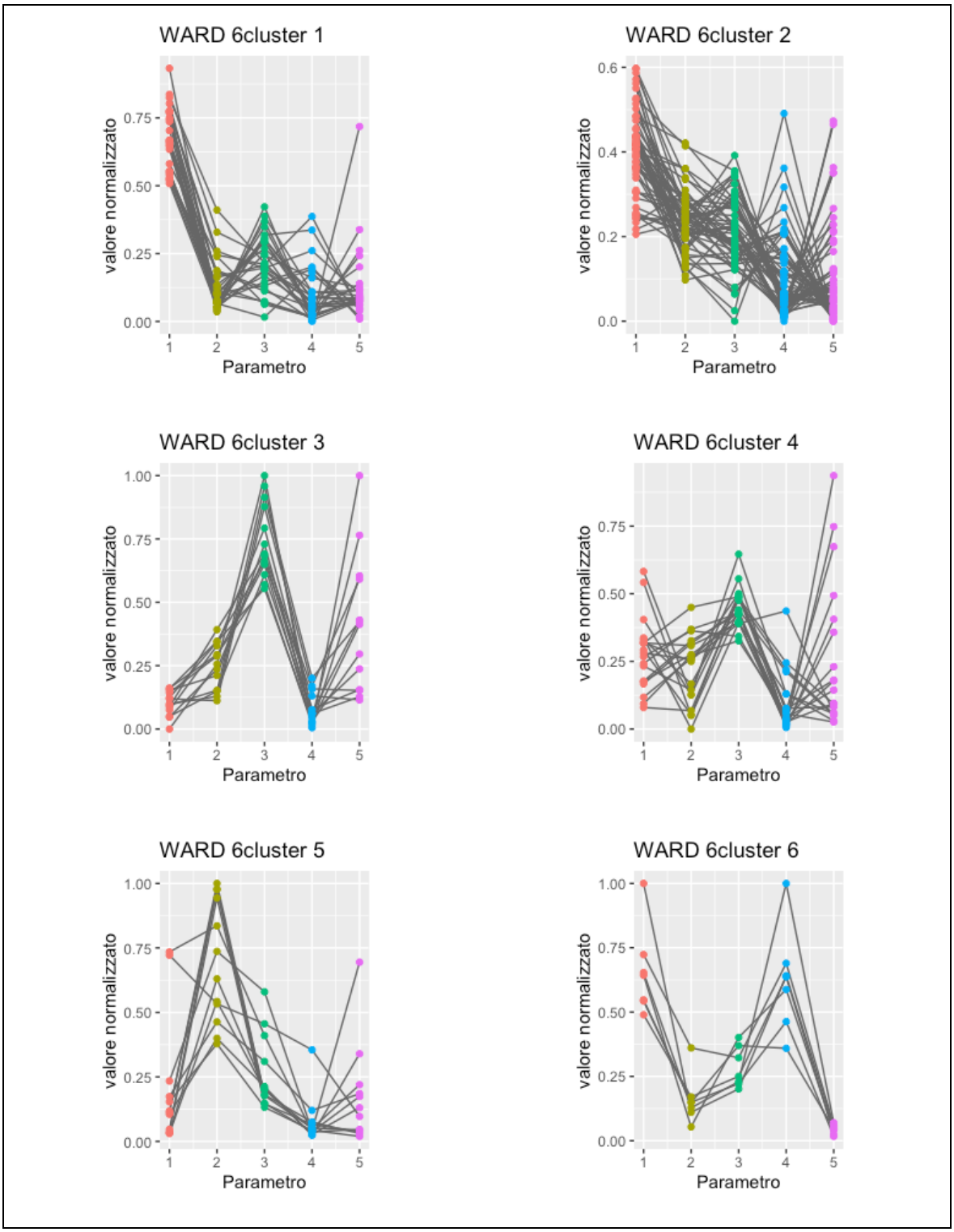
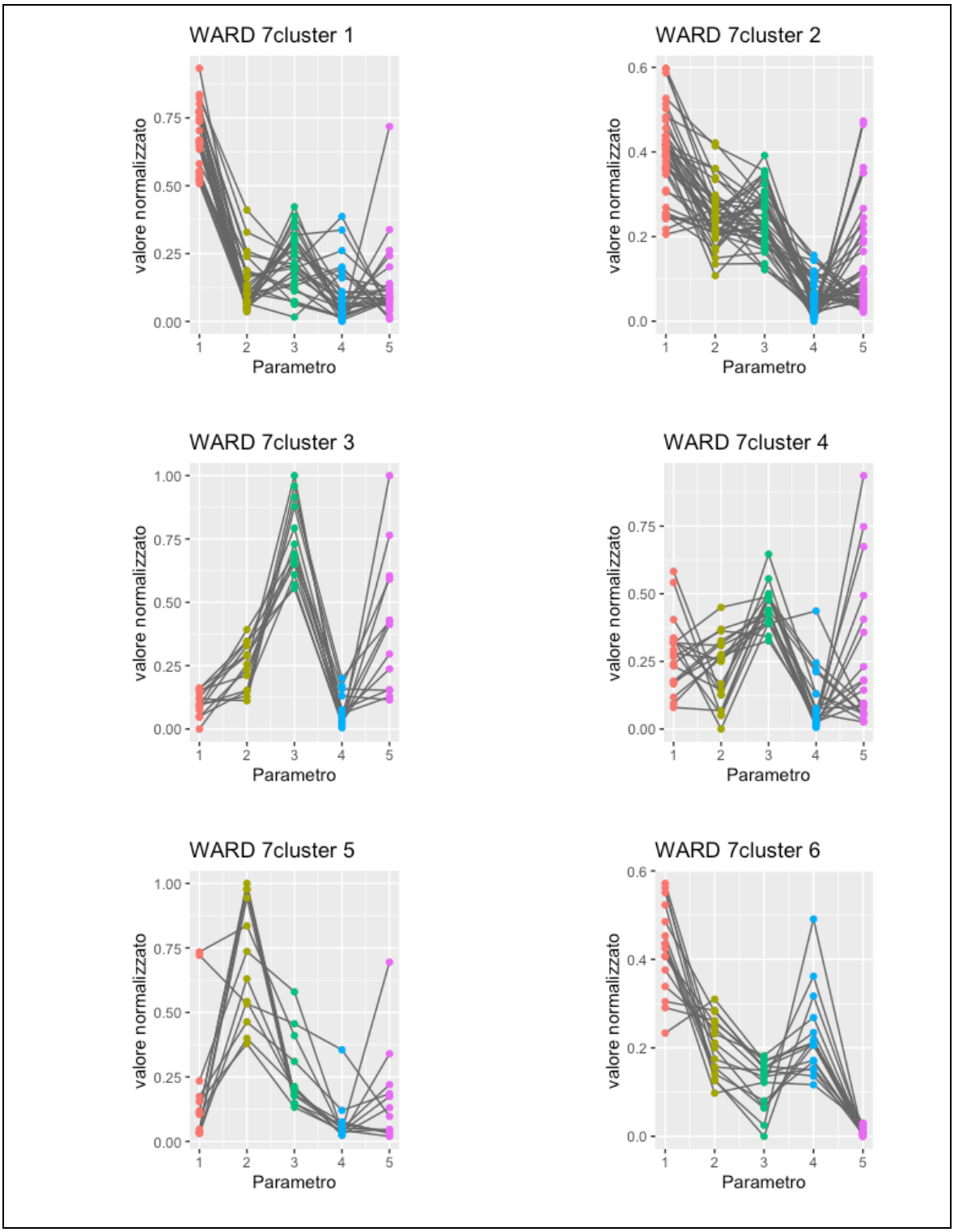


Figura 4.12: Spaghetti plot ottenuti tagliando il dendrogramma in modo tale da ottenere un numero di gruppi k pari a 6. (Sulle ascisse: Parametro 1: altitudine media del bacino, Parametro 2: parametro di flesso, Parametro 3: R, Parametro 4: λ e Parametro 5:α).


WARD 7cluster 1
valore normalizzato
0.00
0.25
0.50
0.75
1
2
3
4
5
Parametro
WARD 7cluster 2
valore normalizzato
0.0
0.2
0.4
0.6
1
2
3
4
5
Parametro
WARD 7cluster 3
valore normalizzato
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1
2
3
4
5
Parametro
WARD 7cluster 4
valore normalizzato
0.00
0.25
0.50
0.75
1
2
3
4
5
Parametro
WARD 7cluster 5
valore normalizzato
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1
2
3
4
5
Parametro
WARD 7cluster 6
valore normalizzato
0.0
0.2
0.4
0.6
1
2
3
4
5
Parametro

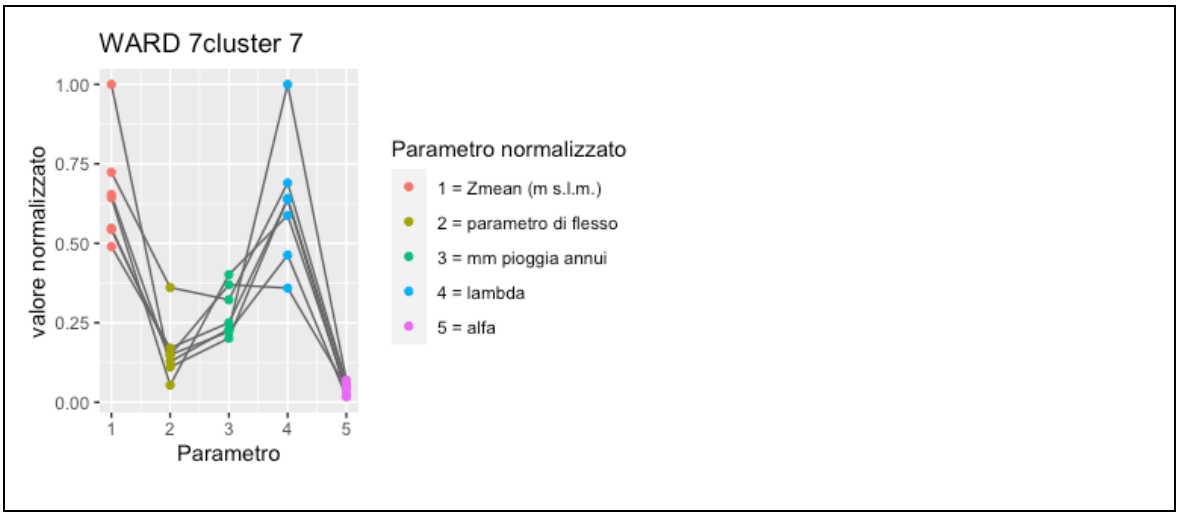


Figura 4.13: Spaghetti plot ottenuti tagliando il dendrogramma in modo tale da ottenere un numero di gruppi k pari a 7. (Sulle ascisse: Parametro 1: altitudine media del bacino, Parametro 2: parametro di flesso, Parametro 3: R, Parametro 4: λ e Parametro 5:α).

Non è semplice, tramite valutazione visiva dei risultati ottenuti (Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13) giungere all'individuazione del numero di cluster ottimale.

Nel caso di algoritmi di calcolo di tipo aggregativo, e in particolare quando il dataset analizzato è molto ampio, il dendrogramma ottenuto può risultare di difficile interpretazione e quindi non rappresentare uno strumento di supporto utile per la scelta del numero di cluster. In tali casi si ricorre all'utilizzo di indici di misura. Nel caso in esame, per la scelta di k, numero di gruppi, si sono utilizzati i seguenti indici di tipo interno:

- **WSS (total Within Sum of Squares)**:

$$WSS = \sum_{i}^{k} \sum_{x \in C_i} ||x - m_i||^2 \qquad (4.9)$$

Dove:

- k è il numero di cluster;
- x è l'osservazione;
- C_i è l'i-esimo cluster;
- m_i è il centroide dell'i-esimo cluster;
- $||x - m_i||$ è la distanza euclidea tra i due vettori.

Questo indice assumerà valori decrescenti al crescere del numero di cluster k dal momento che i singoli gruppi diventano progressivamente più piccoli e con osservazioni più simili al loro interno. Nello specifico, il raggiungimento del numero di cluster ideale è individuabile in corrispondenza della stabilizzazione dei valori assunti dall'indice.

- **CHIndex (Calinski-Harabasz Index)**:

$$CHI(k) = \frac{SS_B}{SS_W} \cdot \frac{N-k}{k-1} \tag{4.10}$$

Dove:

- k è il numero di cluster;
- N è il numero totale di osservazioni che compongono il campione;
- SS_B è la varianza totale tra cluster (**B**etween groups)
- SS_W è la varianza totale all'interno di un singolo cluster (**W**ithin groups).

Il numero di cluster ottimo è ottenuto in corrispondenza del k per cui vi sono grandi similarità interne ai cluster e grandi dissimilarità tra cluster: la soluzione è per questo motivo, il valore di k che massimizza CHI(k). Si sottolinea, che in alcuni casi, il k ottimo è individuato in corrispondenza del numero due. Tuttavia, se il raggruppamento in due sole categorie non rappresenta una soluzione che si adatta bene al caso in esame, è norma scegliere il valore di k che si osserva in corrispondenza di un picco (massimo locale).

Il calcolo degli indici è stato condotto in RStudio® con una funzione che fornisce oltre ai valori numerici, una rappresentazione grafica di tali indici. Tale funzione è riportata in Allegato H. Nello specifico, i due indici di misura sono stati calcolati per valori di k variabili tra 2 e 10. In Tabella 4.2 e Figura 4.14 si riportano i risultati ottenuti.

Tabella 4.2: Valori degli indici CHIndex e WSS calcolati per valori di k variabili tra 2 e 10.

k	CHIndex	WSS
2	55.06	13.77
3	43.48	11.76
4	51.01	9.02
5	53.23	7.42
6	52.05	6.49
7	48.97	5.95
8	48.52	5.34
9	50.14	4.69
10	48.77	4.35

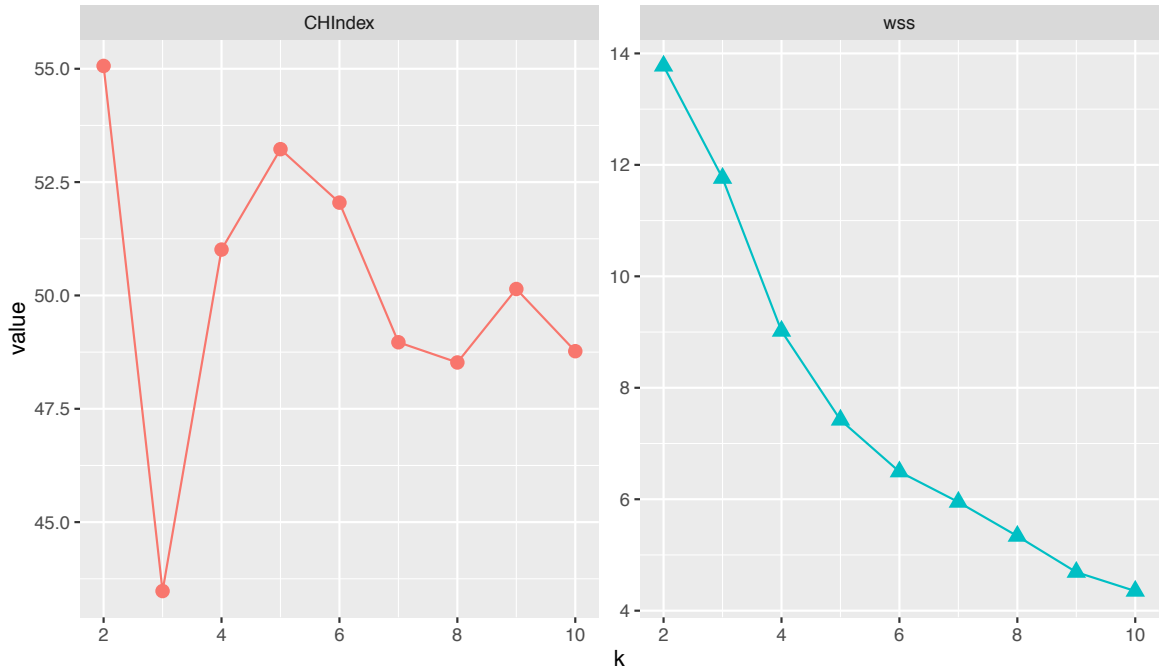


Figura 4.14: Rappresentazione grafica degli indici CHI e WSS calcolati per valori di k variabili tra 2 e 10.

Nella maggior parte dei casi, l'interpretazione dei risultati non è semplice e univoca e, soprattutto nel caso dell'indice WSS, può essere abbastanza soggettiva. Nello specifico, osservando l'andamento dell'indice CHI, in rosso in Figura 4.14, è stato osservato che il valore massimo si attesta in corrispondenza del valore k pari a 2. Ciononostante, è risultato evidente che, nel caso analizzato, la suddivisione del campione in sole due classi non fosse sufficiente; motivo per cui il valore di k ottimale non è due. In tali casi il valore di k è in

corrispondenza del successivo picco individuato sul grafico. Il valore di k ottimale, quindi, è stato individuato pari a 5. Per quanto riguarda l'indice WWS, rappresentato in azzurro in Figura 4.14, non è stato possibile individuare con precisione il valore di k ottimo in corrispondenza del quale si verificasse una stabilizzazione dei valori. Tuttavia, è stato ritenuto ragionevole pensare ad una stabilizzazione in corrispondenza del valore di k pari a sei.

In conclusione, a seguito dei risultati ottenuti calcolando i due indici CHI e WSS e del risultato ottenuto in precedenza tramite l'applicazione di *k-means* a seguito della procedura osservazionale (§4.2 e §4.1), si è ritenuto valido assumere un numero di gruppi pari a sei. Di conseguenza, è stato possibile validare la suddivisione ottenuta attraverso l'applicazione del metodo *k-means*.

La classificazione dei bacini nei singoli gruppi individuati a seguito dell'applicazione del metodo è stata riportata in Allegato G.

5. APPLICAZIONE DEL MODELLO FLOODALP AI BACINI DEL NORD-OVEST ITALIANO

A seguito dell'applicazione dell'analisi di sensitività al modello *FloodAlp*, questo è stato testato applicandolo a 22 bacini situati nella porzione Nord-Ovest dell'arco alpino italiano. In particolare, l'obiettivo dell'analisi è stato quello di sottoporre a verifica la capacità del modello geomorfoclimatico di determinare in maniera attendibile la distribuzione di frequenza delle piene a partire da dati di pioggia giornalieri areali registrati su bacini strumentati. In questo modo è possibile testare se lo spostamento della distribuzione delle portate rispetto a quella generata dal modello a partire dai dati di pioggia è dovuto al contributo fornito dalla neve.

5.1. DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI INPUT DEL MODELLO

I 22 bacini sono stati selezionati verificando il rispetto dei criteri precedentemente illustrati (Capitolo 1) e riguardanti la quota media del bacino, la lunghezza della serie storica disponibile e l'assenza di estesi volumi di invaso a monte.

L'applicazione del modello geomorfoclimatico per la stima della distribuzione di probabilità cumulata richiede l'utilizzo di dati di relativi alle precipitazioni estreme sotto l'ipotesi che queste si distribuiscano seguendo la rappresentazione di *Poisson*. La rappresentazione di *Poisson,* anche nota come *legge degli eventi rari,* è descritta dal parametro fondamentale λ, ossia il numero di eventi estremi che intercorrono in un dato intervallo di tempo.

Ciascun evento estremo è ulteriormente definito da una determinata altezza di precipitazione h, che, modellata come variabile casuale descritta dalla distribuzione esponenziale, ha un valore medio annuale pari ad α.

L'applicazione della distribuzione di Poisson implica l'accettazione delle seguenti tre ipotesi di base:

- eventi rari: in un intervallo di tempo sufficientemente ridotto un evento estremo non può verificarsi più di una volta;
- eventi stazionari: la probabilità del verificarsi di un evento è costante nell'intervallo temporale di ampiezza t. Tale probabilità, di conseguenza, dipende unicamente dall'ampiezza dell'intervallo temporale considerato e non dalla sua posizione sull'asse dei tempi;
- eventi indipendenti gli uni dagli altri: gli eventi che si verificano in intervalli disgiunti sono tra loro indipendenti e non vengono influenzati da quanto accade in precedenza. Tale caratteristica prende il nome di *assenza di memoria.*

Per l'applicazione del modello risulta quindi necessario definire, per ciascun bacino analizzato, il valore dei due parametri climatici di input α_P e λ_P. Tale operazione può essere condotta seguendo metodologie differenti a seconda del dato di partenza disponibile. Più precisamente, la determinazione dei due parametri può essere effettuata considerando i dati di precipitazione giornaliera ottnuti mediante misurazioni in continuo (Caso 1) o, alternativamente, considerando le serie dei massimi annui di precipitazione disponibili per differenti durate dell'evento (Caso 2). La durata dell'evento, nel Caso 1 è fissa e pari a 24 h; nel Caso 2, invece, la durata del periodo temporale associato al dato è variabile. A causa di tale variabilita, il parametro α può essere espresso in mm/h oppure in mm/d.

Tuttavia, la disponibilità dei dati di precipitazione non è sempre garantita; per questo motivo, in assenza di dati pluviometrici è possibile, assumendo valido il processo di trasformazione afflussi deflussi sul quale il modello in analisi si basa, ricorrere all'impiego di dati di tipo idrometrico.

Tipicamente, il dato di più facile reperimento è il valore di portata massima annua al colmo di piena (Caso 3), di cui si conoscono le serie storiche. Analogamente a quanto illustrato

per le precipitazioni, qualora siano disponibili, è possibile ricorrere all'utilizzo delle serie continue di portata giornaliera (Caso 4).

Durante l'analisi condotta si è scelto di impiegare, per la definizione di α_P e λ_P, i massimi annui di pioggia giornalieri areali. In particolare, tali parametri sono stati determinati ipotizzando che le serie delle piogge estreme fossero caratterizzate da una distribuzione di frequenza alla Gumbel (o distribuzione del valore estremo di 1° tipo - EV1) in un intervallo di riferimento di durata critica d.

Siccome il calcolo della curva di probabilità cumulata riferita al singolo bacino implementato nel modello geomorfoclimatico in utilizzo viene eseguito in maniera differente per bacini di tipo Bounded (quota media inferiore al valore ZT_{max}) e di tipo High Elevation (quota media maggiore di ZT_{max}), i bacini analizzati sono stati suddivisi in queste due categorie.

Si riportano in Tabella 5.1 i parametri descrittori del campione di bacini analizzati e in Tabella 5.2 i valori dei parametri di pioggia α e λ riferiti ai dati idrometrici ed idrologici registrati.

Tabella 5.1: Caratteristiche morfologiche e climatiche dei bacini considerati per l'applicazione del modello. Sono indicati con il colore blu i bacini di tipo Bounded e in nero quelli di tipo High elevation.

Codice	Bacino	Area (km²)	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P totale (mm/anno)
11013	Toce a Candoglia	1539.4	4488	1671	203	0.505	1397.7
11015	Mastallone a Ponte Folle	146.6	2417	1324	492	1.649	1747.6
11016	Rutor a Promise	45	3414	2554	1508	-0.254	1127
11019	Ayasse a Champorcher	41.85	3119	2364	1372	-0.336	1249.4
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	3319.9	4727	2085	259	0.739	990.6
11021	Orco a Pont Canavese	613.4	3835	1928	429	0.435	1201.6
11022	Stura Lanzo a Lanzo	578.4	3633	1769	461	0.7	1182.9
11024	Chisone a S. Martino	580.5	3228	1734	417	0.208	921.8
11025	Grana a Monterosso	109.6	2607	1534	711	0.488	1006.2
11026	Tanaro a Ponte Nava	1048.5	2612	1569	788	0.543	954.8
11027	Tanaro a Nucetto	374.9	2612	1224	453	1.409	994.5

Codice	Bacino	Area (km²)	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P totale (mm/anno)
11029	Stura di Demonte a Gaiola	559.9	2980	1817	661	0.009	1024
11040	Po a Crissolo	37.3	3704	2240	1294	0.923	1007.4
11051	Dora Baltea a Aosta	1846.4	4727	2262	547	0.722	1048.6
11053	Lys a Gressoney St. Jean	90.4	4427	2637	1398	0.735	969.7
11054	Dora Riparia a Oulx	257.5	3258	2168	1079	0.001	792.7
11055	Dora Riparia a S. Antonino di Susa	1037.9	3577	1898	385	0.169	801.9
11056	Corsaglia a Presa C. Molline	89.4	2593	1529	643	0.316	1123.9
11058	Stura di Demonte a Pianche	179.7	2980	1073	972	-0.252	959.7
11059	Rio Bagni a Bagni Vinadio	61.2	2932	2138	1257	-0.144	1048.9
11075	Sesia a Ponte Aranco	702.9	4471	1496	328	3.026	1530
11077	Chisone a Fenestrelle	154.1	3228	2152	1153	0.118	786.8

Tabella 5.2: Valori dei parametri di pioggia α e λ riferiti ai dati idrometrici ed idrologici misurati.

		serie storiche di massimi di portata				precipitazioni giornaliere	
Codice	Bacino	μ_{Qoss} (m³/s)	$CV_{Q\,oss}$	α_{Qoss} (mm/giorno)	λ_{Qoss} (eventi/anno)	α_P (mm/giorno)	λ_P (eventi/anno)
11013	Toce a Candoglia	696.7	0.48	29.2	7	29.2	16.2
11015	Mastallone a Ponte Folle	171.8	0.68	105.9	3.1	46.3	9.7
11016	Rutor a Promise	12	0.28	9.2	43.1	12.8	21.5
11019	Ayasse a Champorcher	12.6	0.37	15.1	14.7	46.5	5
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	497.8	0.4	8.1	11.8	14	19.9
11021	Orco a Pont Canavese	205.9	0.5	22.4	6.2	26.2	11.8
11022	Stura Lanzo a Lanzo	225.5	0.62	32.2	3.8	25.9	16.8
11024	Chisone a S. Martino	117.5	0.78	21.2	2.5	24.7	6.9
11025	Grana a Monterosso	25.1	0.93	30.8	1.9	19.9	16.6
11026	Tanaro a Ponte Nava	54.9	0.56	28.2	4.6	38.4	4.5
11027	Tanaro a Nucetto	157.6	0.56	32	4.6	27.7	8.5
11029	Stura di Demonte a Gaiola	70.2	0.38	6.4	14	12.4	41.1
11040	Po a Crissolo	12.6	1.3	59.5	1.3	31.6	9.1
11051	Dora Baltea a Aosta	221.8	0.32	5.1	27.3	12.1	15.3
Codice	Bacino	μ_{Qoss} (m³/s)	$CV_{Q\,oss}$	α_{Qoss} (mm/giorno)	λ_{Qoss} (eventi/anno)	α_P (mm/giorno)	λ_P (eventi/anno)

11053	Lys a Gressoney St. Jean	19.1	0.24	6.9	92.2	19.3	17.4
11054	Dora Riparia a Oulx	29.5	0.5	7.5	6.3	13.8	19.3
11055	Dora Riparia a S. A. di Susa	84	0.43	4.6	9.6	12.3	23.4
11056	Corsaglia a Presa C. Molline	25.1	0.54	20.4	6.2	20.1	12.5
11058	Stura di Demonte a Pianche	28.8	0.77	16.4	2.5	17.8	17.2
11059	Rio Bagni a Bagni Vinadio	14.1	0.85	25.6	2.2	16.4	21.1
11075	Sesia a Ponte Aranco	628.8	0.66	80.3	3.3	34.8	13.7
11077	Chisone a Fenestrelle	16.9	0.54	8.1	5	21.2	9.4

5.2. ANALISI DEI RISULTATI

Per ciascun bacino, è stata ricavata, applicando il modello *FloodAlp*, la curva di probabilità cumulata mediante il metodo Hypsometric, sulla base delle serie storiche dei massimi di precipitazione areale giornaliera. In Figura 5.1 si riporta, a titolo di esempio, il grafico delle curve relative al bacino 11015: Mastallone a Ponte Folle, mentre in Allegato D si riportano le curve relative a tutti i ventidue bacini analizzati.

Nello specifico, le curve relative al singolo bacino sono state riportate su carta probabilistica di Gumbel, dove la variabile ridotta è definita come:

$$variabile\ ridotta = -\ln\left(-\ln\left(F(x)\right)\right) \tag{5.1}$$

con F(x) funzione di distribuzione di probabilità cumulata.

Sotto l'ipotesi che le portate si distribuiscano secondo la distribuzione di Gumbel, la rappresentazione delle osservazioni assumerà la forma di una retta.

In Figura 5.1 la curva blu rappresenta la funzione di distribuzione cumulata ottenuta a seguito dell'applicazione del modello *FloodAlp* (è una CDF empirica) e i cerchi vuoti neri le osservazioni di portata misurate; queste ultime sono state riportate in carta probabilistica mediante rappresentazione con plotting position di Hazen. La curva verde, invece, è stata ottenuta fittando i dati di portata registrati con una Gumbel, ossia è stata rappresentata una distribuzione di Gumbel descritta dai parametri θ_1 e θ_2 ottenuti applicando le

equazioni 4.2 e 4.3 e considerando il valore medio e la deviazione standard delle serie storiche di portata osservate (è una CDF ottenuta analiticamente).

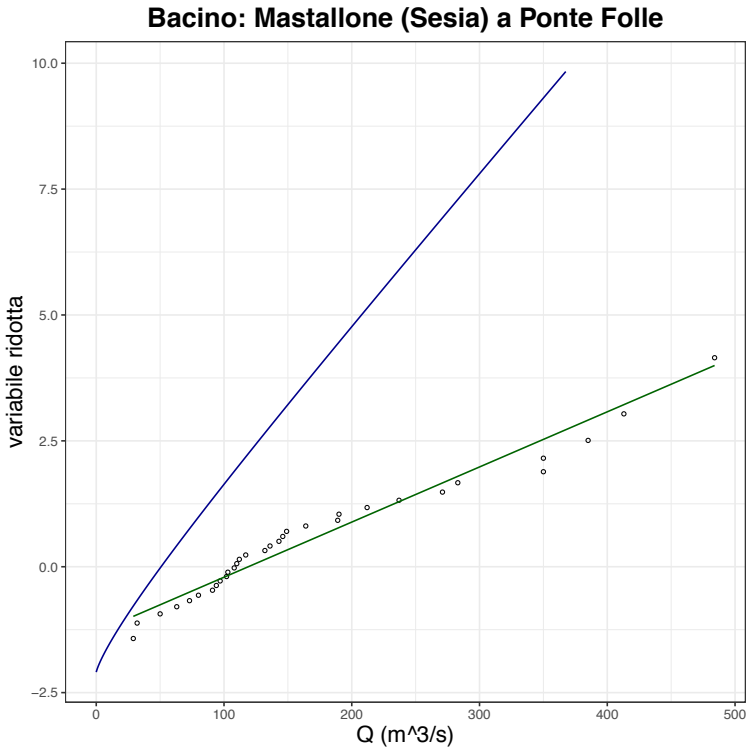


Figura 5.1: Curve relative al bacino 11015. In blu la CDF del modello, in verde la Gumbel delle Q osservate (cerchi vuoti neri).

In seguito, è stata calcolata la media della distribuzione di probabilità cumulata generata dal modello. Il calcolo di tale valore è stato condotto seguendo due vie diverse.

La prima prevede l'utilizzo del metodo dei momenti: il valore medio della distribuzione può essere ricavato a partire dall'equazione 5.2.

$$\mu = \theta_1 + \gamma_E \theta_2 \tag{5.2}$$

I parametri θ_1 e θ_2 che compaiono nella formulazione 5.2 sono stati determinati per via grafica forzando la curva di probabilità cumulata ottenuta sul modello probabilistico di Gumbel operando un *best fitting*.

Sotto l'ipotesi secondo la quale la curva di probabilità cumulata stimata dal modello sia distribuita secondo una distribuzione di Gumbel, la stima dei parametri, operata per via grafica, è stata condotta applicando una regressione lineare alla curva (funzione *lm* in RStudio®). Nello specifico, la regressione è stata applicata, per tutti i bacini, all'intervallo di dati della CDF, generata dal modello, corrispondenti ad un range di tempo di ritorno T con estremi 2 e 3000 anni. Di conseguenza, l'intervallo di valori assunti dalla variabile ridotta è definito dai valori 0.367 e 8.006. L'intercetta e il coefficiente angolare della retta interpolante coincidono con, rispettivamente, θ_1 (parametro di posizione) e θ_2 (parametro di scala) parametri della distribuzione di Gumbel.

Risulta opportuno osservare che la procedura descritta, sebbene consenta il calcolo del valore medio della distribuzione, presenta alcune criticità. Fra queste, appare molto importante il rischio di degradazione del modello geomorfoclimatico, il quale è basato su processi fisici specifici, ad un modello empirico, per via dell'operazione di fitting.

Successivamente, il valore medio della distribuzione di probabilità cumulata è stato anche ricavato applicando un metodo più rigoroso, i cui dettagli sono riportati in Appendice.

In particolare, si è adottata l'Equazione 31 (Appendice) con il concetto di distribuzione censurata per il calcolo della media μ e del coefficiente di variazione CV. Per il calcolo del momento di terzo ordine della distribuzione CA, invece, è stata applicata l'equazione 3.4.

Si riportano in Tabella 5.3 i valori dei parametri θ_1 e θ_2 e il valor medio ricavati operando un *best fitting* sulla CDF generata dal modello e in Tabella 5.4 i valori dei momenti delle distribuzioni di probabilità associati ai bacini analizzati.

Tabella 5.3: Valori dei parametri θ_1 e θ_2 e valor medio ricavati operando un best fitting sulla CDF generata dal modello.

Codice	Bacino	$\theta_{1\,mod}$ (m^3/s)	$\theta_{2\,mod}$ (m^3/s)	μ
11013	Toce a Candoglia	500.89	203.03	558.69
11015	Mastallone (Sesia) a Ponte Folle	47.04	32.24	70.63
11016	Rutor (Dora Baltea) a Promise	3.49	2.46	4.91
11019	Ayasse a Champorcher	0.57	7.87	5.11
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	521.54	207.35	641.22

Codice	Bacino	$\theta_{1\ mod}$ (m^3/s)	$\theta_{2\ mod}$ (m^3/s)	μ
11021	Orco a Pont Canavese	121.05	70.36	161.66
11022	Stura di Lanzo a Lanzo	136.08	66.40	174.41
11024	Chisone a S. Martino	61.56	61.37	96.98
11025	Grana a Monterosso	18.60	10.28	24.53
11026	Tanaro a Ponte di Nava	15.81	26.32	31.00
11027	Tanaro a Nucetto	68.95	48.27	96.81
11029	Stura di Demonte a Gaiola	71.47	30.77	89.23
11040	Po a Crissolo	6.66	5.13	9.62
11051	Dora Baltea ad Aosta	219.68	99.18	276.93
11053	Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean	15.80	7.70	20.24
11054	Dora Riparia a Ulzio (Oulx)	24.48	15.36	33.35
11055	Dora Riparia a S.Antonio di Susa	121.72	56.03	154.06
11056	Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline	12.85	8.38	17.69
11058	Stura di Demonte a Pianche	17.75	13.82	25.73
11059	Rio Bagni a Bagni di Vinadio	6.29	4.45	8.86
11075	Sesia a Ponte Aranco	270.13	111.77	334.64
11077	Chisone a Fenestrelle	13.65	13.95	21.70

Tabella 5.4: Valori dei momenti delle distribuzioni di probabilità associate ai 22 bacini italiani analizzati.

Codice	Bacino	μ_{CDF}	CV	CA
11013	Toce a Candoglia	37.60	0.41	1.31
11015	Mastallone (Sesia) a Ponte Folle	49.73	0.54	1.29
11016	Rutor (Dora Baltea) a Promise	11.84	0.53	1.47
11019	Ayasse a Champorcher	18.92	0.99	1.98
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	19.85	0.38	1.29
11021	Orco a Pont Canavese	27.78	0.49	1.36
11022	Stura di Lanzo a Lanzo	31.34	0.44	1.32
11024	Chisone a S. Martino	18.6	0.65	1.5
11025	Grana a Monterosso	23.17	0.49	1.32
11026	Tanaro a Ponte di Nava	23.98	0.83	1.57
11027	Tanaro a Nucetto	27.07	0.57	1.33
11029	Stura di Demonte a Gaiola	16.55	0.4	1.33

Codice	Bacino	μ_{CDF}	CV	CA
11040	Po a Crissolo	27.81	0.59	1.39
11051	Dora Baltea ad Aosta	15.52	0.42	1.31
11053	Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean	23.35	0.44	1.32
11054	Dora Riparia a Ulzio (Oulx)	13.85	0.5	1.41
11055	Dora Riparia a S.Antonino di Susa	15.45	0.42	1.34
11056	Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline	20.9	0.54	1.36
11058	Stura di Demonte a Pianche	15.69	0.56	1.49
11059	Rio Bagni a Bagni di Vinadio	15.7	0.54	1.45
11075	Sesia a Ponte Aranco	48.57	0.4	1.24
11077	Chisone a Fenestrelle	15.77	0.65	1.51

Dal momento che i valori di probabilità cumulata ottenuti dal modello sono calcolati su valori di portata specifica q, il valore di portata Q medio è stato ottenuto a partire dal valore del momento di primo ordine della CDF, μ_{CDF}, come:

$$Q_{media} = \left({}^{\mu_{CDF}}/_{100}\right) \cdot Area_{bacino} \tag{5.3}$$

I valori di Q_{media} ricavati applicando l'equazione 6.3 sono riportati in tabella Tabella 5.5.

Tabella 5.5: Valori di Q_{media} relativi ai 22 bacini italiani analizzati.

Codice	Bacino	μ_{CFD}	Area $_{bacino}$	Q $_{media}$
11013	Toce a Candoglia	37.6	1539	578.67
11015	Mastallone (Sesia) a Ponte Folle	49.73	147	73.10
11016	Rutor (Dora Baltea) a Promise	11.84	45	5.33
11019	Ayasse a Champorcher	18.92	42	7.95
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	19.85	3320	659.11
11021	Orco a Pont Canavese	27.78	613	170.29
11022	Stura di Lanzo a Lanzo	31.34	578	181.15
11024	Chisone a S. Martino	18.6	580	107.89
11025	Grana a Monterosso	23.17	110	25.49
11026	Tanaro a Ponte di Nava	23.98	149	35.74

Codice	Bacino	μ_{CFD}	Area $_{bacino}$	Q $_{media}$
11027	Tanaro a Nucetto	27.07	375	101.52
11029	Stura di Demonte a Gaiola	16.55	560	92.67
11040	Po a Crissolo	27.81	37	10.29
11051	Dora Baltea ad Aosta	15.52	1846	286.44
11053	Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean	23.35	90	21.02
11054	Dora Riparia a Ulzio (Oulx)	13.85	257	35.60
11055	Dora Riparia a S.Antonino di Susa	15.45	1038	160.35
11056	Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline	20.9	89	18.60
11058	Stura di Demonte a Pianche	15.69	180	28.24
11059	Rio Bagni a Bagni di Vinadio	15.7	61	9.58
11075	Sesia a Ponte Aranco	48.57	703	341.45
11077	Chisone a Fenestrelle	15.77	154	24.29

Confrontando i valori di portata media ottenuti applicando i due metodi e riportati nelle Tabella 5.4 e Tabella 5.5 si nota una differenza minima. In questo modo si è verificata la validità dei risultati ottenuti seguendo l'operazione di *best fitting* della CDF del modello (curva blu in Figura 5.1).

Per sottoporre a verifica la capacità del modello geomorfoclimatico di determinare in maniera attendibile la distribuzione di frequenza delle piene a partire da dati di precipitazione è stata condotta un'analisi sul risultato finale dell'elaborazione, ossia la curva di frequenza cumulata delle portate.

Inizialmente, sono stati confrontati i parametri climatici $\alpha_{Q\ mod}$ e $\lambda_{Q\ mod}$ ricavati a partire dalla CDF stimata dal modello (tramite operazione di best fitting) e riportati in Tabella 5.6, con quelli realmente osservati ($\alpha_{Q\ oss}$ e $\lambda_{Q\ oss}$) e riportati in Tabella 5.2.

Tabella 5.6: Valori dei parametri caratteristici $\alpha_{Q\ mod}$ e $\lambda_{Q\ mod}$ determinati per via grafica forzando la curva di probabilità cumulata sul modello probabilistico di Gumbel operando un best fitting.

Codice	Bacino	$\theta_{1\ mod}$ (m^3/s)	$\theta_{2\ mod}$ (m^3/s)	$\alpha_{Q\ mod}$ (mm/giorno)	$\lambda_{Q\ mod}$ (eventi/anno)
11013	Toce a Candoglia	500.89	203.03	22.80	11.79
11015	Mastallone (Sesia) a Ponte Folle	47.04	32.24	37.90	4.30
11016	Rutor (Dora Baltea) a Promise	3.49	2.46	9.43	4.14
11019	Ayasse a Champorcher	0.57	7.87	32.40	1.08
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	521.54	207.35	10.79	12.37
11021	Orco a Pont Canavese	121.05	70.36	19.83	5.59
11022	Stura di Lanzo a Lanzo	136.08	66.40	19.85	7.76
11024	Chisone a S. Martino	61.56	61.37	18.28	2.73
11025	Grana a Monterosso	18.60	10.28	16.15	6.10
11026	Tanaro a Ponte di Nava	15.81	26.32	30.52	1.82
11027	Tanaro a Nucetto	68.95	48.27	22.24	4.17
11029	Stura di Demonte a Gaiola	71.47	30.77	9.49	10.20
11040	Po a Crissolo	6.66	5.13	23.98	3.66
11051	Dora Baltea ad Aosta	219.68	99.18	9.28	9.16
11053	Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean	15.80	7.70	14.79	7.77
11054	Dora Riparia a Ulzio (Oulx)	24.48	15.36	10.33	4.92
11055	Dora Riparia a S.Antonio di Susa	121.72	56.03	9.33	8.78
11056	Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline	12.85	8.38	16.27	4.63
11058	Stura di Demonte a Pianche	17.75	13.82	13.26	3.61
11059	Rio Bagni a Bagni di Vinadio	6.29	4.45	12.60	4.12
11075	Sesia a Ponte Aranco	270.13	111.77	27.47	11.21
11077	Chisone a Fenestrelle	13.65	13.95	15.66	2.66

Per valutare la capacità del modello studiato di riprodurre fedelmente le condizioni reali, si sono valutate le differenze tra la CDF determinata dal modello e quella riferita alle Q osservate. Tale confronto è stato effettuato, preliminarmente, considerando i parametri caratteristici, α e λ, e, in particolare, è stato ricavato il rapporto tra $\lambda_{Q\ mod}$ e $\lambda_{Q\ oss}$ e il rapporto tra $\alpha_{Q\ mod}$ e $\alpha_{Q\ oss}$, entrambi in valore assoluto (Tabella 5.7).

Tabella 5.7: Confronto tra la curva di probabilità cumulata definita con il modello con quella riferita alle portate osservate, in termini di parametri α e λ. Sono indicati con il colore blu i bacini di tipo Bounded e in nero quelli di tipo High elevation.

Codice	Bacino	$\lvert\alpha_{Q\,mod} / \alpha_{Qoss}\rvert$	$\lvert\lambda_{Q\,mod}/\lambda_{Q\,oss}\rvert$
11013	Toce a Candoglia	0.78	1.68
11015	Mastallone (Sesia) a Ponte Folle	0.36	1.39
11016	Rutor (Dora Baltea) a Promise	1.03	0.10
11019	Ayasse a Champorcher	2.15	0.07
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	1.33	1.05
11021	Orco a Pont Canavese	0.89	0.90
11022	Stura di Lanzo a Lanzo	0.62	2.04
11024	Chisone a S. Martino	0.86	1.09
11025	Grana a Monterosso	0.52	3.21
11026	Tanaro a Ponte di Nava	1.08	0.40
11027	Tanaro a Nucetto	0.70	0.91
11029	Stura di Demonte a Gaiola	1.48	0.73
11040	Po a Crissolo	0.40	2.82
11051	Dora Baltea ad Aosta	1.82	0.34
11053	Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean	2.14	0.08
11054	Dora Riparia a Ulzio (Oulx)	1.38	0.78
11055	Dora Riparia a S.Antonio di Susa	2.03	0.91
11056	Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline	0.80	0.75
11058	Stura di Demonte a Pianche	0.81	1.44
11059	Rio Bagni a Bagni di Vinadio	0.49	1.87
11075	Sesia a Ponte Aranco	0.34	3.40
11077	Chisone a Fenestrelle	1.93	0.53

Osservando i valori riportati in Tabella 5.7, è stato osservato che il comportamento del modello rispetto ai dati osservati non è univoco; infatti, i risultati del modello non appaiono né sempre sovrastimati né sempre sottostimati.

Di conseguenza, l'attenzione è stata spostata sulla forma delle curve generate dal modello. In particolare, si è valutata la bontà di stima del modello attraverso l'analisi dello scostamento delle curve da esso fornite rispetto a quelle riferite ai dati osservati.

Durante questa fase il confronto è stato effettuato impiegando i valori di portata adimensionalizzati ottenuti dividendo le portate per la rispettiva media. Questa scelta è stata dettata dal fatto che si è osservato come non sia significativo effettuare il confronto in termini di portate dimensionali. Infatti, due CDF con media diversa risultano significativamente diverse se riportate su un grafico dimensionale, mentre assumono andamenti molto simili se i valori sull'asse orizzontale vengono adimensionalizzati. A titolo di esempio si riporta il caso riferito al bacino del Mastallone a Ponte Folle. La portata media Q_{media} ottenuta a partire dal calcolo dei momenti è pari a 73.10 mentre la media dei valori di portata misurati è pari a 171.8. La differenza tra i due valori è spiccata; tuttavia, si è osservato che a seguito della correzione della curva con il valore di media la curva blu in Figura 5.2 viene modificata in termini di pendenza e di intercetta risultando in una nuova curva molto simile a quella verde riferita alle portate osservate.

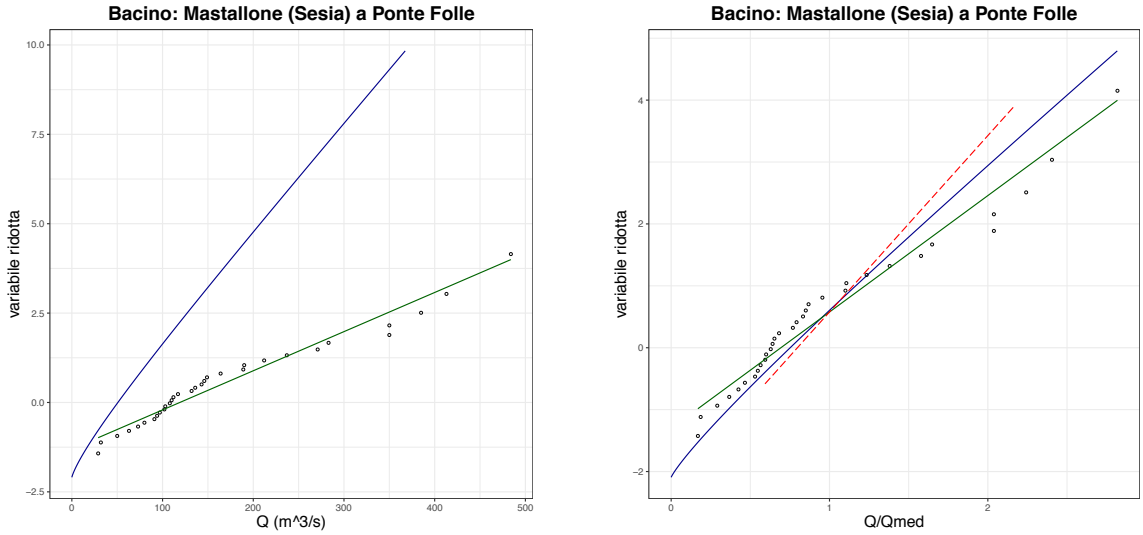


Figura 5.2: Mastallone (Sesia) a Ponte Folle (cod. 11015). Rappresentazione della CDF generata dal modello e della distribuzione di Gumbel associata alle osservazioni di portata su grafici con ascissa dimensionale (grafico a sinistra) e con ascissa adimensionale (grafico a destra).

Si è osservato che, se la media della curva di probabilità cumulata derivante dal modello assume un valore molto simile a quello della media delle portate osservate, come nel caso

del Grana a Monterosso, dove Q_{media} = 25.49 e $\mu_{Q\ oss}$ = 25.1, le curve CDF riportate su grafico con ascissa adimensionale non subiscono significative variazioni (Figura 5.3).

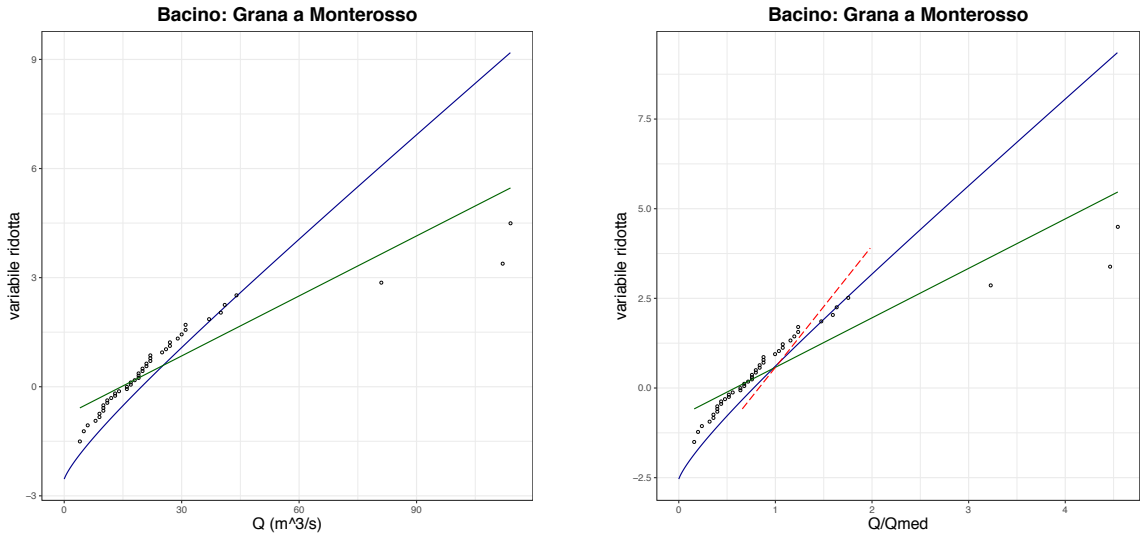


Figura 5.3: Grana a Monterosso (cod. 11025). Rappresentazione della CDF generata dal modello e della distribuzione di Gumbel associata alle osservazioni di portata su grafici con ascissa dimensionale (grafico a sinistra) e con ascissa adimensionale (grafico a destra).

A seguito di tale considerazione è stato possibile definire che, quando la media della CDF del modello si avvicina molto alla media delle osservazioni non si verificano grandi scostamenti tra il caso dimensionale e quello adimensionale; quando però il modello restituisce una media molto diversa il grafico dimensionale perde di significato, infatti è stato osservato che una media stimata completamente diversa stravolge il senso della rappresentazione.

Per i motivi appena dichiarati la bontà di stima del modello è stata valutata a partire da confronti effettuati tra le curve "adimensionali".

Ci sono numerosi motivi per i quali il modello può non essere in grado di stimare correttamente il valore di portata media; tra questi si sottolineano:

1. coefficiente di deflusso non è stato assunto correttamente;
2. non è assolutamente detto che le piogge siano rappresentative di quello che succede, soprattutto in montagna;
3. il modello non è stato in grado di interpretare correttamente il meccanismo di accumulo - fusione nivale: infatti il contributo allo scioglimento derivante dalla

pioggia totale annua risulta essere un fattore “estraneo” ai valori di pioggia in input al modello.

In generale, infatti, il modello *FloodAlp* non è un modello di bilanci, motivo per il quale non è fatto per riprodurre la media ma per testare se lo spostamento della distribuzione delle portate rispetto a quella delle piogge è dovuto alla neve.

Le distribuzioni di probabilità cumulata e quelle rappresentanti le osservazioni di portata per i 22 bacini analizzati, come dichiarato, sono state rappresentate su grafici con ascissa adimensionale. Di conseguenza, sono stati ottenuti ventidue grafici, simili a quelli riportati in Allegato B ma con la differenza di riportare, sulle ascisse, valori di portata Q adimensionalizzati.

Nel caso della CDF prodotta dal modello le portate Q sono state divise per i rispettivi valori di portata media Q_{media} ottenuti a partire dal calcolo dei momenti (Tabella 5.5).

Per quanto riguarda la Gumbel fittata ai dati osservati e le misurazioni, il valore di portata media coincide con il valore medio dei dati di portata al colmo di piena μ_{Qoss} misurati (Tabella 5.2).

In fase di rappresentazione, per completezza di illustrazione dei dati, è stata plottata, oltre alle due curve precedentemente descritte, la distribuzione di Gumbel relativa ai dati di pioggia misurati. Si ricorda che l’espressione della distribuzione di Gumbel assume la seguente forma (eq. 5.4):

$$\mathrm{F}(\mathrm{x}, \theta_1, \theta_2) = \exp\left(-exp\left(-\frac{x-\theta_1}{\theta_2}\right)\right) \tag{5.4}$$

In questo caso, per rappresentare la curva nello spazio bidimensionale avente ordinate rappresentate dalla variabile ridotta dei valori della funzione di probabilità cumulata e sulle ascisse la portata adimensionale, è stato fatto riferimento alla curva di crescita della distribuzione assunta. Per la distribuzione di Gumbel la curva di crescita è caratterizzata dalla seguente espressione (eq. 5.5):

$$X_T = \mu\left\{1 - CV\left[0.45 + {}^{\sqrt{6}}/_{\pi}\, ln \cdot \ln\left({}^{T}/_{T-1}\right)\right]\right\} \tag{5.5}$$

Dove:

- μ è il momento di primo ordine della distribuzione ($\mu = \alpha \cdot ln\lambda + \gamma_E \alpha$)
- CV, coefficiente di variazione che dipende unicamente dal parametro λ secondo la relazione: $CV = \frac{\pi}{\sqrt{6}(ln\lambda + \gamma_E)}$

In definitiva, utilizzando i valori dei parametri di pioggia riportati in Tabella 5.6 e sfruttando le equazioni 4.4 e 4.5, a partire dalla relazione:

$$X_T = \mu \cdot K_T \tag{5.6}$$

è stato possibile rappresentare la curva di Gumbel relativa alle portate osservate adottando K(T) come valore di portata adimensionalizzata. Tali curve sono rappresentate in carta probabilistica di Gumbel con una linea tratteggiata di colore rosso.

Si riportano in Allegato E le curve relative a tutti i ventidue bacini.

Come è possibile osservare, per alcuni bacini il modello si dimostra efficace e fedele nella determinazione della distribuzione di frequenza delle piene, mentre per altri bacini ciò non avviene.

Per questo motivo, si è cercato di capire se la cattiva stima fornita dal modello, ossia una marcata distorsione della curva di frequenza cumulata, fosse legata a particolari combinazioni di parametri descrittori dei bacini. Quindi, sono stati impiegati i risultati ottenuti al Capitolo 4 per poter verificare la presenza di uno o più gruppi di bacini con caratteristiche tali da determinare la distorsione della CDF.

In Tabella 5.8 si riporta la classificazione dei bacini nei 6 gruppi individuati a seguito dell'applicazione dell'analisi di raggruppamento. I 22 bacini analizzati sono divisi in due categorie separate sulla base della bontà di stima fornita dal modello, valutata, come precedentemente dichiarato, tramite la verifica di somiglianza tra la CFD delle portate fornita dal modello e la distribuzione di Gumbel relativa ai valori osservati.

Tabella 5.8: Classificazione in cluster dei 22 bacini italiani ai quali è stato applicato il modello FloodAlp. Nella porzione superiore della tabella sono riportati i bacini per i quali la stima fornita dal modello non è accurata, nella parte inferiore quelli per i quali la CDF stimata dal modello coincide con quella derivante dalle portate osservate.

Stima del modello non accurata

Codice	Bacino	Quota media	ζ	R	λ	α	Quota massima	Quota minima	Area	Cluster
11075	Sesia a Ponte Aranco	1496	3.026	1530	183.75	3.56	4471	328	703	1
11016	Rutor (Dora Baltea) a Promise	2554	-0.25	1127	26.23	5.93	3414	1508	45	4
11019	Ayasse a Champorcher	2364	-0.34	1249.4	33.47	7.08	3119	1372	42	4
11059	Rio Bagni a Bagni di Vinadio	2138	-0.14	1048.9	71.7	1.46	2932	1257	61	4
11013	Toce a Candoglia	1671	1.649	1397.7	50.79	5.29	4488	203	1539	5
11022	Stura di Lanzo a Lanzo	1769	0.7	1182.9	72.89	4.04	3633	461	578	5
11024	Chisone a S. Martino	1734	0.208	921.8	59.31	2.02	3228	417	580	5
11025	Grana a Monterosso	1534	0.488	1006.2	52.02	1.76	2607	711	110	5
11026	Tanaro a Ponte di Nava	1569	0.543	954.8	124.4	1.87	2612	788	149	5
11040	Po a Crissolo	2240	0.923	1007.4	126.36	1.41	3704	1294	37	6
11051	Dora Baltea ad Aosta	2262	0.722	1048.6	10.56	9.1	4727	547	1846	6
11053	Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean	2637	0.735	969.7	23	6.27	4427	1398	90	6
11058	Stura di Demonte a Pianche	2073	-0.25	959.7	23.85	2.76	2980	972	180	6
11077	Chisone a Fenestrelle	2152	0.118	786.8	25.08	2.2	3228	1153	154	6

Stima del modello accurata

Codice	Bacino	Quota media	ζ	R	λ	α	Quota massima	Quota minima	Area	Cluster
11015	Mastallone (Sesia) a Ponte Folle	1324	0.505	1747.6	201.78	3.74	2417	492	147	2
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	2085	0.739	990.6	19.32	4.85	4727	259	3320	6
11021	Orco a Pont Canavese	1928	0.435	1201.6	94.76	2.67	3835	429	613	5
11027	Tanaro a Nucetto	1224	1.409	994.5	91.87	2.66	2612	453	375	5
11029	Stura di Demonte a Gaiola	1817	0.009	1024	29.23	2.03	2980	661	560	5
11054	Dora Riparia a Ulzio (Oulx)	2168	0.001	792.7	25.44	2.35	3258	1079	257	6
11055	Dora Riparia a S.Antonio di Susa	1898	0.169	801.9	5.48	10.27	3577	385	1038	6
11056	Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline	1529	0.316	1123.9	34.62	4.4	2593	643	89	5

Osservando i risultati ottenuti (Tabella 5.8) non è possibile stabilire l'insieme delle caratteristiche dei bacini per cui la stima risulta valida. Non è infatti possibile concludere che il risultato del modello è accurato per bacini omogenei in termini di uno o più parametri descrittori. Uno dei motivi per i quali non è possibile individuare tale comportamento può essere individuato nella ridotta dimensione del campione sul quale il modello è stato testato.

In prima analisi, comunque, il modello sembra fornire risultati accurati per alcuni bacini di quote medie intermedie generalmente complessi da trattare, in quanto non propriamente caratterizzati da meccanismi di formazione delle piene di tipo *rainfall-runoff* o *snowdriven flood* e per i quali non è semplice determinare quando finisce l'effetto della neve e diventa prevalente quello della pioggia.

Infine, è stata condotta un'ultima analisi sulle curve "adimensionali" riferite ai 22 bacini e riportate in Allegato E. Nello specifico, è stato possibile individuare tre diverse categorie di comportamento:

- A: bacini per i quali la curva riferita alle portate osservate (linea verde) è meno variabile di quella relativa alle piogge (linea rossa tratteggiata);
- B: bacini per i quali la curva verde e la rossa hanno un andamento simile;
- C: bacini per i quali si assiste ad una variazione notevole tra curva delle piogge e curva delle portate osservate.

Tabella 5.9: Classificazione dei bacini sulla base delle tre categorie di comportamento (A: curva verde meno variabile della rossa, B: curva rossa molto simile alla verde, C: variazione consistente tra curva rossa e verde).

Codice	Bacino	Quota massima	Quota minima	Quota media	Area	Comportamento
11013	Toce a Candoglia	4488	203	1671	1539	B
11015	Mastallone (Sesia) a Ponte Folle	2417	492	1324	147	C
11016	Rutor (Dora Baltea) a Promise	3414	1508	2554	45	A
11019	Ayasse a Champorcher	3119	1372	2364	42	A
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	4727	259	2085	3320	B
11021	Orco a Pont Canavese	3835	429	1928	613	B
11022	Stura di Lanzo a Lanzo	3633	461	1769	578	C

Codice	Bacino	Quota massima	Quota minima	Quota media	Area	Comportamento
11024	Chisone a S. Martino	3228	417	1734	580	C
11025	Grana a Monterosso	2607	711	1534	110	C
11026	Tanaro a Ponte di Nava	2612	788	1569	149	B
11027	Tanaro a Nucetto	2612	453	1224	375	B
11029	Stura di Demonte a Gaiola	2980	661	1817	560	B
11040	Po a Crissolo	3704	1294	2240	37	C
11051	Dora Baltea ad Aosta	4727	547	2262	1846	A
11053	Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean	4427	1398	2637	90	A
11054	Dora Riparia a Ulzio (Oulx)	3258	1079	2168	257	B
11055	Dora Riparia a S.Antonio di Susa	3577	385	1898	1038	B
11056	Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline	2593	643	1529	89	B
11058	Stura di Demonte a Pianche	2980	972	2073	180	C
11059	Rio Bagni a Bagni di Vinadio	2932	1257	2138	61	C
11075	Sesia a Ponte Aranco	4471	328	1496	703	C
11077	Chisone a Fenestrelle	3228	1153	2152	154	B

Analizzando le caratteristiche dei bacini e la loro classificazione nelle tre categorie di comportamento (Tabella 5.9) è stato osservato che i bacini appartenenti al gruppo A sono i bacini collocati a quote molto elevate e per i quali la neve agisce da attenuatore delle portate, mentre i bacini del gruppo B sono quelli per i quali, dal momento che la Gumbel delle piogge è molto simile a quella delle portate, la neve non ricopre un ruolo marcato nel processo di trasformazione afflussi-deflussi.

In definitiva, alla luce dei risultati ottenuti a seguito dell'applicazione del modello, non è stato possibile individuare con precisione le caratteristiche che determinano una significativa distorsione della CDF stimata. Tuttavia, nonostante il modello non sia sempre in grado, a causa della sua semplicità, di ricreare in maniera attendibile il reale meccanismo di formazione delle piene, esso può essere usato a scopo diagnostico per la determinazione del comportamento delle diverse tipologie di bacini di alta quota e per la rivalutazione del rischio idraulico a fronte degli innalzamenti di temperatura provocati dai cambiamenti climatici.

CONCLUSIONI

Il presente elaborato di tesi descrive un'attività di ricerca svolta al fine di verificare la bontà di stima dei processi naturali che concorrono alla creazione dei fenomeni di piena fornita dal modello *FloodAlp*. Questa operazione risponde alla necessità di sottoporre ad analisi tali processi e di studiare gli effetti provocati dai cambiamenti climatici sui regimi di frequenza degli eventi di piena. Infatti, gli eventi di piena sono responsabili di catastrofi naturali, ai beni e alle persone.

Il lavoro svolto si è sviluppato in due principali fasi, di cui si riportano i principali risultati nel seguito.

In primo luogo, è stata condotta un'analisi volta all'individuazione della presenza di trend temporali nelle serie storiche di portata al colmo di piena registrate nell'arco alpino in corrispondenza di bacini idrografici appartenenti a Francia, Italia, Svizzera ed Austria.

Sulla base dei risultati ottenuti si è osservata la presenza di trend temporali nelle serie storiche di portata al colmo di piena per i bacini appartenenti all'arco alpino. Di conseguenza, è stata verificata l'ipotesi inizialmente formulata. Il fenomeno del riscaldamento globale è responsabile di una crescita, nel tempo, dei valori dei quantili di piena.

Successivamente, è stato analizzato modello *FloodAlp*, con l'intento di testarne la bontà di stima attraverso la sua applicazione ad un campione di bacini collocati sul territorio italiano.

Tramite analisi di sensitività volta a comprendere le modalità con le quali il modello risponde di fronte a variazioni dei valori dei parametri di input, si è osservato che il parametro che descrive la precipitazione totale annua ha un'influenza del tutto trascurabile sul risultato finale generato dal modello.

Successivamente, è stata condotta una analisi di carattere multivariato mirata all'individuazione di possibili somiglianze tra i set di parametri descrittori propri dei

singoli bacini appartenenti al campione italiano. Sulla base dei risultati di questa operazione, sono stati individuati sei gruppi di bacini caratterizzati da set di parametri descrittori tra loro confrontabili.

Infine, la bontà di stima del modello è stata testata applicando lo stesso ad un campione di bacini strumentati collocati nella porzione Ovest del Nord Italia. A seguito di tale operazione, si è osservato che, nonostante il modello non sia sempre in grado, a causa della sua semplicità, di ricreare in maniera attendibile il reale meccanismo di formazione delle piene, esso può essere usato a scopo diagnostico per la determinazione del comportamento delle diverse tipologie di bacini di alta quota e per la rivalutazione del rischio idraulico determinato dagli innalzamenti delle temperature legati ai cambiamenti climatici.

In conclusione, in riferimento agli eventuali sviluppi futuri del lavoro, si ritiene, al fine di poter applicare il modello FloodAlp all'intero campione di bacini italiani e, successivamente, all'intero arco alpino, siano necessari ulteriori studi preliminari.

In particolare, in primo luogo, è necessario convertire i dati di pioggia registrati in corrispondenza di stazioni idrometriche in dati di precipitazione areale, richiesti in input dal modello.

In secondo luogo, sarà necessario approfondire ulteriormente la conoscenza del modello, al fine di poter individuare le cause di eventuali risultati anomali forniti a seguito dell'applicazione dello stesso all'intero arco alpino.

BIBLIOGRAFIA

Allamano P., P. Claps & F. Laio (2009), Global warming increases flood risk in mountainous area, *Geophys. Res. Lett.*, *36*, L24404.

Allamano P., P. Claps & F. Laio (2009), An analytical model of the effects of catchment elevation on the flood frequency distribution, *Water Resour. Res*, 45, W01402.

Allamano P., E. Bartolini, P. Claps & F. Laio (2010), Effetti di variazioni climatiche sul rischio di piena nei bacini alpini, *XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*.

Blöschl G., J. Hall, A. Viglione et al., 2019. Changing climate both increases and decreases European river floods, *Nature 573, 108–111*.

Blöschl. G. and M. Sivalapan, T. Wagener, A. Viglione and H. Savenije, 2013. Runoff prediction in Ungauged Basins, Synthesis across Processes, Places and Scales, *Cambridge*.

Calinski T.and J. Harabasz, 1974. A dendrite method for cluster analysis, *Commun. Stat. 3, 1-27*.

Campolongo F., Cariboni J., Saltelli A., 2007. An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environ*.

Claps P., D. Ganora, Alessandro Apostolo, I. Brignolo, I. Monforte, 2020, Catalogo delle Piene dei Corsi d'acqua Italiani. *Ed. Consorzio Interuniversitario di Idrologia. 3 voll.*

Claps P., F. Laio & P. Villani (2002), Assessment of extreme flood production mechanisms through POT analysis of daily data.

Claps P. & F. Laio (2003), Peak over threshold analysis of flood and rainfall frequency curves, *ESF LESC Exploratory Workshop*.

Dumas D. (2013), Changes in temperature and temperature gradients in the French Northern Alps during the last century, *Theoretical and Applied Climatology*, Springer Verlag, 111, pp.223-233.

Dumas D. (2013), Changes in temperature and temperature gradients in the French Northern Alps during the last century, *Theoretical and Applied Climatology*, Springer Verlag, 111, pp.223-233.

Gottschalk L. and R. Weingartner, 1998. Distribution of peak flow derived from a distribution of rainfall volume and runoff coefficient, and a unit hydrograph, *Journal of Hydrology 208 (1998) 148–162*.

Isotta F.A., C. Frei, V. Weilguni, M. Perčec Tadić, P. Lassègues, B. Rudolf, V. Pavan, C. Cacciamani, G. Antolini, S.M. ratto, M. Munari, S. Micheletti, V. Bonati, C. Lussana, C. Ronchi, E. Panettieri, G. Marigo & G. Vertačnik (2014), The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data, *Int. J. Climatol.*, 34, 1657-1675.

Koenker R. and S. Portnoy (1999), Quantile regression.

Koenker R. and F. Hallock (2001), Quantile regression, *Journal of Economic Perspectives*, Volume 15, Number 4, Pages 143-156.

Longobardi A., P. Villani (2010). Trend analysis of annual and seasonal rainfall time series in the Mediterranean area, *International journal of Climatology Int. J. Climatol. 30: 1538–1546.*

Murtagh F. and P. Legendre, 2014. Ward's Hierarchical Agglomerative Clustering Method: Which Algorithms Implement Ward's Criterion? *Journal of Classification 31:274-295*.

Noacco V., F. Pianosi, F. Sarrazin and T. Wagener, 2019. Matlab/R workflows to assess critical choices in Global Sensitivity Analysis using the SAFE toolbox.Pianosi F., F. Sarrazin and T. Wagener, 2015. A Matlab toolbox for Global Sensitivity Analysis, *Environmental Modelling & Software 70 (2015) 80-85*.

Pianosi F., K. Beven, J. Freer, J. W. Hall, J. Rougier, D. B. Stephenson and T. Wagener, 2016. Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow, *Environmental Modelling & Software 79 (2016) 214-232.*

Sivapalan M. (2003). Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology, *Hydrol. Process.*, 17, 3136-3170.

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo elaborato di tesi, vorrei dedicare qualche riga a tutte le persone che hanno contribuito alla realizzazione dello stesso e che mi sono stati vicini durante questo percorso di crescita personale e professionale.

Vorrei innanzitutto ringraziare il mio relatore e i miei correlatori per avermi guidato e supportato nella fase più importante del mio percorso accademico. Un sentito grazie al professor Pierluigi Claps e al professor Daniele Ganora per il supporto costante, la professionalità e per avermi insegnato, passo dopo passo, in questo percorso, un metodo di lavoro che sicuramente replicherò in futuro. Un ringraziamento va anche al professor Alberto Viglione per aver condiviso con me le sue competenze e per avermi fornito preziose indicazioni per la stesura dell'elaborato.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori per avermi sempre sostenuta, in ogni decisione, per avermi dato fiducia e per avermi permesso di intraprendere questo percorso accademico.

Alle mie sorelle, Chiara e Laura con le quali ho condiviso tutti i miei traguardi, grazie per avermi sempre incoraggiata e per avermi aiutata a superare i momenti più difficili.

A Lorenzo per essere sempre stato al mio fianco con affetto e grande pazienza e per essere stato un esempio da seguire durante questi anni trascorsi al Politecnico.

Infine, vorrei ringraziare i miei amici e compagni di studi. Un grazie speciale va ad Irene, per il grande aiuto datomi durante la realizzazione di questo progetto di tesi e per essere stata un'amica, oltre che compagna, durante questo percorso.

Grazie a tutti.

APPENDICE

IL MODELLO INTERPRETATIVO *FLOODALP*

Il modello FloodAlp (Allamano P. et al., 2009) si basa sull'ipotesi dell'esistenza di una stretta relazione tra il meccanismo di formazione delle piene e la quota in quanto quest'ultima influenza la capacità di riduzione della porzione attiva di bacino. Pertanto, alla base del modello vi è il concetto di area contribuente A_c, definita come la porzione di area del bacino direttamente coinvolta nel processo di formazione della portata. Questa definizione permette di considerare come aree contribuenti solo quelle in cui la precipitazione cade in forma liquida anziché solida.

Nei bacini caratterizzati da alte quote, qualunque sia la loro estensione, per un dato evento di piena, l'area contribuente A_c dipende dalla quota in corrispondenza della quale si verifica il passaggio da precipitazione liquida a solida. Tale quota è identificata in corrispondenza dell'isoterma che descrive lo zero termico, ZT(t), definita anche quota di congelamento. Ogni evento di precipitazione può produrre una pioggia liquida al di sotto della frazione A_c/A e una precipitazione nevosa nella zona superiore del bacino, che essendo accumulata non contribuisce direttamente alla formazione della portata. Per descrivere il comportamento termico del bacino si parte dalla curva di regime termico regionale medio annuo: in questo modo la quota di zero termico ZT(t) nel tempo può essere rappresentata con una funzione lineare simmetrica (*Figura 1*). Considerando come punto centrale il 182 giorno giuliano, si può definire il ramo ascendente di ZT(t) come:

$$ZT(t) = \frac{ZT_{max} - ZT_{min}}{\frac{365}{2}} \cdot t + ZT_{min} \qquad (1)$$

Dove ZT_{max} e ZT_{min} sono rispettivamente la massima e la minima quota alle quali viene registrato lo zero termico durante l'anno.

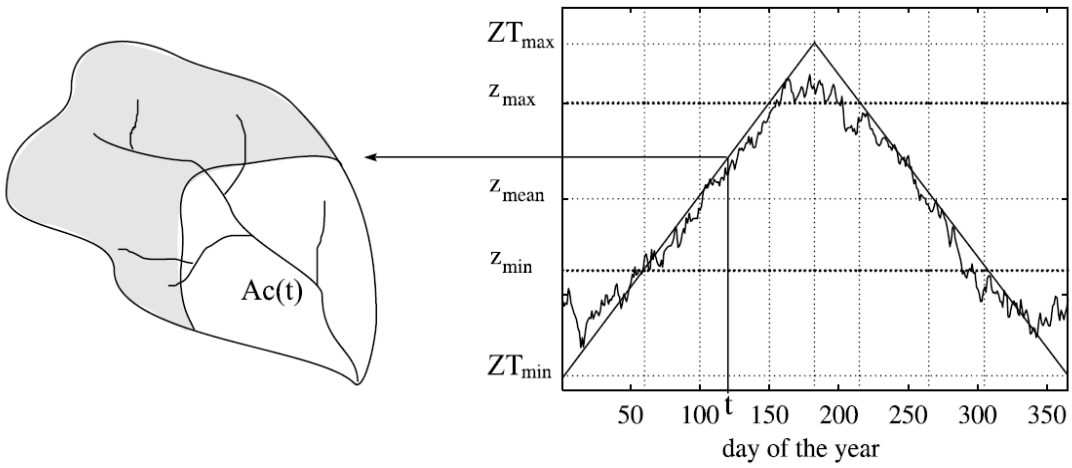


Figura 1 - Rappresentazione del concetto di area contribuente in funzione del regime climatico del bacino e dell'andamento dello zero termico. (Allamano et al., 2009)

Per quantificare il ruolo della ripartizione dell'area del bacino nella formazione della portata di piena, la portata specifica diretta (q) può essere ottenuta come somma del contributo della pioggia liquida e del contributo derivante dallo scioglimento delle nevi (Eq. 2).

$$q = C \cdot f_c(t) \cdot h + SM(t) \qquad (2)$$

Dove:

- C è il coefficiente di picco del deflusso o coefficiente di proporzionalità;
- $f_c(t) = A_c/A$ è la frazione di area contribuente, compresa tra i valori 0 e 1;
- h è l'altezza di pioggia;
- t è la data Giuliana.

Nell'applicazione del modello *FloodAlp* è necessario considerare le precipitazioni estreme; inoltre, si assume che queste siano distribuite secondo la rappresentazione di Poisson, nota come *legge degli eventi rari*, il cui parametro fondamentale λ è il numero di eventi in un dato intervallo di tempo. Ciascun evento inoltre è caratterizzato da un'altezza di precipitazione h, modellata come variabile casuale descritta dalla distribuzione esponenziale, la cui media annuale è pari ad α.

Per calcolare la portata specifica al colmo di piena Q, con assegnato tempo di ritorno T, il modello si basa sulla *trasformazione afflussi-deflussi*, ovvero il passaggio matematico che consente di correlare le precipitazioni alle portate. Questa trasformazione è basata sul metodo razionale che si fonda

sull'uso della curva di probabilità pluviometrica e può essere applicata solo se si considerano valide le seguenti ipotesi semplificative:

Isofrequenza: piogge di tempo di ritorno T generano portate al picco di identico tempo di ritorno T;

A parità di tempo di ritorno T, la portata al colmo maggiore è quella determinata dall'evento di pioggia di durata pari al tempo di corrivazione t_c (che diventa quindi tempo critico).

Il tempo di corrivazione di un bacino è il tempo che impiega una goccia d'acqua che parte dal punto idraulicamente più lontano dalla sezione di chiusura, cioè il punto dello spartiacque da cui ha origine l'asta principale della rete idrografica, per raggiungere la sezione di chiusura del bacino;

La portata al colmo Q determinata da una pioggia di intensità costante e durata t_c è proporzionale al prodotto dell'intensità di pioggia ragguagliata all'area e dell'area del bacino A, attraverso un coefficiente C che comprende l'effetto delle perdite per infiltrazione.

Mentre la prima ipotesi risulta adeguata alla rappresentazione dei fenomeni reali, la seconda e la terza assunzione dipendono dal tipo di schematizzazione che si decide di adottare nella descrizione della trasformazione afflussi–deflussi. In questo caso le perdite sono assunte proporzionali all'intensità di pioggia e che il tempo impiegato dall'acqua a raggiungere la sezione di chiusura dipende solo dalla lunghezza del percorso compiuto.

La portata Q con tempo di ritorno T è pertanto espressa con la relazione:

$$Q(T) = \frac{C \cdot h_c(t_c, T) \cdot A}{t_c} \qquad (3)$$

Da cui si ottiene la portata specifica al colmo:

$$q(T) = \frac{Q(T)}{A} = C \cdot i_c(t_c, T) \qquad (4)$$

Nella quale:

- C è il coefficiente di proporzionalità presentato in precedenza;
- i_c è l'intensità media di pioggia ricavata dalla curva di possibilità pluviometrica con tempo di ritorno T per una durata pari al tempo di corrivazione t_c;
- A è la superficie del bacino.

Di conseguenza, è possibile ricavare la distribuzione della portata specifica q, in funzione del giorno giuliano, come distribuzione derivata a partire dalla distribuzione cumulata delle precipitazioni alla Poisson, definita dall'equazione 5:

$$P_H(h) = 1 - \exp\left(-h/\alpha\right) \tag{5}$$

Ricavando l'espressione della variabile h dall'equazione 2 è possibile riscrivere l'equazione 5 come:

$$P_{Q|T}(q|t) = 1 - \exp\left(-\frac{q - SM(t)}{C\alpha \cdot f_c(t)}\right) \tag{6}$$

nella quale SM(t), dipendente dalla curva dello zero termico, rappresenta il parametro di posizione, mentre il prodotto $C\alpha \cdot f_c(t)$ è il parametro di scala della distribuzione.

Ricordando il teorema di Bayes, che spiega la probabilità condizionata di due eventi, la distribuzione cumulata della portata q può essere espressa come:

$$P_Q(q) = \int P_{Q|T}(q|t) \cdot p_T(t) \cdot dt \tag{7}$$

Dove $P_{Q|T}(q|t)$ è la probabilità e $p_T(t)$ la funzione di densità di probabilità del giorno di occorrenza dell'evento. Alla luce delle ipotesi che governano la distribuzione di Poisson, si deduce che i giorni di occorrenza hanno una funzione di probabilità uniforme, per cui $p_T(t) = 1/365$ (vedi *Ross, 1996, pagina 66)*. Inoltre, la distribuzione di probabilità degli estremi annuali di portata $P_{Q_{AM}}(q)$ può assumere la seguente forma (*Coles, 2001, pagina 131*):

$$P_{Q_{AM}}(q) = \exp\left(-\lambda \cdot \left(1 - P_Q(q)\right)\right) \tag{8}$$

Dove Q_{AM} indica i massimi di portata annuali e $P_Q(q)$ la distribuzione cumulativa marginale della portata, descritta nell'equazione (7).

L'espressione (8) può essere ricondotta ad una distribuzione di Gumbel se ci si riferisce ad un bacino caratterizzato da quote basse, tali per cui l'area contribuente alla formazione del deflusso $f_c(t)$ è sempre pari a uno durante tutto l'anno e il contributo della neve SM(t) è nullo.

$$P_{Q_{AM}}(q) = \exp\left(-\lambda \cdot \exp\left(-\frac{q}{C\alpha}\right)\right) \tag{9}$$

Questa equazione (9) rappresenta le cosiddette "*condizioni indisturbate*", ossia quando non viene considerato lo scioglimento nivale, ma unicamente il contributo della precipitazione liquida nella formazione della portata. Infatti, come si può notare, la differenza nelle equazioni (8) e (9) risiede nel contributo della neve, quindi responsabile delle variazioni nella forma della distribuzione di frequenza.

La frazione di area contribuente $f_c(t)$ dipende indirettamente dal tempo t (giorni dell'anno) attraverso l'interazione tra l'andamento stagionale delle temperature e la curva ipsografica del bacino. La curva del regime termico annuale può essere rappresentata graficamente in un diagramma avente in ordinata la temperatura giornaliera e sulle ascisse i giorni dell'anno e può essere semplificata assumendo che il suo andamento sia lineare e simmetrico. A partire da questa curva, chiamata "regime delle temperature", fissando un intervallo costante del gradiente termico verticale [°C/km], si può ricavare l'equazione che descrive l'evoluzione stagionale dello zero termico ZT(t) (equazione 1).

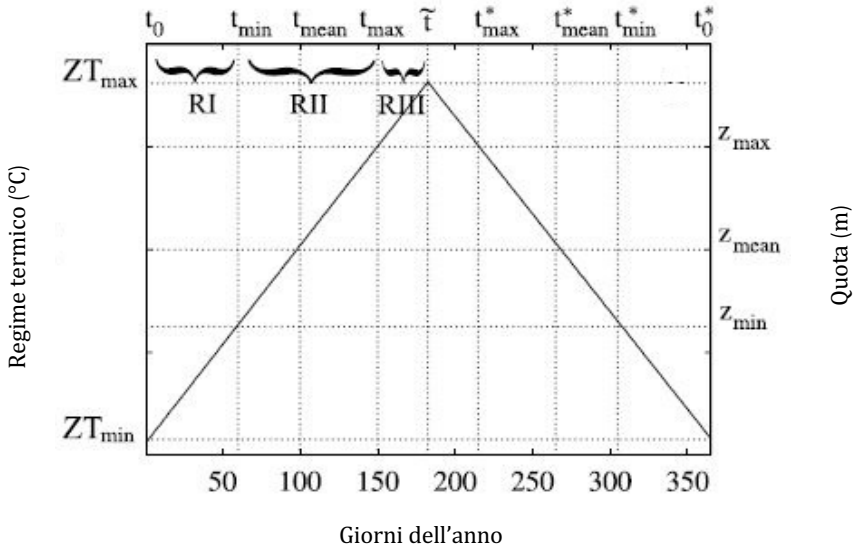


Figura 2 - Regime dello zero termico ottenuto dall'andamento delle temperature giornaliere per un fissato gradiente termico verticale. (Immagine tratta da Allamano et al., 2009).

Osservando la *Figura 2* e soffermandosi sul ramo ascendente della curva, è possibile definire alcuni giorni caratteristici:

- t_0 indica il giorno dell'anno in cui $ZT(t = t_0) = ZT_{min}$. Esso individua il giorno in cui la quota dello zero termico è pari alla quota minima in assoluto alla quale durante l'anno si registra lo zero termico. L'anno comincia dunque in corrispondenza del giorno più freddo;
- t_{min} è il giorno dell'anno scelto sotto la condizione $ZT(t = t_{min}) = z_{min}$; nello specifico è il giorno in cui si misura lo zero termico in corrispondenza della quota minima del bacino;
- t_{max} è, in accordo con la definizione data in precedenza per t_{min}, il giorno in cui $ZT(t = t_{max}) = z_{max}$, cioè il giorno più caldo dell'anno, in cui il bacino vede lo zero termico alla sua quota più alta.;
- t_{mean} infine è il giorno in cui $ZT(t = t_{mean}) = z_{mean}$ (quota media del bacino).

La simmetria della curva del regime dello zero termico permette di individuare i punti corrispondenti ai giorni appena descritti appartenenti al ramo discendente della curva, indicati con t^*_{max}, t^*_{mean} e t^*_{min}. Inoltre, è possibile descrivere le equazioni che governano il modello riferendosi al solo ramo ascendente, avente un dominio temporale di sei mesi (metà anno) che si sviluppa a partire da t_0 fino a $\tilde{t}$, dove $\tilde{t} = 365/2$.

Analizzando la linea temporale dei giorni dell'anno, sempre in riferimento alla prima metà dell'anno, si possono individuare tre regimi differenti:

- R_I: intercorre tra t_0 e t_{min} e coincide con la stagione invernale; è caratterizzato da basse temperature e osservazioni dello zero termico a bassi valori di quota. Questo è il periodo nel quale la neve tende ad accumularsi;
- R_{II}: copre l'intervallo compreso tra t_{min} e t_{max} e corrisponde alla stagione primaverile; si tratta della stagione delle piogge, in cui si assiste al parziale scioglimento delle nevi accumulate durante l'inverno;
- R_{III}: coincide con la fase che ha come estremi t_{max} e $\tilde{t}$ e descrive il periodo estivo; le precipitazioni sono meno frequenti e il contributo legato allo scioglimento delle nevi nella formazione del deflusso è maggiore.

Il valore della frazione di area contribuente $f_c(t)$ dipende direttamente dal regime annuale dello zero termico. Questo significa che $f_c(t)$ assume un valore diverso in ognuno dei tre regimi individuati con una variabilità tra 0 e 1. Nello specifico, quando si ricade nel regime RI, dal momento che ci si aspetta che la superficie del bacino sia coperta di neve, si considera nullo il deflusso ponendo la frazione di area contribuente uguale a 0. Nel regime RIII invece è lecito ipotizzare che tutta la superficie del bacino sia soggetta a precipitazioni di carattere piovoso, perciò la frazione di area contribuente è pari a 1. Il regime RIII, rappresentando il passaggio tra il periodo invernale e quello estivo, è caratterizzato da valori di $f_c(t)$ che variano tra 0 e 1. Segue che $f_c(t)$ assume i seguenti valori:

$$f_c(t) = \begin{cases} 0 & se\ t_0 < t < t_{min} \\ 0 \div 1 & se\ t_{min} < t < t_{max} \\ 1 & se\ t_{max} < t < \tilde{t} \end{cases} \qquad (10)$$

Dal momento che la forma della frazione di area contribuente influisce sulla redistribuzione delle probabilità di occorrenza degli eventi durante l'anno, considerando la suddivisione dell'anno in tre regimi caratteristici, la distribuzione cumulata marginale della portata $P_Q(q)$ dell'equazione (7) può essere espressa come la combinazione di tre probabilità corrispondenti ai periodi R_I, R_{II}, R_{III}.

$$P_Q(q) = W_I \cdot P_I(q) + W_{II} \cdot P_{II}(q) + W_{III} \cdot P_{III}(q) \qquad (11)$$

Dove W_I, W_{II} e W_{III} sono i pesi che dipendono dalla durata dei regimi R_I, R_{II}, R_{III}.

Ricordando che, per le ipotesi fatte in precedenza, durante il regime invernale, R_I, la frazione di area contribuente è nulla, in quanto si assume che tutta l'area del bacino sia coperta dalla neve, ne consegue che la probabilità di occorrenza nel periodo R_I è nulla, per cui l'equazione (11) diventa:

$$P_Q(q) = W_{II} \cdot P_{II}(q) + W_{III} \cdot P_{III}(q) \qquad (12)$$

Dove W_{II}, peso relativo al regime R_{II}, è descritto dall'equazione:

$$W_{II} = \frac{t_{max} - t_{min}}{\tilde{t} - t_{min}} = \frac{z_{max} - z_{min}}{ZT_{max} - z_{min}} \qquad (13)$$

W_{III}, invece, è il peso relativo al regime R_{III}, espresso come:

$$W_{III} = \frac{\tilde{t} - t_{max}}{\tilde{t} - t_{min}} = \frac{ZT_{max} - z_{max}}{ZT_{max} - z_{min}} \qquad (14)$$

Dal momento che la frazione di area contribuente è nulla durante il regime R_I, è necessario tener conto di una riduzione del numero medio degli eventi di piena. Questa operazione viene eseguita sostituendo al parametro λ il parametro λ^* che può essere espresso come:

$$\lambda^* = \lambda \cdot \frac{\tilde{t} - t_{min}}{\frac{365}{2}} = \lambda \cdot \frac{ZT_{max} - z_{min}}{ZT_{max} - ZT_{min}} \qquad (15)$$

Pertanto, si può tenere conto del regime R_I in maniera indiretta, andando a inserire il termine λ^* nell'equazione che descrive la distribuzione di probabilità degli estremi annuali di portata.

Per completare la definizione delle probabilità espresse nella formula (12) è necessario stimare il contributo della neve alla formazione della portata, descritto dal termine SM(t). Lo scioglimento nivale è un processo regolato non solo dalla variazione annuale delle temperature, ma anche dal concetto di area contribuente. Per questo motivo può essere espresso come funzione lineare di $f_c(t)$:

$$SM(t) = SM^* \cdot f_c(t) \qquad (16)$$

Dove il coefficiente SM* deriva dall'equivalenza tra il volume di neve accumulato totale e il volume di neve sciolto:

$$\frac{R}{365} \cdot \int_{o}^{\tilde{t}} (1 - f_c(t)) \cdot dt = SM^* \cdot \int_{o}^{\tilde{t}} f_c(t) \cdot dt \qquad (17)$$

Dove R è la precipitazione totale annua.

In base a quanto detto in precedenza, è evidente che il valore di SM(t) è nullo durante il regime R_I (inverno), mentre assume il massimo valore in corrispondenza del regime R_{III} (estate).

La definizione della distribuzione di probabilità appartenente al regime R_{III} è facilitata in quanto la frazione di area contribuente durante tale regime si mantiene pari a 1, pertanto dall'equazione (6) si ricava:

$$P_{III}(q) = 1 - \exp\left(-\frac{q - SM^*}{C\alpha}\right) \qquad (18)$$

La probabilità relativa al regime R_{II} invece ha una forma fortemente influenzata dalla frazione di area contribuente $f_c(t)$.

Il modello *FloodAlp* propone come metodologia per il calcolo di tale probabilità un approccio che prende il nome di "*Hypsometric*".

Dal momento che la valutazione del regime R_{II} dipende fortemente dal tipo di bacino in esame, prima di addentrarsi nel dettaglio nella descrizione dei due differenti approcci, occorre analizzare le varie tipologie di bacino in funzione della loro posizione altimetrica del bacino stesso.

In funzione della posizione altimetrica dei bacini, si individuano quattro differenti casi, a seconda del modo in cui la quota di ciascun bacino interagisce con il regime che caratterizza lo zero termico. Si ricorda che il regime dello zero termico viene identificato con la quota minima (ZT_{min}) e con la quota massima (ZT_{max}) alla quale si registra lo zero termico durante l'anno.

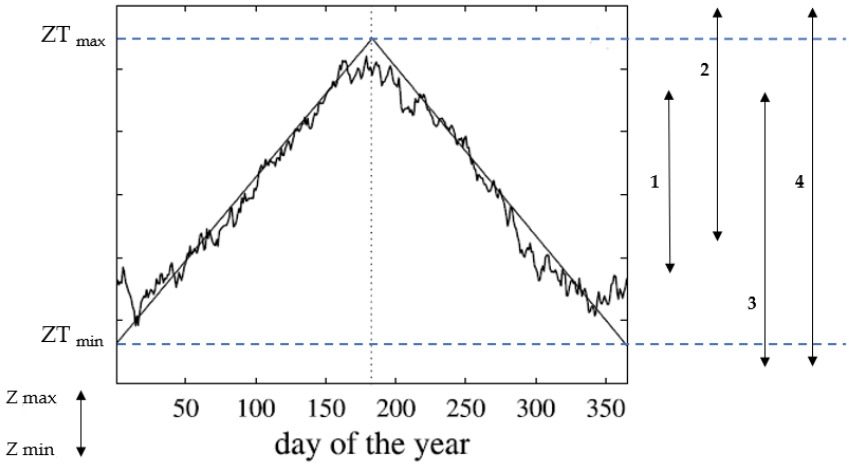


Figura 3 – Tipologie di bacini in funzione dell'andamento dello zero termico e della posizione altimetrica del bacino.

Come indicato nella *Figura 3*, in base alla posizione della quota massima e della quota minima del bacino, si distinguono quattro tipologie di bacino:

- Caso 1: Bounded watershed. Si tratta di un bacino che presenta quota minima maggiore di ZT_{min} e una quota massima inferiore a ZT_{max}. In questa categoria sono presenti tutti e tre i regimi R_I, R_{II} e R_{III};
- Caso 2: High-elevation watershed. E' un bacino la cui quota minima è maggiore di ZT_{min} e la quota massima maggiore di ZT_{max}. Si riscontrano pertanto solo i regimi R_I e R_{II}; anche durante la stagione più calda parte dell'area del bacino risulta coperta dalla neve, non contribuendo direttamente al deflusso;
- Caso 3: Warm bounded watershed. In questo caso il bacino è caratterizzato da una quota minima inferiore o uguale a ZT_{min} e una quota massima inferiore o uguale a ZT_{max};
- Caso 4: Warm high-elevation watershed. E' un bacino che ha quota minima inferiore o uguale a ZT_{min} e una quota massima maggiore di ZT_{max}.

Dal momento che nella regione alpina le tipologie di bacino più comuni sono le prime due, solo questi saranno analizzati nel dettaglio secondo l'approccio *Hypsometric*. Ricordando che la distribuzione cumulata marginale della portata $P_Q(q)$ può essere espressa come la combinazione di tre probabilità corrispondenti ai periodi R_I, R_{II}, R_{III}, resta da definire la probabilità legata al regime II.

Il modello Hypsometric descrive fedelmente la realtà, in quanto tiene conto dell'effettiva distribuzione altimetrica del bacino in analisi espressa dalla curva ipsometrica, definita come la curva delle frequenze cumulate delle quote di tutti i punti in un bacino. Tale curva è ben

rappresentata dal parametro ζ che ne regola ed è ottenuto dalla seguente approssimazione matematica (*Strahler, 1952*):

$$\frac{z - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} = \frac{f_c(t)}{1 + \zeta \cdot (1 - f_c(t))} \tag{19}$$

Dove z (compresa tra gli estremi z_{min} e z_{max}) è la quota che suddivide l'area del bacino in contribuente e non contribuente.

La frazione di area contribuente $f_c(t)$, definita a tratti, è ricavata inserendo al posto del termine z la curva del regime annuale dello zero termico ZT(t).

$$f_c(t) = \begin{cases} 0 & se\ t_0 < t < t_{min} \\ \dfrac{(1+\zeta)(ZT(t) - z_{min})}{\zeta(ZT(t) - z_{min}) + z_{max} - z_{min}} & se\ t_{min} < t < t_{max} \\ 1 & se\ t_{max} < t < \tilde{t} \end{cases} \tag{20}$$

Il passaggio dal valore di frazione di area contribuente 0 al valore 1 avviene gradualmente, in quanto si è tenuto conto dell'effettiva distribuzione altimetrica del bacino. Si sottolinea come, nel caso di un bacino High-Elevation, la frazione di area contribuente non raggiunge mai un valore unitario. La spiegazione si trova nella definizione stessa di questa tipologia di bacino: essendo la sua quota massima superiore alla ZTmax anche nei mesi più caldi parte del bacino rimarrà coperta dalla neve, non contribuendo così alla formazione di deflusso.

Trascurando il contributo del regime R_I adottando il parametro λ^*, che riduce il numero di eventi in un anno, per un bacino Bounded sarà necessario calcolare la probabilità del regime R_{II} ed R_{III} con i rispettivi pesi, mentre per un High-Elevation si considera solo la probabilità legata al regime R_{II}.

Bounded watershed

Per poter calcolare la probabilità di occorrenza $P_Q(q)$ ci si riferisce alla formula (12) precedentemente discussa, occorre partire dalla definizione del valore del coefficiente SM* (equazione 16):

$$SM^* = \frac{R}{365} \cdot \frac{\zeta(z_{max} - (1+\zeta)z_{min} + \zeta ZT_{min}) - (1+\zeta)(z_{max} - z_{min})Ln[1+\zeta]}{\zeta\big(z_{min} - z_{max} + \zeta(z_{min} - ZT_{max})\big) + (1+\zeta)(z_{max} - z_{min})Ln[1+\zeta]} \tag{21}$$

L'espressione di $P_{II}(q)$ sarà la seguente:

$$P_{II}(q) = 1 - \frac{\exp\left(\frac{SM^*}{C\alpha}\right)}{t_{max} - t_{min}} \int_{t_{min}}^{t_{max}} exp\left(-\frac{q}{C\alpha \cdot f_c(t)}\right) \tag{22}$$

Per semplicità di calcolo, la $P_{II}(q)$ può essere riscritta attraverso l'equazione (22) introducendo la funzione gamma incompleta (vedi Abramowitz and Stegun, 1965) descritta da due parametri α e z, che in questo caso equivalgono rispettivamente 0 e $\frac{q}{\alpha(1+\zeta)}$.

$$P_Q(q) = 1 - exp\left(\frac{SM^* - q}{C\alpha}\right) + \frac{q \cdot exp\left(\frac{SM^* + \zeta SM^* - \zeta q}{\alpha(1+\zeta)}\right) \cdot \Gamma\left[0, \frac{q}{\alpha(1+\zeta)}\right]}{C \cdot \alpha \cdot (1+\zeta)} \tag{23}$$

$$\Gamma[a, z] = \int_0^{\infty} t^{a-1}\, e^{-t} dt \tag{24}$$

Combinando le equazioni (13), (14), (18) e (22) all'interno della (12), si ricava il valore di $P_Q(q)$ nel caso di un bacino Bounded. Per completezza si riporta di seguito (eq. 25) l'espressione di $P_Q(q)$ che si ottiene effettuando tutte le sostituzioni, ma il suo valore può essere trovato risolvendo i singoli termini dell'equazione (12) e andando a combinarli insieme.

$$\begin{aligned} P_Q(q) &= 1 - exp\left(\frac{SM^* - q}{C\alpha}\right) \\ &+ \frac{exp\left(\frac{SM^* + \zeta SM^* - \zeta q}{C\alpha(1+\zeta)}\right) \cdot \mathrm{q}(z_{min} - z_{max})\Gamma\left[0, \frac{q}{\mathrm{C}\alpha(1+\zeta)}\right]}{C \cdot \alpha \cdot (1+\zeta) \cdot (z_{min} - ZT_{max})} \end{aligned} \tag{25}$$

La probabilità di accadimento degli estremi annuali può essere infine determinata ricordandosi di utilizzare il termine λ^* per tenere conto della riduzione degli eventi di piena a causa del regime R_I.

$$P_{Q\ AM}(q) = exp\left(-\lambda^* \cdot \left(1 - P_Q(q)\right)\right) \tag{26}$$

High-Elevation Watershed

In base alle osservazioni fatte in precedenza, in questo tipo di bacini si verifica solo il regime R_{II}, per cui si dovrà ricavare solo il valore di probabilità $P_{II}(q)$. Come prima si deve procedere innanzitutto al calcolo del valore del coefficiente di scioglimento nivale SM*. Non considerando in regime R_{II} e riferendosi sempre all'espressione (17), SM* assume la seguente forma:

$$SM^* = \frac{R/365 \cdot \zeta^2 \cdot (ZT_{min} - ZT_{max})/(1+\zeta)}{\zeta(z_{min} - ZT_{max}) + 2(z_{min} - z_{max}) \cdot ATh\left[\frac{\zeta(ZT_{max} - z_{min}}{(2+\zeta)z_{min} - \zeta ZT_{max} - 2z_{max}}\right]} - \frac{R}{365} \qquad (27)$$

Dove ATh è la funzione tangente iperbolica.

Inserendo l'espressione 27 all'interno della formula 22 di $P_Q(q)$, si ottiene l'espressione (eq. 28) che permette di trovare la probabilità di accadimento per un bacino High-Elevation.

$$P_Q(q) = 1 - exp\left(\frac{q(z_{max} - (1+\zeta)z_{min} + \zeta ZT_{max})}{(1+\zeta)(z_{min} - ZT_{max}) \cdot C\alpha} + \frac{SM^*}{C\alpha}\right) + \frac{q}{C\alpha(1+\zeta)} \cdot \qquad (28)$$

$$\cdot \frac{(z_{min} - z_{max})}{(z_{min} - ZT_{max})} \cdot exp\left(\frac{SM^* + \zeta SM^* - q\zeta}{C\alpha(1+\zeta)}\right)$$

$$\cdot EI\left[1, \frac{q(z_{min} - z_{max})}{C\alpha(1+\zeta)(z_{min} - ZT_{max})}\right]$$

Dove EI è la funzione esponenziale integrale (vedi *Abramowitz and Stegun, 1965*) descritta da due parametri n e z, che nel nostro caso valgono rispettivamente 1 e $\frac{q(z_{min}-z_{max})}{C\alpha(1+\zeta)(z_{min}-ZT_{max})}$.

$$\mathrm{EI}\,[n, z] = \int_1^{\infty} (\mathrm{e}^{-\mathrm{zt}}/\mathrm{t}^{\mathrm{n}})\,\mathrm{dt} \qquad (29)$$

Come nel bacino Bounded, la probabilità di accadimento degli estremi annuali può essere infine determinata ricordandosi di utilizzare il termine λ^* per tenere conto della riduzione degli eventi di piena a causa de regime R_I.

$$P_{Q\ AM}(q) = exp\left(-\lambda^* \cdot \left(1 - P_Q(q)\right)\right) \qquad (30)$$

In generale, i momenti di una distribuzione di probabilità $P_{Q\ AM}(q)$ sono calcolati a partire dall'equazione della curva di densità di probabilità, eventualmente ricavata per derivazione nel caso fosse nota l'equazione della curva di distribuzione di probabilità cumulata. Tuttavia, il *modello FloodAlp* fornisce come risultato i valori di $P_{Q\ AM}(q)$ corrispondenti a determinati valori di portata specifica e non la sua espressione analitica. Di conseguenza, il calcolo dei momenti, di ordine r, può effettuato sfruttando la relazione di integrazione numerica dei punti della CDF mostrata dall'Equazione 31.

$$E(X^r) = r\int_0^\infty x^{r-1}(1 - F(x) + (-1)^r F(-x))dx \tag{31}$$

In particolare, siccome la formulazione analitica del modello è tale da non consentire la valutazione del valore di probabilità cumulata associata a portate negative, è stata assunta un'ipotesi semplificativa. Come già illustrato, il modello fonda le sue basi sull'ipotesi secondo la quale le piogge seguano la distribuzione di Gumbel; inoltre esso opera, per la determinazione dei valori di probabilità cumulata associati a valori di portate specifiche definite, effettuando una lieve deviazione dalla distribuzione teorica di Gumbel.

Dal momento che tale distribuzione non è definita positiva, infatti la coda sinistra, pur decadendo con maggiore rapidità rispetto alla destra, può raggiunge il campo delle ascisse negative, il modello non è sempre in grado di generare una distribuzione di probabilità cumulata che varia nel range 0 - 1. Per valori del parametro θ_1 la CDF fornita dal modello avrà come valore associato alla portata specifica q = 0 un valore di probabilità maggiore di zero. Questa comporta che un certo ammontare di probabilità cumulata deve essere attribuito anche a valori negativi.

Per ovviare a questo inconveniente è possibile ricorre all'utilizzo del concetto di distribuzione censurata. Ossia, quando il modello, a causa della sua formulazione, non è in grado di calcolare i valori di probabilità, il corrispondente valore di CDF viene fissato pari a 0, cioè, i valori di probabilità cumulata associati ad ascisse (q) negative sono forzati ad essere pari a 0.

Grazie a questa operazione è possibile calcolare i momenti della CDF generata dal modello utilizzando l'equazione 31 e senza andare a modificare l'ossatura analitica che lo costituisce.

ALLEGATI

ALLEGATO A

Il presente allegato si struttura in tre sezioni specifiche relative ad Austria, Italia e Svizzera, ognuna composta da due tabelle. Nello specifico, per ciascuna nazione si riportano nella prima tabella l

A.1 ITALIA

Tabella A.1.1: Caratteristiche morfologiche dei bacini italiani

Codice	Bacino	Est	Nord	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
11001	Sarca di Nambron a Pian di Nambron	635264	5118637	3184	2339	1376	21	-0.178
11005	Adda a Fuentes	534567	5110177	3963	1859	201	2578	0.429
11007	Brembo a Ponte Briolo	547267	5067317	2839	1187	260	749	1.373
11008	Serio a Ponte Cene	564310	5071039	2957	1336	365	460	1.153
11011	S. Bernardino a Santino	462832	5089696	2245	1253	280	121	0.029
11012	Toce a Cadarese	450467	5125992	3293	2144	730	187	-0.267
11013	Toce a Candoglia	455247	5090657	4488	1671	203	1539	1.649
11015	Mastallone (Sesia) a Ponte Folle	442083	5075487	2417	1324	492	147	0.505
11016	Rutor (Dora Baltea) a Promise	341062	5062853	3414	2554	1508	45	-0.254
11017	Savara a Eau Rousse	360242	5047894	3916	2694	1650	81	0.266
11018	Artanavaz a St Oyen	360183	5075749	3167	2230	1351	69	0.101
11019	Ayasse a Champorcher	392518	5052993	3119	2364	1372	42	-0.336
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	408854	5043555	4727	2085	259	3320	0.739
11021	Orco a Pont Canavese	391455	5030182	3835	1928	429	613	0.435
11022	Stura di Lanzo a Lanzo	380917	5014005	3633	1769	461	578	0.700
11023	Chisone a Soucheres Basses	338740	4987933	3228	2226	1506	94	0.641
11024	Chisone a S. Martino	363869	4971770	3228	1734	417	580	0.208
11025	Grana a Monterosso	367078	4918842	2607	1534	711	110	0.488
11026	Tanaro a Ponte di Nava	410758	4885835	2612	1569	788	149	0.543
Codice	Bacino	Est	Nord	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
11027	Tanaro a Nucetto	425280	4910519	2612	1224	453	375	1.409
11029	Stura di Demonte a Gaiola	373774	4910281	2980	1817	661	560	0.009
11030	Gesso della Valletta	371058	4901682	3139	2096	912	111	-0.173

11031	Gesso di Entracque	368064	4901375	3178	1886	815	160	0.325
11040	Po a Crissolo	354451	4950954	3704	2240	1294	37	0.923
11050	Cervo (Sesia) a Passobreve	424990	5053388	2508	1493	586	75	0.184
11051	Dora Baltea ad Aosta	371847	5065981	4727	2262	547	1846	0.722
11052	Evançon a Champoluc	400630	5075832	4157	2635	1553	102	0.668
11053	Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean	408449	5071177	4427	2637	1398	90	0.735
11054	Dora Riparia a Ulzio (Oulx)	329119	4988888	3258	2168	1079	257	0.001
11055	Dora Riparia a S.Antonio di Susa	362906	4996791	3577	1898	385	1038	0.169
11056	Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline	407071	4904931	2593	1529	643	89	0.316
11058	Stura di Demonte a Pianche	349455	4907337	2980	2073	972	180	-0.252
11059	Rio Bagni a Bagni di Vinadio	347105	4906010	2932	2138	1257	61	-0.144
11074	Sesia a Campertogno	424653	5072656	4471	2113	828	171	1.479
11075	Sesia a Ponte Aranco	444885	5061708	4471	1496	328	703	3.026
11077	Chisone a Fenestrelle	346024	4989051	3228	2152	1153	154	0.118
11081	Sarca a Ponte Plaza	640275	5117680	3140	2003	1156	69	0.555
11091	Dora Baltea a Ponte di Mombardone	344228	5069841	4727	2402	1011	372	1.157
11093	Lys a d'Ejola	407799	5078900	4427	3110	1812	30	0.022
11094	Stura di Viù a Usseglio	359557	5010289	3517	2375	1280	79	0.065
11095	Dora di Bardonecchia a Beaulard	324755	4990299	3328	2187	1122	207	0.109
11096	Varaita a Rore	359268	4937167	3700	2111	837	278	0.393
11097	Tanaro a Ormea	413186	4889264	2612	1512	719	175	0.633
11102	Po a S.Mauro Torinese	403969	4997721	3704	1081	195	7654	4.018
11103	Po a Casale Monferrato	457083	4999277	4727	1251	103	13756	4.185
11106	Adda a Tirano	589647	5118637	3757	2167	425	908	-0.128
11117	Breuil a Alpette	336956	5064247	3072	2459	1797	28	-0.109
11122	Cannobino a Traffiume	475222	5100470	2126	1107	208	107	0.208
11125	Chiavanne a Alpette	336855	5064354	3164	2485	1792	22	-0.030
11126	Chiusella a Gurzia	402638	5030792	2792	1374	421	142	0.814
11129	Dora Baltea a Mazzè	417900	5017085	4743	1883	206	3854	1.223
11130	Dora di Rhemes a Notre Dame	353389	5048222	3562	2664	1717	69	-0.077

Codice	Bacino	Est	Nord	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
11135	Dora Riparia a Torino Ponte Washington	399394	4992175	3583	1655	211	1322	0.542
11141	Grand'Eyvia a Cretaz	370040	5053146	3902	2583	1476	113	0.301
11142	Isorno a Pontetto	448127	5111126	2670	1617	340	70	-0.251
11143	Lys a Guillemore	411124	5058000	4487	2260	912	202	1.120

11144	Maira a Racconigi	394538	4957991	3196	1326	256	976	1.307
11145	Maira a Saretto	335576	4927181	3196	2411	1521	56	-0.172
11146	Maira a San Damiano Macra	361439	4927199	3196	1899	710	452	0.139
11149	Marmore a Perreres	392605	5084497	4383	2739	1839	55	1.462
11150	Melezet a Melezet	315867	4991349	3164	2389	1497	43	-0.190
11154	Orco a San Benigno Canavese	406313	5011059	3885	1567	212	838	1.233
11156	Pellice a Villafranca Piemonte	381346	4963166	3234	1542	250	953	0.498
11157	Po a Carignano	396682	4973652	3760	1101	222	3956	4.175
11164	Rutor a La Joux	341334	5061405	3343	2570	1600	42	-0.289
11166	San Bernardino a Trobaso	464983	5088294	2277	1211	216	129	0.109
11167	Stura di Demonte a Fossano	398628	4930850	3197	1518	310	1327	0.637
11169	Sermenza a Rimasco	427374	5078429	2878	1855	893	82	0.097
11172	San Giovanni a Possaccio	465266	5089297	2131	1002	216	54	0.720
11173	Stura di Lanzo a Torino	398253	4996117	3618	1368	214	880	1.714
11176	Stura di Viù a Malciaussia	354204	5007535	3430	2622	1794	26	-0.036
11177	Tanaro a Alba	422666	4950663	3197	1072	157	3385	2.515
11178	Tanaro a Garessio	421310	4894772	2622	1435	574	249	0.617
11180	Tanaro a Piantorre	418169	4918794	2622	1067	337	500	2.094
11184	Toce a Lago d'Avino	433177	5122226	3479	2550	2212	6	3.501
11185	Toce a Lago Busin	451099	5133475	2849	2524	2370	3	2.050
11186	Toce a Lago del Sabbione	449883	5141238	3331	2765	2417	14	1.071
11187	Toce a Lago Vannino	451161	5136937	3175	2527	2147	12	1.223
11188	Varaita a Castello	345174	4941766	3242	2406	1570	68	0.000
11189	Varaita Rossana	376220	4934616	3716	1797	493	402	0.784
11194	Po Palazzolo Vercellese	429316	5003317	4743	1240	145	13425	4.289
11195	Sarca di Val Genova Malga Ceret	625867	5116111	3561	2629	1431	53	-0.314
11196	Sarca di Val Genova	633376	5114542	3561	2358	900	149	-0.250
11197	Sarca Nago	645059	5084440	3492	1460	74	1046	0.774
11198	Sarca Saone	636753	5100795	3176	1593	493	541	0.725

Codice	Bacino	Est	Nord	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
12001	Tagliamento a Pioverno	818231	5140652	2668	1160	232	1873	1.069
12002	Piave a Presenaio	775137	5163708	2585	1699	953	145	0.294
12003	Piave a Ponte della Lasta	766658	5158388	2933	1673	872	367	0.971
12006	Brenta a Barziza (Bassano)	712468	5072879	2903	1250	110	1550	0.745
12007	Astico a Forni di Val dAstico	683757	5079967	1924	1170	308	136	-0.182
12009	Adige a Tel	660357	5171850	3859	2105	454	1689	0.095

12010	Plan a Plan	659558	5184870	3382	2400	1604	46	0.370
12011	Adige a Ponte dAdige	674738	5150836	3859	1919	237	2683	0.239
12012	Ridanna a Vipiteno	685061	5195648	3423	1926	940	207	0.869
12013	Isarco a Pra di Sopra	698475	5185952	3456	1876	759	657	0.681
12014	Rienza a Monguelfo	738271	5181944	3047	1882	1101	271	0.820
12015	Aurino a Ca' di Pietra	726264	5208949	3408	2156	1050	157	0.204
12016	Gadera a Mantana	719343	5181742	3074	1879	962	377	0.487
12017	Rienza a Vandoies	703759	5186021	3408	1858	727	1949	0.604
12018	Ega a Ponte Nova	690388	5144694	2795	1644	883	117	0.858
12019	Avisio a Soraga	704769	5139837	3216	2061	1196	212	0.542
12020	Adige a Trento	661855	5107396	3859	1716	191	9746	0.665
12021	Adige a Boara Pisani	721955	5000493	3851	1494	-3	12222	0.979
12023	Piave a Ponte Cordevole	778172	5165008	2581	1678	1042	62	0.691
12024	Padola a Ponte Padola	766423	5167352	2933	1844	1205	57	1.221
12025	Piave Ansiei a Auronzo	763538	5160890	3101	1777	833	202	0.660
12027	Boite a Vodo	750072	5145189	3137	1826	831	330	0.512
12030	Cordevole a Caprile	731222	5145156	3225	1881	980	228	0.820
12031	Mis a Ponte SantAntonio	738563	5115653	2772	1262	353	112	1.138
12032	Piave a Segusino	727553	5095251	3196	1354	198	3439	1.009
12033	Brenta a Ospedaletto	697842	5101208	2535	1198	295	459	0.800
12034	Rio Valsura Lana	663733	5164779	3458	1920	340	282	-0.040
12036	Adige a Pescantina	651629	5037744	3859	1615	68	10932	0.746
12038	Boite a Perarolo	756874	5144229	3137	1751	582	391	0.291
12044	Riva a Seghe di Riva	731042	5201945	3286	2380	1532	91	0.104
12045	Noce a Ponte Ravina	642436	5131635	3688	2147	789	382	0.209
12046	Noce a Dermulo	658388	5133416	3688	1764	398	1050	0.671
12047	Travignolo a Sottosassa	704419	5131596	3094	1964	1219	100	0.866
12050	Adige Bronzolo	677535	5142206	3859	1795	223	7024	0.504
12051	Adige Spondigna	622937	5166034	3903	2207	884	685	0.451
12052	Aurino Caminata	725165	5198928	3488	2110	848	419	0.141
12053	Aurino S Giorgio	723491	5189441	3488	2034	819	597	0.309

Codice	Bacino	Est	Nord	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
12054	Cellina Barcis	775936	5121016	2706	1304	382	392	0.873
12057	Cismon Corlo	712910	5090768	3192	1375	253	628	1.058
12058	Cordevole Alleghe diga	731507	5142786	3334	1862	965	247	1.099
12059	Cordevole Saviner	729354	5147611	3152	1911	1028	110	0.665
12063	Isarco Fortezza	700931	5183980	3504	1862	720	680	0.723
12069	Piave Pieve diga	760197	5146618	3087	1645	649	818	0.741
12070	Posina Stancari	682545	5074654	2204	1101	303	119	0.624

12071	Rio Anterselva Bagni Salomone	735033	5189849	3436	2025	1088	83	0.846
12072	Rio Casies Colle	741945	5184215	2837	1957	1196	117	0.243
12073	Rio Massiaga	738104	5131601	2080	1712	1121	5	-0.508
12075	Astico alla Diga di Leda	688015	5072144	2308	1200	232	520	0.225
12076	Avisio a Stramentizzo	682967	5126062	3200	1831	773	728	0.472
12078	Diga di Careser	630382	5142800	3325	2968	2535	10	-0.251
12079	Diga di Forte Buso	708189	5131642	3158	2021	1407	66	1.513
12081	Diga di Santa Giustina	658650	5134655	3675	1765	514	1050	0.885
12083	Diga di Speccheri	666019	5070395	2232	1343	764	14	0.901
12084	Diga di Val Schener	714212	5109546	3192	1512	538	203	1.261
12085	Diga di Zoccolo	652249	5155884	3434	2163	1112	181	0.330

Tabella A.1.2: Dati idrologici riferiti ai bacini italiani.

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
11001	Sarca di Nambron a Pian di Nambron	1956	2003	44	18.3	0.866
11005	Adda a Fuentes	1911	2011	91	557.2	0.216
11007	Brembo a Ponte Briolo	1928	1998	58	536.2	0.716
11008	Serio a Ponte Cene	1927	1993	46	241.0	0.524
11011	S. Bernardino a Santino	1953	2010	23	320.4	2.644
11012	Toce a Cadarese	1955	1975	15	56.9	0.304
11013	Toce a Candoglia	1933	2010	66	1015.1	0.659
11015	Mastallone (Sesia) a Ponte Folle	1933	2010	43	324.5	2.214
11016	Rutor (Dora Baltea) a Promise	1931	1969	34	16.1	0.358
11017	Savara a Eau Rousse	1943	1972	18	24.6	0.303
11018	Artanavaz a St Oyen	1952	1972	14	12.7	0.183
11019	Ayasse a Champorcher	1944	1973	22	20.5	0.491
Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	1920	2010	87	800.6	0.241
11021	Orco a Pont Canavese	1928	2000	49	524.6	0.855
11022	Stura di Lanzo a Lanzo	1929	2010	64	481.7	0.833
11023	Chisone a Soucheres Basses	1955	1985	18	20.3	0.216
11024	Chisone a S. Martino	1937	2010	51	254.6	0.439
11025	Grana a Monterosso	1934	2010	55	37.7	0.344

11026	Tanaro a Ponte di Nava	1928	2010	46	128.8	0.867
11027	Tanaro a Nucetto	1933	1983	39	309.8	0.826
11029	Stura di Demonte a Gaiola	1935	2010	35	121.9	0.218
11030	Gesso della Valletta	1952	1964	11	67.6	0.610
11031	Gesso di Entracque	1952	1964	12	78.6	0.492
11040	Po a Crissolo	1935	1977	24	25.2	0.674
11050	Cervo (Sesia) a Passobreve	1937	2010	22	154.4	2.045
11051	Dora Baltea ad Aosta	1935	1993	19	314.2	0.170
11052	Evançon a Champoluc	1948	1978	21	25.6	0.250
11053	Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean	1926	1958	18	29.0	0.321
11054	Dora Riparia a Ulzio (Oulx)	1927	2010	43	54.3	0.211
11055	Dora Riparia a S.Antonio di Susa	1927	1995	62	95.7	0.092
11056	Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline	1931	1959	25	36.8	0.412
11058	Stura di Demonte a Pianche	1933	1955	18	39.5	0.220
11059	Rio Bagni a Bagni di Vinadio	1934	1956	20	24.2	0.396
11074	Sesia a Campertogno	1925	2010	34	149.2	0.874
11075	Sesia a Ponte Aranco	1926	1968	17	1379.8	1.963
11077	Chisone a Fenestrelle	1927	1951	19	30.6	0.198
11081	Sarca a Ponte Plaza	1926	1980	27	19.0	0.273
11091	Dora Baltea a Ponte di Mombardone	1929	1943	14	93.9	0.252
11093	Lys a d'Ejola	1932	1950	10	12.7	0.429
11094	Stura di Viù a Usseglio	1937	1947	11	24.1	0.304
11095	Dora di Bardonecchia a Beaulard	1930	2010	12	27.4	0.132
11096	Varaita a Rore	1927	2001	58	41.3	0.149
11097	Tanaro a Ormea	1928	1942	13	162.2	0.925
11102	Po a S.Mauro Torinese	1932	1978	26	1317.3	0.172
11103	Po a Casale Monferrato	1931	1994	19	2414.6	0.176
11106	Adda a Tirano	1925	1937	13	207.5	0.228
11117	Breuil a Alpette	1967	1980	14	13.1	0.473
11122	Cannobino a Traffiume	1981	2009	27	151.3	1.415
11125	Chiavanne a Alpette	1967	1980	14	10.2	0.463

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
11126	Chiusella a Gurzia	1934	2008	34	246.1	1.733
11129	Dora Baltea a Mazzè	1928	1998	10	1103.7	0.286
11130	Dora di Rhemes a Notre Dame	1967	1980	14	13.2	0.191
11135	Dora Riparia a Torino Ponte Washington	1957	2010	17	212.5	0.161
11141	Grand'Eyvia a Cretaz	1943	1977	10	65.0	0.578

11142	Isorno a Pontetto	1978	2010	14	93.0	1.323
11143	Lys a Guillemore	1972	2000	29	105.2	0.522
11144	Maira a Racconigi	2001	2010	10	95.4	0.098
11145	Maira a Saretto	1992	2008	17	6.2	0.111
11146	Maira a San Damiano Macra	1937	1998	57	67.9	0.150
11149	Marmore a Perreres	1981	2000	15	20.9	0.383
11150	Melezet a Melezet	1981	2008	15	6.6	0.152
11154	Orco a San Benigno Canavese	2000	2010	11	542.3	0.647
11156	Pellice a Villafranca Piemonte	2001	2010	10	321.5	0.337
11157	Po a Carignano	1995	2010	16	651.9	0.165
11164	Rutor a La Joux	1967	1999	29	13.8	0.332
11166	San Bernardino a Trobaso	1986	2009	24	259.5	2.009
11167	Stura di Demonte a Fossano	1934	2010	11	415.5	0.313
11169	Sermenza a Rimasco	1946	2008	44	182.6	2.218
11172	San Giovanni a Possaccio	1984	2006	14	89.4	1.667
11173	Stura di Lanzo a Torino	2001	2010	10	691.0	0.785
11176	Stura di Viù a Malciaussia	1937	2000	49	8.4	0.326
11177	Tanaro a Alba	1994	2010	16	1193.8	0.353
11178	Tanaro a Garessio	1996	2010	15	186.3	0.748
11180	Tanaro a Piantorre	1997	2010	14	346.0	0.691
11184	Toce a Lago d'Avino	1951	1000	35	2.8	0.508
11185	Toce a Lago Busin	1929	2000	60	1.5	0.600
11186	Toce a Lago del Sabbione	1954	2000	47	8.5	0.602
11187	Toce a Lago Vannino	1952	2000	49	5.5	0.474
11188	Varaita a Castello	1945	2001	56	18.8	0.277
11189	Varaita a Rossana	1964	1993	28	111.7	0.278
11194	Po Palazzolo Vercellese	1954	1969	16	2082.3	0.155
11195	Sarca di Val Genova Malga Ceret	1969	1989	21	58.1	1.097
11196	Sarca di Val Genova	1940	1960	14	52.3	0.351
11197	Sarca Nago	1933	1942	10	201.1	0.192
11198	Sarca Saone	1936	1970	18	231.8	0.428

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
12001	Tagliamento a Pioverno	1937	1964	28	1086.5	0.580
12002	Piave a Presenaio	1932	1997	43	47.4	0.328
12003	Piave a Ponte della Lasta	1947	1981	35	105.7	0.288
12006	Brenta a Barziza (Bassano)	1949	1965	17	683.6	0.441
12007	Astico a Forni di Val dAstico	1926	2011	90	70.9	0.522
12009	Adige a Tel	1958	1986	13	154.3	0.091

12010	Plan a Plan	1924	2012	86	12.7	0.276
12011	Adige a Ponte dAdige	1955	2012	50	331.9	0.124
12012	Ridanna a Vipiteno	1942	1974	32	70.1	0.338
12013	Isarco a Pra di Sopra	1929	2011	74	104.6	0.159
12014	Rienza a Monguelfo	1926	2011	74	39.0	0.144
12015	Aurino a Ca' di Pietra	1926	1992	38	51.8	0.329
12016	Gadera a Mantana	1928	2012	79	66.0	0.175
12017	Rienza a Vandoies	1953	1987	17	191.8	0.098
12018	Ega a Ponte Nova	1954	2005	39	11.3	0.097
12019	Avisio a Soraga	1920	1994	75	28.6	0.135
12020	Adige a Trento	1922	2013	70	1031.4	0.106
12021	Adige a Boara Pisani	1932	1954	19	857.3	0.070
12023	Piave a Ponte Cordevole	1932	1953	22	20.6	0.330
12024	Padola a Ponte Padola	1925	1969	44	11.2	0.196
12025	Piave Ansiei a Auronzo	1913	1994	73	58.7	0.290
12027	Boite a Vodo	1940	1956	17	83.0	0.251
12030	Cordevole a Caprile	1946	1957	12	33.1	0.145
12031	Mis a Ponte SantAntonio	1946	1957	12	86.6	0.774
12032	Piave a Segusino	1926	1988	48	913.3	0.266
12033	Brenta a Ospedaletto	1928	1954	26	58.2	0.127
12034	Rio Valsura Lana	1928	1952	24	49.5	0.176
12036	Adige a Pescantina	1920	1964	41	904.6	0.083
12038	Boite a Perarolo	1913	1942	27	81.8	0.209
12044	Riva a Seghe di Riva	1926	1990	28	53.0	0.582
12045	Noce a Ponte Ravina	1931	1952	19	70.4	0.184
12046	Noce a Dermulo	1924	1946	23	156.5	0.149
12047	Travignolo a Sottosassa	1930	1946	15	66.0	0.660
12050	Adige Bronzolo	1924	2012	87	759.3	0.108
12051	Adige Spondigna	1985	2011	27	49.6	0.072
12052	Aurino Caminata	1975	2011	18	176.7	0.421
12053	Aurino S Giorgio	1978	2011	29	148.4	0.249

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
12054	Cellina Barcis	1957	2002	46	400.8	1.022
12057	Cismon Corlo	1930	2007	72	261.3	0.416
12058	Cordevole Alleghe diga	1933	2003	68	66.9	0.271
12059	Cordevole Saviner	1939	2003	43	26.9	0.246
12063	Isarco Fortezza	1942	1997	55	140.6	0.207
12069	Piave Pieve diga	1951	1999	49	287.1	0.351

12070	Posina Stancari	1951	1966	13	94.0	0.793
12071	Rio Anterselva Bagni Salomone	1987	2011	25	14.0	0.168
12072	Rio Casies Colle	1984	2011	28	16.3	0.140
12073	Rio Massiaga	1983	2001	19	3.4	0.722
12075	Astico alla Diga di Leda	1966	1998	27	233.7	0.449
12076	Avisio a Stramentizzo	1931	1992	29	204.5	0.281
12078	Diga di Careser	1970	1994	25	7.7	0.736
12079	Diga di Forte Buso	1966	2004	22	68.1	1.027
12081	Diga di Santa Giustina	1951	1999	21	257.3	0.245
12083	Diga di Speccheri	1966	2005	12	18.1	1.315
12084	Diga di Val Schener	1966	2004	17	142.8	0.704
12085	Diga di Zoccolo	1966	1999	34	29.3	0.162

A.2 AUSTRIA

Tabella A.2.1: Caratteristiche morfologiche dei bacini austriaci

Codice	Bacino	Nord	Est	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
200105	Garsella	47.2272	9.8761	2505	1598	743	96	0.094
200147	Gisingen	47.2608	9.5789	3150	1585	422	1281	0.561
200196	Lustenau_(Eisenbahnbrue_ke)	47.4483	9.6589	3308	1687	387	6110	0.391
200204	Enz	47.3978	9.7613	1804	1119	485	51	0.125
200246	Hopfreben	47.2862	10.0469	2448	1685	978	42	0.120
200253	Au	47.3300	9.9731	2448	1520	771	149	0.379
200261	Mellau	47.3553	9.8811	2448	1431	676	229	0.562
200287	Schoenenbach_(Hengstig)	47.3864	10.0411	2014	1460	980	31	0.242
200360	Lech	47.2056	10.1411	2548	2070	1459	25	-0.307
200378	Lech_(Tannbergbruecke)	47.2083	10.1411	2697	1991	1436	84	0.436
201012	Steeg	47.2425	10.2942	2767	1936	1108	248	0.005
201053	Vorderhornbach_(Bruecke	47.3692	10.5383	2480	1689	951	64	0.109
201087	Lechaschau	47.4975	10.7100	2864	1734	838	1012	0.417
201111	Vils_(Laende)	47.5506	10.6486	2146	1273	810	198	1.581
201293	Landeck-Perjen	47.1469	10.5718	4044	2235	771	3488	0.381
201319	Imst (Bahnhof)	47.2192	10.7577	4044	2173	708	3827	0.445
201368	Vent_(unterh._Niederta_bach)	46.8591	10.9131	3733	2915	1901	165	-0.275
201459	Magerbach	47.2586	10.8749	4044	2207	655	5092	0.289
201525	Innsbruck (oberh.Sill)	47.2624	11.3817	4044	2132	571	5755	0.363
201533	Gries_am_Brenner	47.0361	11.4792	2794	1843	1175	58	0.701
201566	Szeinach am Brenner	47.0886	11.4685	3274	1948	1041	112	0.771
201574	Puig	47.1122	11.4542	3379	1927	1021	342	1.025
201574	Puig	47.1116	11.4529	3465	1909	1006	342	1.258
201624	Innsbruck - Reichenau	47.2745	11.4302	3471	1897	569	853	0.291
201657	Wattens	47.3010	11.5880	2839	1875	552	74	-0.377
201681	Jenbach - Rotholz	47.3921	11.7957	4044	2040	523	7210	0.518
201723	Persal	47.1492	11.8144	3191	2055	984	129	0.093
201749	Mayrhofen	47.1694	11.8599	3473	2131	623	611	-0.161
201780	Hart im Zillertal	47.3468	11.8632	3473	1918	533	1094	0.192
201806	Brixlegg	47.4329	11.8737	4044	2006	515	8484	0.603
201822	Mariathal	47.4550	11.8661	2153	1231	544	273	0.554
201863	Bruckhaeusl	47.4914	12.1050	2413	1326	541	322	0.630
201913	Kitzbuehel_(Bahnhofsbrue_ke)	47.4556	12.3894	2208	1421	754	153	0.281
201921	Sperten	47.5192	12.4039	2186	1278	661	147	0.785

Codice	Bacino	Nord	Est	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
201939	St._Johann_in_Tirol	47.5200	12.4186	2264	1307	659	332	0.794
201947	Almdorf	47.5197	12.4411	2047	1231	662	165	0.720
203034	Sulzau	47.2319	12.2469	3386	2258	868	81	-0.269
203042	Neukirchen	47.2372	12.2631	3142	2144	863	41	-0.313
203075	Mittersill	47.2836	12.4808	3386	1908	792	583	0.524
203075	Mittersill	47.2813	12.4497	3646	1923	786	581	0.864
203125	Bruck (Salzach)	47.2865	12.8260	3646	1776	749	1166	1.450
203141	Bruck_(Fuscher_Ache)	47.2728	12.8272	3392	1885	748	161	0.524
203166	Rauris_(Unterland)	47.2414	12.9911	3190	1867	916	242	0.640
203174	Dienten	47.3358	13.0192	2854	1440	921	53	3.438
203208	Bad_Hofgastein	47.1639	13.1090	3167	1894	804	221	0.261
203224	Grossarl	47.2378	13.1972	2660	1677	859	145	0.318
203232	Wagrain	47.3292	13.3006	2530	1574	858	91	0.541
203257	Kreuzbergmauth	47.4372	13.2172	2183	1198	615	155	1.196
203307	Obergaeu	47.5842	13.1828	2396	1195	486	395	1.201
203315	Torren	47.5914	13.1583	2320	1623	474	66	-0.527
203323	Golling	47.5965	13.1640	3646	1576	468	3553	1.547
203463	Viehhofen	47.3661	12.7364	2148	1536	872	151	-0.114
203471	Saalfelden	47.4281	12.8389	2747	1342	728	120	2.433
203505	Lofer_(Loferbach)	47.5856	12.6983	2378	1254	622	107	1.369
203711	Altenmarkt_im_Pongau	47.3828	13.4258	2491	1446	847	135	1.303
203760	Mauterndorf	47.1339	13.6842	2465	1784	1104	102	0.003
203778	Weisspriach	47.1769	13.7050	2488	1812	1088	75	-0.100
203786	Tamsweg_(Taurach)	47.1353	13.8036	2909	1727	1016	378	1.143
204032	Werfen	47.4816	13.1910	3646	1632	515	2952	1.416
205104	Obertraun	47.5644	13.7217	2387	1347	529	334	0.434
205120	Waldbachstrub	47.5508	13.6331	2696	1723	543	42	-0.250
205765	Dietlgut	47.6689	14.1092	2203	1290	623	25	0.598
205807	Spital_am_Pyhrn	47.6692	14.3347	2186	1021	567	40	3.073
205815	Windischgarsten	47.7222	14.3325	1910	1012	601	70	2.208
205823	Teichlbruecke	47.7269	14.2956	2186	1011	563	149	3.208
210526	Archkogl	47.6222	13.8283	2387	1551	715	125	0.001
210542	Altaussee_(Traun)	47.6356	13.7697	2014	1546	704	55	-0.584
210583	Kainisch	47.5708	13.8403	1967	1291	752	57	0.408
210625	Tetter	47.3544	13.7136	2596	1854	1018	65	-0.163
210641	Schladming	47.3972	13.6986	2909	1501	714	649	1.385
210773	Aigen_im_Ennstal-Kette	47.5300	14.1472	2160	1403	627	161	-0.038

Codice	Bacino	Nord	Est	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
210799	Liezen (Rötelbrücke)	47.5521	14.2520	2986	1416	630	2129	1.801
210815	Selzthal	47.5444	14.3078	2330	1280	623	369	1.019
210823	Admont (Enns)	47.5815	14.4596	2986	1379	619	2648	2.054
210849	Gscgatterboden	47.5907	14.6307	2986	1368	569	2785	1.864
210864	Gusswerk	47.7414	15.3061	1953	1080	732	280	2.926
210880	Weichselboden	47.6761	15.1711	1716	1154	666	54	0.238
210898	Wildalpen	47.6650	14.9856	2242	1116	600	592	2.210
211102	St.Georgen_ob_Judenbur	47.2124	14.4987	2935	1557	720	2334	1.107
211110	Ziestl	47.3000	14.4597	2228	1551	954	198	0.205
211136	Zeltweg	47.1847	14.7539	2935	1512	654	2958	1.133
211169	Kammern_im_Liesingtal	47.3886	14.9067	2238	1253	628	266	0.978
211185	Leoben	47.3781	15.0939	2935	1385	520	4392	1.395
211193	Donawitz	47.3939	15.0342	2077	1158	588	167	1.048
211227	Neuberg_an_der_Muerz	47.6706	15.5733	1902	1206	727	232	0.749
211243	Kindthal	47.5253	15.4731	1990	1090	551	728	1.151
211268	Kapfenberg-Diemlach	47.4314	15.2731	2213	1063	481	1365	1.764
211292	Bruck_an_der_Mur_unter_Muerz	47.4106	15.2828	2935	1298	463	6214	1.738
211383	Schwanberg	46.7556	15.2056	1936	1211	393	75	-0.165
212027	Rabland	46.7481	12.4736	3018	1924	1039	374	0.375
212068	Innergschloess	47.1244	12.4583	3434	2549	1712	39	0.088
212076	Matreier_Tauernhaus	47.1186	12.5017	3525	2485	1524	60	0.127
212092	Bruehl	46.9744	12.5517	3525	2261	855	518	-0.148
212126	Spoettling-Taurer	47.0258	12.6336	3551	2690	1650	14	-0.246
212167	Lienz	46.8333	12.7656	3551	2139	637	1199	-0.089
212183	Waier	46.9944	12.5261	3508	2289	875	285	-0.200
212316	Lienz-Peggetz	46.8231	12.7931	3551	2021	636	1876	0.162
212324	Oberdrauburg_(DFUe)	46.7481	12.9736	3551	1961	567	2112	0.219
212357	Sachsenburg_(Bruecke)	46.8275	13.3500	3551	1858	482	2561	0.363
212381	Mallnitz	46.9833	13.1744	3227	2065	1106	85	0.335
212431	Gmuend	46.9058	13.5372	2881	1696	747	360	0.394
212431	Gmünd - OWF	46.9055	13.5378	3004	1711	741	360	0.540
212522	Seebruecke	46.8139	13.5083	2400	1342	560	286	0.574
212613	Maria_Luggau_(Moos)	46.7033	12.7411	2622	1782	1094	146	0.349
212647	Mauthen	46.6686	13.0003	2561	1628	665	349	-0.045
212670	Rattendorf	46.6239	13.2544	2650	1454	579	595	0.596
212704	Neudorf	46.6197	13.3744	1811	1034	589	75	1.298
212753	Noetsch	46.5819	13.6158	2672	1301	548	909	1.450

Codice	Bacino	Nord	Est	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
212787	Federaun	46.5697	13.8156	2672	1243	485	1305	1.579
212860	Maitratten	46.7864	13.9333	2293	1580	979	201	0.291
212886	Weitensfeld_(Ost)	46.8500	14.2006	2293	1334	708	432	0.894
212894	Hirt	46.9014	14.4392	2268	1160	599	469	1.761
212928	Huettenberg	46.9383	14.5489	2374	1377	817	130	1.371
212936	Brueckl	46.7581	14.5333	2374	1265	507	316	0.770
213082	St.Gertraud	46.8964	14.8692	2244	1216	561	380	0.967
213090	Krottendorf	46.6636	14.9456	2244	1032	357	955	1.399
213157	Launsdorf	46.7608	14.4778	2293	1132	501	1243	1.486
213199	Drauhofen	46.6204	14.5473	3793	1882	548	3672	0.716
230078	Telfs (Fußgängersteg)	47.3017	11.0730	4044	2175	618	5273	0.316

Tabella A.2.2: Dati idrologici riferiti ai bacini austriaci.

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
200105	Garsella	1964	2007	44	55.2	0.578
200147	Gisingen	1951	2005	55	330.3	0.258
200196	Lustenau_(Eisenbahnbrue_ke)	1951	2005	52	1351.7	0.221
200204	Enz	1956	2007	52	122.2	2.391
200246	Hopfreben	1956	2007	52	40.7	0.977
200253	Au	1951	2007	57	108.8	0.728
200261	Mellau	1951	2006	56	182.2	0.797
200287	Schoenenbach_(Hengstig)	1951	2007	57	45.2	1.454
200360	Lech	1971	2007	37	13.1	0.519
200378	Lech_(Tannbergbruecke)	1951	2007	57	52.2	0.620
201012	Steeg	1921	2007	87	107.0	0.432
201053	Vorderhornbach_(Bruecke	1975	2007	33	44.3	0.692
201087	Lechaschau	1971	2007	37	368.3	0.364
201111	Vils_(Laende)	1961	2007	47	98.6	0.498
201293	Landeck-Perjen	1951	2012	54	375.8	0.108
201319	Imst (Bahnhof)	1986	2010	25	426.7	0.112
201368	Vent_(unterh._Niederta_bach)	1951	2002	52	63.6	0.386
201459	Magerbach	1951	2010	60	602.9	0.118
201525	Innsbruck (oberh.Sill)	1951	2012	62	647.9	0.113

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
201533	Gries_am_Brenner	1951	2004	54	8.8	0.151
201566	Szeinach am Brenner	1952	2006	15	18.8	0.168
201574	Puig	1951	2007	57	60.2	0.176
201574	Puig	1951	2011	13	45.5	0.133
201624	Innsbruck - Reichenau	1951	2009	29	126.6	0.148
201657	Wattens	1975	2004	3	10.0	0.135
201681	Jenbach - Rotholz	1971	2012	42	749.2	0.104
201723	Persal	1962	2007	46	30.6	0.237
201749	Mayrhofen	1966	2005	21	127.6	0.209
201780	Hart im Zillertal	1966	2012	47	163.9	0.150
201806	Brixlegg	1976	2010	35	914.9	0.108
201822	Mariathal	1976	2007	32	156.5	0.574
201863	Bruckhaeusl	1951	2007	57	97.2	0.301
201913	Kitzbuehel_(Bahnhofsbrue_ke)	1951	2007	57	53.2	0.347
201921	Sperten	1961	2007	47	59.5	0.404
201939	St._Johann_in_Tirol	1951	2007	57	107.9	0.324
201947	Almdorf	1956	2007	52	78.7	0.476
203034	Sulzau	1961	2007	47	42.2	0.523
203042	Neukirchen	1971	2007	37	20.2	0.498
203075	Mittersill	1951	2007	57	192.7	0.331
203075	Mittersill	1951	2012	50	151.9	0.261
203125	Bruck (Salzach)	1951	2010	60	190.6	0.163
203141	Bruck_(Fuscher_Ache)	1951	2007	57	35.9	0.223
203166	Rauris_(Unterland)	1961	2007	47	59.3	0.245
203174	Dienten	1971	2007	37	18.1	0.339
203208	Bad_Hofgastein	1951	2007	57	90.4	0.410
203224	Grossarl	1951	2007	57	40.9	0.283
203232	Wagrain	1951	2007	57	21.3	0.233
203257	Kreuzbergmauth	1951	2007	57	26.8	0.173
203307	Obergaeu	1951	2007	57	252.3	0.639
203315	Torren	1961	2007	47	30.0	0.458
203323	Golling	1951	2012	62	551.4	0.155
203463	Viehhofen	1961	2007	47	43.4	0.288
203471	Saalfelden	1951	2007	57	45.4	0.380
203505	Lofer_(Loferbach)	1961	2007	47	41.4	0.385
203711	Altenmarkt_im_Pongau	1961	2002	42	33.7	0.251
203760	Mauterndorf	1961	2007	47	19.3	0.189

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
203778	Weisspriach	1961	2007	47	15.6	0.207
203786	Tamsweg_(Taurach)	1961	2007	47	62.1	0.164
204032	Werfen	1995	2010	16	410.3	0.139
205104	Obertraun	1909	2002	87	136.7	0.409
205120	Waldbachstrub	1948	2005	58	24.4	0.586
205765	Dietlgut	1951	2007	57	14.5	0.576
205807	Spital_am_Pyhrn	1957	2007	51	16.4	0.408
205815	Windischgarsten	1971	2007	37	30.7	0.442
205823	Teichlbruecke	1951	2007	57	62.1	0.418
210526	Archkogl	1951	2007	57	30.1	0.241
210542	Altaussee_(Traun)	1951	2007	57	27.8	0.510
210583	Kainisch	1951	2007	57	24.3	0.424
210625	Tetter	1951	2007	57	19.6	0.300
210641	Schladming	1951	2007	57	122.4	0.189
210773	Aigen_im_Ennstal-Kette	1976	2007	32	32.4	0.201
210799	Liezen (Rötelbrücke)	1951	2010	60	292.7	0.137
210815	Selzthal	1951	2007	57	40.8	0.111
210823	Admont (Enns)	1985	2012	28	360.4	0.136
210849	Gscgatterboden	1965	2005	41	353.6	0.127
210864	Gusswerk	1965	2007	43	93.6	0.334
210880	Weichselboden	1971	2007	37	52.8	0.976
210898	Wildalpen	1951	2007	57	156.0	0.263
211102	St.Georgen_ob_Judenbur	1951	2007	57	271.1	0.116
211110	Ziestl	1969	2007	39	28.8	0.146
211136	Zeltweg	1966	2007	42	303.5	0.103
211169	Kammern_im_Liesingtal	1966	2007	42	26.4	0.099
211185	Leoben	1951	2007	57	370.4	0.084
211193	Donawitz	1966	2007	42	15.8	0.094
211227	Neuberg_an_der_Muerz	1961	2007	47	85.0	0.367
211243	Kindthal	1951	2007	41	101.4	0.139
211268	Kapfenberg-Diemlach	1971	2007	26	132.1	0.097
211292	Bruck_an_der_Mur_unter_Muerz	1967	2007	41	487.2	0.078
211383	Schwanberg	1952	2007	26	24.3	0.323
212027	Rabland	1953	2007	45	42.6	0.114
212068	Innergschloess	1951	2006	32	41.9	1.067
212076	Matreier_Tauernhaus	1951	2007	38	53.6	0.895
212092	Bruehl	1951	2007	55	160.0	0.309

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
212126	Spoettling-Taurer	1958	2007	12	4.8	0.341
212167	Lienz	1951	2007	56	279.5	0.233
212183	Waier	1981	2006	12	88.8	0.311
212316	Lienz-Peggetz	1971	2007	37	325.6	0.174
212324	Oberdrauburg_(DFUe)	1951	2007	57	371.2	0.176
212357	Sachsenburg_(Bruecke)	1951	2007	57	380.3	0.148
212381	Mallnitz	1961	2007	24	29.0	0.341
212431	Gmuend	1966	2007	22	60.7	0.168
212431	Gmünd - OWF	1961	2007	10	36.8	0.102
212522	Seebruecke	1966	2007	11	14.6	0.051
212613	Maria_Luggau_(Moos)	1951	2007	28	41.9	0.287
212647	Mauthen	1951	2007	47	123.4	0.354
212670	Rattendorf	1951	2007	54	221.7	0.373
212704	Neudorf	1960	2007	20	21.8	0.290
212753	Noetsch	1951	2007	54	296.2	0.326
212787	Federaun	1890	2007	118	372.9	0.286
212860	Maitratten	1951	2007	24	22.9	0.113
212886	Weitensfeld_(Ost)	1951	2006	30	38.3	0.089
212894	Hirt	1961	2007	23	34.0	0.072
212928	Huettenberg	1975	2007	8	8.4	0.064
212936	Brueckl	1956	2006	23	19.3	0.061
213082	St.Gertraud	1952	2007	31	44.3	0.117
213090	Krottendorf	1951	2007	45	98.5	0.103
213157	Launsdorf	1975	2007	12	73.4	0.059
213199	Drauhofen	1974	2010	37	446.2	0.122
230078	Telfs (Fußgängersteg)	1986	2010	25	615.9	0.117

A.3 SVIZZERA

Tabella A.3.1: Caratteristiche morfologiche dei bacini svizzeri.

Codice	Bacino	Nord	Est	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
2011	Rhone a Sion	46.6309	10.4546	4617	2291	483	3372	0.460
2016	Aare - Brugg	47.4839	8.1960	4142	1000	332	11681	8.734
2018	Reuss - Mellingen	47.4224	8.2724	3601	1259	344	3386	3.052
2019	Aare - Brienzwiler	46.7470	8.0931	4061	2135	575	555	0.377
2020	Ticino - Bellinzona	46.4701	6.8494	3397	1679	226	1517	0.286
2024	Rhone a Branson	46.5636	8.3632	4617	2235	460	3728	0.547
2029	Aare - Brügg. Aegerten	47.1234	7.2843	4142	1142	420	8249	7.187
2030	Aare - Thun	46.7659	7.6128	4142	1746	548	2459	1.810
2033	Vorderrhein - Ilanz	46.7732	9.1441	3610	2030	691	774	0.281
2053	Drance - Martigny. Pont de Rossettan	46.0989	7.0636	4305	2250	478	676	0.250
2056	Reuss - Seedorf	46.8852	8.6217	3601	2013	438	833	0.012
2063	Aare - Murgenthal	47.2674	7.8298	4142	1066	399	10059	8.466
2067	Inn - Martina	46.6368	10.0223	4044	2343	1028	1941	0.473
2078	Poschiavino - Le Prese	46.2965	10.0813	3833	2162	967	168	0.654
2085	Aare - Hagneck	47.0569	7.1853	4142	1368	435	5112	4.041
2086	Brenno - Loderio	46.2471	8.0371	3397	1815	347	400	0.124
2087	Reuss - Andermatt	46.6436	8.5907	3526	2284	1426	190	0.744
2091	Rhein - Rheinfelden. Messstation	46.2059	6.1423	4142	1068	326	34524	7.146
2099	Limmat - Zürich. Unterhard	47.4771	8.3105	3585	1194	402	2174	4.148
2102	Sarner Aa - Sarnen	46.8896	7.3523	2667	1281	468	269	1.224
2104	Linth - Weesen. Biäsche	47.1024	9.0732	3585	1584	418	1062	1.246
2105	Inn - St. Moritzbad	46.8871	10.4668	3447	2399	1769	155	1.146
2109	Lütschine - Gsteig	46.4202	7.8185	4142	2033	585	381	0.758
2110	Reuss - Mühlau. Hünenberg	47.2237	8.3972	3601	1371	390	2902	2.390
2112	Sitter - Appenzell	47.1981	7.1731	2448	1256	769	74	2.780
2117	Drance de Bagnes - Le Châble. Villette	46.7767	9.8786	4289	2609	811	254	-0.101
2119	Sarine - Fribourg	47.0479	9.4194	3208	1247	534	1271	3.483
2135	Aare - Bern. Schönau	46.9344	7.4489	4142	1596	502	2941	2.523
2141	Albula - Tiefencastel	46.6638	9.5754	3401	2128	845	529	-0.013
2143	Rhein - Rekingen	46.1542	5.9715	3610	1750	407	14767	0.628
2150	Landquart - Felsenbach	46.2260	8.0164	3291	1797	571	614	0.354
2151	Simme - Oberwil	46.6304	10.1960	3243	1641	775	344	1.509

Codice	Bacino	Nord	Est	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
2152	Reuss - Luzern. Geissmattbrücke	47.0553	8.2996	3601	1504	421	2254	1.679
2160	Sarine - Broc. Château d 'en bas	46.6915	7.2871	3208	1500	693	636	2.063
2161	Massa - Blatten bei Naters	46.1695	8.7747	4185	2937	1450	196	0.316
2170	Arve - Genève. Bout du Monde	46.1815	6.1601	4715	1370	30	1973	2.908
2174	Rhone a Chancy (Aux Ripes)	46.2203	7.3588	4175	1569	336	10308	2.056
2176	Sihl - Zürich. Sihlhölzli	47.3333	9.4119	2164	1045	407	343	1.312
2179	Sense - Thörishaus. Sensematt	46.6563	7.4404	2185	1071	551	351	2.115
2185	Plessur - Chur	46.8610	9.5118	2947	1868	563	264	-0.248
2187	Werdenberger Binnenkanal - Salez	47.2437	9.5202	2415	1003	434	183	2.845
2200	Weisse Lütschine - Zweilütschinen	46.6306	7.9009	4142	2165	650	165	0.491
2203	Grande Eau - Aigle	46.5333	8.3589	3164	1562	431	132	0.686
2205	Aare - Untersiggenthal. Stilli	47.5180	8.2359	4142	1064	326	17553	7.224
2215	Saane - Laupen	46.8976	8.2462	3208	1137	481	1862	4.473
2219	Simme - Oberried / Lenk	47.0171	7.8437	3243	2347	1097	35	-0.393
2232	Allenbach - Adelboden	46.4872	7.5530	2714	1863	1290	29	0.809
2239	Spöl - Punt dal Gall	46.5179	8.6727	3289	2389	1679	295	0.429
2243	Limmat - Baden. Limmatpromenade	46.7590	9.7916	3585	1131	351	2384	4.449
2244	Krummbach a Klusmatten	47.0362	8.0695	3117	2271	1800	19	1.401
2256	Rosegbach - Pontresina	46.6041	7.0939	4044	2704	1768	67	0.713
2262	Berninabach - Pontresina	46.4876	9.9075	3991	2615	1812	107	1.241
2263	Chamuerabach - La Punt-Chamues-ch	46.2848	9.1194	3222	2548	1715	73	-0.272
2265	Inn - Tarasp	46.4859	9.8354	4044	2384	1182	1581	0.622
2268	Rhone a Gletsch	46.2595	8.8413	3625	2710	1713	39	-0.121
2269	Lonza a Blatten	47.1329	9.0896	3889	2624	1523	77	0.233
2276	Grosstalbach - Isenthal	47.1078	8.7666	2925	1819	769	44	0.080
2288	Rhein - Neuhausen. Flurlingerbrücke	46.3187	7.9764	3610	1750	407	11930	0.628
2289	Rhein - Basel. Rheinhalle	47.3844	9.6422	4142	1242	326	35878	4.491
2290	Areuse - St-Sulpice	46.9120	6.5597	1379	1110	750	104	-0.355
2299	Alpbach - Erstfeld. Bodenberg	46.8126	8.6001	3190	2205	1019	21	-0.243
2300	Minster - Euthal. Rüti	46.1727	9.0842	2164	1352	890	59	1.327
2303	Thur - Jonschwil. Mühlau	46.2502	8.8457	2490	1021	533	493	4.127

Codice	Bacino	Nord	Est	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
2304	Ova dal Fuorn - Zernez. Punt la Drossa	46.6564	10.1913	3159	2327	1716	55	0.593
2307	Suze - Sonceboz	46.3605	8.9486	1571	1036	643	127	0.594
2319	Ova da Cluozza - Zernez	46.6945	10.1196	3112	2371	1507	27	-0.204
2327	Dischmabach - Davos. Kriegsmatte	46.9455	8.2777	3142	2376	1669	43	0.133
2333	Bied du Locle - La Rançonnière	47.0543	6.7159	1327	1074	822	37	0.006
2342	Saltina a Brig	46.8722	8.6528	3376	2014	678	77	0.028
2346	Rhone a Brig	46.4707	8.2458	4255	2339	670	906	0.232
2347	Riale di Roggiasca - Roveredo	46.9099	7.2353	2204	1702	951	8	-0.453
2351	Vispa a Visp	46.2924	7.8788	4617	2648	654	786	-0.020
2352	Linth - Linthal. Ausgleichsbecken KLL	47.3920	8.5266	3585	2085	667	147	0.089
2355	Landwasser - Davos. Frauenkirch	46.9760	9.6134	3142	2224	1488	184	0.399
2356	Riale di Calneggia - Cavergno	46.4911	9.8995	2851	2003	864	24	-0.357
2364	Ticino- Piotta	46.2849	7.8815	3168	2071	1023	159	0.071
2366	Poschiavino - La Rösa	46.4002	10.0685	3027	2285	1868	14	1.380
2368	Maggia - Locarno. Solduno	46.3395	8.6092	3246	1530	207	927	0.477
2371	Orbe - Le Chenit. Frontière	46.5520	6.1543	1565	1235	1040	46	1.197
2372	Linth - Mollis. Linthbrücke	46.9177	8.9927	3585	1743	435	600	0.672
2378	Orbe - Orbe. Le Chalet	46.7289	6.5248	1664	1139	450	343	-0.335
2384	Muota - Ingenbohl	46.2243	9.0570	2793	1363	436	317	0.914
2387	Hinterrhein - Fürstenau	46.9114	8.5621	3401	2127	650	1577	-0.198
2403	Inn - Cinuos-chel	46.9392	7.7984	4044	2456	1593	733	1.491
2409	Emme - Eggiwil. Heidbüel	46.0819	7.2140	2197	1281	743	124	1.218
2418	Julia - Tiefencastel	46.7903	10.2800	3394	2196	838	325	-0.171
2419	Rhone a Reckingen	46.2029	9.1701	3625	2305	1314	214	0.536
2420	Moesa - Lumino Sassello	47.0819	8.8149	3149	1667	242	472	0.059
2426	Seez - Mels	46.4275	7.4738	2832	1803	477	106	-0.313
2430	Rein da Sumvitg - Sumvitg. Encardens	46.6511	8.9919	3161	2457	1487	22	-0.380
2436	Chli Schliere - Alpnach. Chilch Erli	46.5705	9.9373	2117	1345	449	22	-0.198
2457	Aare - Ringgenberg. Goldswil	46.6952	7.8806	4142	1951	558	1138	0.981
2468	Sitter - St. Gallen. Bruggen / Au	47.4150	9.0787	2448	1042	573	261	4.097

Codice	Bacino	Nord	Est	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	ζ
2469	Kander - Hondrich	46.6616	9.5773	3663	1854	634	491	0.806
2473	Rhein - Diepoldsau. Rietbrücke	46.8390	9.4574	3610	1771	407	6299	0.559
2474	Calancasca - Buseno	46.3777	8.9706	3149	1931	754	121	0.051
2475	Maggia - Bignasco. Ponte Nuovo	46.6655	7.8725	3245	1879	437	316	-0.081
2480	Areuse - Boudry	46.9503	6.8399	1601	1077	445	378	-0.245
2481	Engelberger Aa - Buochs. Flugplatz	46.8725	7.8057	3191	1609	441	228	0.580
2486	Veveyse - Vevey. Copet	47.2397	9.5109	1951	1098	402	65	0.364
2487	Kleine Emme - Werthenstein. Chappelboden	47.0715	8.2795	2210	1167	584	311	1.380
2488	Simme - Latterbach	47.4158	9.3288	3243	1594	661	563	1.339
2491	Schächen - Bürglen. Galgenwäldli	47.3691	8.5273	3217	1728	494	108	0.325
2493	Promenthouse - Gland. Route Suisse	46.4073	6.2700	1627	1027	392	120	-0.086
2494	Ticino - Polleggio Campagna	46.7770	9.2076	3168	1796	292	444	-0.128
2498	Glenner - Castrisch	46.9741	8.4064	3318	2022	691	381	-0.041
2602	Rhein - Domat/Ems	46.1269	7.0922	3610	2013	564	3229	0.160
2603	Ilfis - Langnau	46.7164	9.4486	2080	1039	688	187	4.025
2604	Biber - Biberbrugg	47.1547	8.7220	1477	1003	825	32	3.264
2605	Verzasca lavertezzo Campioi	46.6325	7.9008	2862	1651	494	185	0.071
2606	Rhone a Genève	46.3709	8.5440	4617	1658	369	8000	2.435
2607	Goneri - Oberwald	46.7748	9.2119	3139	2383	1399	39	-0.326
2609	Alp - Einsiedeln	47.1521	8.7404	1768	1157	843	47	1.698
2612	Riale di Pincascia - Lavertezzo	46.6877	7.2824	2511	1705	561	45	-0.407
2617	Rom - Müstair	46.3180	7.9878	3021	2184	1232	128	-0.175
2634	Kleine Emme - Emmen	46.6679	7.6721	2210	1054	439	478	1.570
2635	Grossbach - Einsiedeln. Gross	46.3201	6.9718	1573	1283	939	9	-0.225

Tabella A.3.2: Dati idrologici riferiti ai bacini svizzeri.

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
2011	Rhone a Sion	1916	2007	102	537.1	0.159
2016	Aare - Brugg	1916	2007	102	838.0	0.072
2018	Reuss - Mellingen	1904	2007	114	495.6	0.146
2019	Aare - Brienzwiler	1905	2007	113	206.1	0.371
2020	Ticino - Bellinzona	1914	2007	104	891.4	0.588
2024	Rhone a Branson	1941	2007	77	532.0	0.143
2029	Aare - Brügg. Aegerten	1905	2007	113	517.0	0.063
2030	Aare - Thun	1906	2007	112	315.3	0.128
2033	Vorderrhein - Ilanz	1910	2007	108	383.3	0.495
2053	Drance - Martigny. Pont de Rossettan	1991	2007	27	62.2	0.092
2056	Reuss - Seedorf	1904	2007	114	313.6	0.377
2063	Aare - Murgenthal	1916	2007	102	727.3	0.072
2067	Inn - Martina	1904	2007	114	291.4	0.150
2078	Poschiavino - Le Prese	1931	2007	87	46.7	0.278
2085	Aare - Hagneck	1984	2007	33	715.1	0.140
2086	Brenno - Loderio	1904	2007	113	189.0	0.472
2087	Reuss - Andermatt	1910	2007	108	115.7	0.609
2091	Rhein - Rheinfelden. Messstation	1933	2007	85	2823.0	0.082
2099	Limmat - Zürich. Unterhard	1906	2007	112	342.2	0.157
2102	Sarner Aa - Sarnen	1907	2007	111	31.3	0.116
2104	Linth - Weesen. Biäsche	1907	2007	111	163.8	0.154
2105	Inn - St. Moritzbad	1907	2007	111	30.6	0.198
2109	Lütschine - Gsteig	1908	2007	110	127.8	0.335
2110	Reuss - Mühlau. Hünenberg	1906	2007	112	483.9	0.167
2112	Sitter - Appenzell	1912	2007	106	76.2	1.024
2117	Drance de Bagnes - Le Châble. Villette	1911	2007	107	57.8	0.228
2119	Sarine - Fribourg	1911	2007	107	332.4	0.262
2135	Aare - Bern. Schönau	1918	2007	100	357.9	0.122
2141	Albula - Tiefencastel	1921	2007	97	79.9	0.151
2143	Rhein - Rekingen	1904	2007	114	1178.1	0.080
2150	Landquart - Felsenbach	1913	2007	101	188.3	0.307
2151	Simme - Oberwil	1921	2007	97	83.0	0.241
2152	Reuss - Luzern. Geissmattbrücke	1922	2007	96	292.6	0.130
2160	Sarine - Broc. Château d 'en bas	1923	2007	95	219.4	0.345
2161	Massa - Blatten bei Naters	1904	2007	103	89.8	0.458
2170	Arve - Genève. Bout du Monde	1904	2007	114	490.6	0.249

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
2174	Rhone a Chancy (Aux Ripes)	1904	2007	114	973.9	0.094
2176	Sihl - Zürich. Sihlhölzli	1919	2007	99	147.1	0.429
2179	Sense - Thörishaus. Sensematt	1928	2007	90	157.9	0.450
2185	Plessur - Chur. nur Hauptstation	1931	2007	87	49.6	0.188
2187	Werdenberger Binnenkanal - Salez	1931	2007	87	67.5	0.369
2200	Weisse Lütschine - Zweilütschinen	1933	2007	85	64.1	0.388
2203	Grande Eau - Aigle	1935	2007	83	37.8	0.287
2205	Aare - Untersiggenthal. Stilli	1904	2007	114	1543.1	0.088
2215	Saane - Laupen	1944	2007	74	402.8	0.216
2219	Simme - Oberried / Lenk	1944	2007	74	17.9	0.516
2232	Allenbach - Adelboden	1950	2007	68	27.8	0.966
2239	Spöl - Punt dal Gall	1951	2007	56	35.2	0.119
2243	Limmat - Baden. Limmatpromenade	1903	2007	85	371.9	0.156
2244	Krummbach a Klusmatten	1952	2007	64	10.1	0.522
2256	Rosegbach - Pontresina	1955	2007	63	29.0	0.437
2262	Berninabach - Pontresina	1955	2007	63	48.6	0.454
2263	Chamuerabach - La Punt-Chamues-ch	1955	2007	63	17.3	0.235
2265	Inn - Tarasp	1957	2007	61	218.3	0.138
2268	Rhone a Gletsch	1956	2007	68	20.6	0.522
2269	Lonza a Blatten	1956	2007	62	37.8	0.488
2276	Grosstalbach - Isenthal	1957	2007	61	17.6	0.400
2288	Rhein - Neuhausen. Flurlingerbrücke	1904	2007	114	719.4	0.060
2289	Rhein - Basel. Rheinhalle	1969	2007	149	2895.0	0.081
2290	Areuse - St-Sulpice	1959	2007	59	38.6	0.371
2299	Alpbach - Erstfeld. Bodenberg	1961	2007	57	22.6	1.093
2300	Minster - Euthal. Rüti	1961	2007	57	93.9	1.588
2303	Thur - Jonschwil. Mühlau	1966	2007	52	344.9	0.700
2304	Ova dal Fuorn - Zernez. Punt la Drossa	1960	2007	58	7.9	0.142
2307	Suze - Sonceboz	1961	2007	57	30.0	0.236
2319	Ova da Cluozza - Zernez	1962	2007	55	7.3	0.269
2327	Dischmabach - Davos. Kriegsmatte	1964	2007	54	11.6	0.270
2333	Bied du Locle - La Rançonnière	1964	2007	54	6.0	0.164
2342	Saltina a Brig	1966	2007	52	28.9	0.377
2346	Rhone a Brig	1965	2007	53	257.6	0.284
2347	Riale di Roggiasca - Roveredo	1966	2007	52	27.4	3.368
2351	Vispa a Visp	1903	2007	106	150.4	0.191
2352	Linth - Linthal. Ausgleichsbecken KLL	1967	2007	51	69.9	0.475

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
2355	Landwasser - Davos. Frauenkirch	1967	2007	51	32.9	0.179
2356	Riale di Calneggia - Cavergno	1967	2007	51	44.1	1.847
2364	Ticino- Piotta	1925	2007	93	60.1	0.378
2366	Poschiavino - La Rösa	1970	2007	47	6.2	0.443
2368	Maggia - Locarno. Solduno	1970	2007	42	1386.5	1.496
2371	Orbe - Le Chenit. Frontière	1971	2007	47	8.5	0.184
2372	Linth - Mollis. Linthbrücke	1914	2007	104	197.8	0.330
2378	Orbe - Orbe. Le Chalet	1906	2007	112	93.9	0.274
2384	Muota - Ingenbohl	1917	2007	101	173.5	0.547
2387	Hinterrhein - Fürstenau	1974	2007	44	382.3	0.242
2403	Inn - Cinuos-chel	1974	2007	43	124.2	0.169
2409	Emme - Eggiwil. Heidbüel	1975	2007	43	115.5	0.932
2418	Julia - Tiefencastel	1977	2007	41	50.2	0.155
2419	Rhone a Reckingen	1903	2007	94	80.0	0.374
2420	Moesa - Lumino Sassello	1913	2007	93	362.1	0.767
2426	Seez - Mels	1966	2007	52	39.0	0.368
2430	Rein da Sumvitg - Sumvitg. Encardens	1932	2007	83	29.3	1.343
2436	Chli Schliere - Alpnach. Chilch Erli	1979	2007	39	28.5	1.317
2457	Aare - Ringgenberg. Goldswil	1980	2007	37	181.8	0.160
2468	Sitter - St. Gallen. Bruggen / Au	1981	2007	37	248.8	0.953
2469	Kander - Hondrich	1903	2007	113	126.9	0.258
2473	Rhein - Diepoldsau. Rietbrücke	1919	2007	99	1357.6	0.216
2474	Calancasca - Buseno	1952	2007	64	157.9	1.305
2475	Maggia - Bignasco. Ponte Nuovo	1982	2007	36	318.1	1.007
2480	Areuse - Boudry	1904	2007	114	99.7	0.264
2481	Engelberger Aa - Buochs. Flugplatz	1916	2007	102	78.2	0.343
2486	Veveyse - Vevey. Copet	1984	2007	34	55.2	0.856
2487	Kleine Emme - Werthenstein. Chappelboden	1985	2007	33	212.8	0.684
2488	Simme - Latterbach	1986	2007	32	149.1	0.265
2491	Schächen - Bürglen. Galgenwäldli	1930	2007	87	36.0	0.334
2493	Promenthouse - Gland. Route Suisse	1986	2007	32	20.1	0.167
2494	Ticino - Polleggio Campagna	1987	2007	31	316.4	0.713
2498	Glenner - Castrisch	1989	2007	29	149.7	0.393
2602	Rhein - Domat/Ems	1899	2007	116	948.2	0.294
2603	Ilfis - Langnau	1990	2007	28	144.5	0.773
2604	Biber - Biberbrugg	1990	2007	28	30.2	0.948

Codice	Bacino	Anno inizio	Anno fine	N° Colmi	Portata media al colmo (m^3/s)	Portata specifica media al colmo ($m^3/s/km^2$)
2605	Verzasca lavertezzo Campioi	1990	2007	28	396.3	2.142
2606	Rhone a Genève	1924	2007	94	566.8	0.071
2607	Goneri - Oberwald	1991	2007	27	36.0	0.936
2609	Alp - Einsiedeln	1992	2007	26	83.1	1.780
2612	Riale di Pincascia - Lavertezzo	1993	2007	25	105.0	2.359
2617	Rom - Müstair	1914	2007	32	14.1	0.110
2634	Kleine Emme - Emmen	1936	2007	82	284.2	0.594
2635	Grossbach - Einsiedeln. Gross	1972	2007	46	16.8	1.882

ALLEGATO B

Nella prima sezione si riportano i valori di altitudine media e di area dei bacini corrispondenti alle stazioni appartenenti al Gruppo a e c del database di Sauquet. Nella seconda sezione, per ciascun bacino costituente il campione francese, vengono riportate le caratteristiche morfologiche, le coordinate spaziali della sezione di chiusura e lunghezza serie storica di portate al colmo di piena.

B.1 GRUPPO A e GRUPPO C del database di Sauquet

Tabella B.1: Stazioni di misura localizzate in aree Alpine e comprese nel dataset ERC (Gruppo a).

Codice stazione	Corso d'acqua e Stazione	Z_{mean} (m s.l.m.)	Area (km^2)
V0144010	Le Giffre a Taninges (Pressy)	1514	325
V0222010	L' Arve a Arthaz-Pont-Notre-Dame	1527	1664
V1015010	La Valserine a Lelex (Niaizet)	1263	85
V1015030	La Valserine a Chezery -Forens	1218	119
V1214010	Le Fier a Dingy-St-Clair	1264	222
V1504010	Le Guiers Mort a St-Laurent-Du-Pont	1207	89
V1630010	Le Rhone a Sault-Brenaz	1276	15380
V2024010	La Saine a Foncine-Le-Bas	1085	95
V2414010	La Bienne a St-Claude (Chenavier)	1025	216
V4214010	La Drome a Luc-En-Diois	1025	194
V4225010	Le Bez a Chatillon-En-Diois	1262	227
W0110010	L' Isere a Moutiers	2086	907
W0224010	Le Doron De Bozel a La Perriere (Vignotan)	2230	330
W2314010	La Bonne a Entraigues (Pont Battant)	1977	143
W2335210	La Roizonne a La Valette (La Rochette)	1804	71.6
W2714010	La Romanche a Mizoón (Chambon Amont)	2405	220
X0010010	La Durance a Val-Des-Pres (La Vachette)	2201	203
X0310010	La Durance a Embrun (La Clapiere)	2097	2170
X0434010	L' Ubaye a Barcelonnette (Abattoir)	2206	549
X0454010	L' Ubaye au Lauzet-Ubaye (Roche Rousse)	2072	946
X1034020	Le Buech a Serres (Les Chambons)	1236	723
X1424010	L' Asse a Beynes (Chabrieres)	1126	375
X2114010	L' Issole a St-Andre-Les-Alpes (Mourefrey)	1479	137
X2202010	Le Verdon a Demandolx (Castillon)	1649	655
Y6204020	La Tinee a St -Etienne-De-Tinee	2119	167
Y6432010	Le Var a Malaussene (La Mescla)	1471	1830
Y6624010	La Roya a Breil-Sur-Roya	1454	461

Tabella B.2: Stazioni di misura localizzate in aree Alpine ma non comprese nel dataset ERC (Gruppo c).

Codice stazione	Corso d'acqua e Stazione	Z_{mean} (m s.l.m.)	Area (km^2)
V0005410	L' Arveyron a Bois Du Bouchet	2956	78
V0325010	La Dranse De Morzine a Seytroux	1438	170
V0334010	La Dranse a Reyvroz	1363	495
V1000010	Le Rhone a Pougny	1547	10300
V1015020	La Valserine a Chezery -Forens (Les Hirondelles)	1255	105
V1020010	Le Rhone a Injoux-Genissiat (Bognes)	1510	10900
V1235610	L' Eau Morte a Doussard	1086	92.5
V1255010	Le Cheran a Alleves (La Charniaz)	1169	249
V1515010	Le Guiers Vif a St-Christophe-Sur-Guiers	1206	114
V2414020	La Bienne a Tancua	1094	141
V3000010	Le Rhone a Caluire-Et-Cuire (St-Clair)	1094	20300
W0300010	L' Isere a Aigue Blanche	2092	1582
W1024010	L' Arc a Bramans	2528	635
W1034010	L' Arc a St-Michel-De-Maurienne (La Saussaz)	2432	939
W1100010	L' Isere a Chamousset (Pont-RoyAl)	1880	4650
W2215020	La Souloise a St-Disdier (Pont De La Baume)	1640	149
W2222010	Le Drac AaCorps (Le Sautet)	1736	990
W2755010	L' Eau D'olle a Allemond (La Perniere)	2006	172
W2764010	La Romanche au Bourg-D'oisans (Champeau)	2140	1000
W3015010	La Vence a Proveysieux (Pont De L'oulle)	1072	63.5
W3200010	L' Isere a St-Gervais (Le Port)	1595	9910
W3315010	Le Meaudret a Meaudre	1270	74
W3344010	La Bourne a St -Just -De-Claix (Pont De M. Anne)	1123	787
X0100010	La Durance a Briancon (Aval)	2175	548
X0500010	La Durance a Espinasses (Serre-Poncon)	2017	3580
X1025020	Le Petit Buëch a Veynes	1307	318
X1130010	La Durance a Oraison (Escale)	1552	6760
X2414010	L' Artuby a La Martre (Plan D'anelle)	1169	107
X2414020	L' Artuby a Comps-Sur-Artuby (Le Colombier)	1149	123
X2414030	L' Artuby a La Bastide (Taulane)	1188	91
X2602010	Le Verdon a Ste-Croix-De-Verdon	1590	1247
X2812010	Le Verdon a Vinon-Sur-Verdon (Vinon- Greoux)	1820	1085
X3000010	La Durance a St -P Aul-Les-Durance (Jouques-Cadarache)	1303	11700
Y5615010	Le Loup a Tourrettes-Sur-Loup (Les Vallettes)	1007	206
Y5615020	Le Loup a Gourdon (Loup-Amont)	1072	140
Y6234010	La Tinee a La Tour (Pont De La Lune)	1733	705
Y6442020	Le Var a Carros (Pont De La Manda)	1344	2790

B.2 FRANCIA

Codice	Bacino	Lat	Lon	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	Anno inizio	Anno fine
V0144010	Le Giffre a Taninges (Pressy)	46.114	6.552	1514	615	325	1948	2016
V0222010	L' Arve a Arthaz-Pont-Notre-Dame	46.151	6.271	1527	410	1664	1961	2017
V0334010	La Dranse a Reyvroz	46.3261	6.5862	1363	520	495	1906	2019
V1000010	Le Rhone a Pougny	46.1440	5.9637	1547	335	10300	1925	2017
V1015010	La Valserine a Lelex (Niaizet)	46.283	5.922	1263	846	85	1966	2019
V1015030	La Valserine a Chezery -Forens	46.22	5.865	1218	572	119	1960	2019
V1020010	Le Rhone a Injoux-Genissiat (Bognes)	46.0377	5.8086	1510	266	10900	1920	2017
V1214010	Le Fier a Dingy-St-Clair	45.905	6.207	1264	514	222	1906	2019
V1235610	L' Eau Morte a Doussard	45.7877	6.2315	1086	452	92.5	1976	2019
V1255010	Le Cheran a Alleves (La Charniaz)	45.7206	6.1034	1169	575	249	1951	2019
V1504010	Le Guiers Mort a St-Laurent-Du-Pont	45.386	5.737	1207	413	89	1970	2008
V1515010	Le Guiers Vif a St-Christophe-Sur-Guiers	45.4423	5.7826	1206	405	114	1971	2019
V1630010	Le Rhone a Sault-Brenaz	45.859	5.401	1276	198	15380	1920	1992
V2024010	La Saine a Foncine-Le-Bas	46.64	6.03	1085	787	95	1956	2019
V2414010	La Bienne a St-Claude (Chenavier)	46.417	5.868	1025	423	216	1957	2009
V4214010	La Drome a Luc-En-Diois	44.62	5.44	1025	536	194	1907	2019
V4225010	Le Bez a Chatillon-En-Diois	44.693	5.491	1262	558	227	1963	2019
W0110010	L' Isere a Moutiers	45.48	6.53	2086	474.7	907	1903	2019
W0224010	Le Doron De Bozel a La Perriere (Vignotan)	45.45	6.58	2230	630	330	1948	2002
W0300010	L' Isere a Aigue Blanche	45.4964	6.5130	2092	470	1582	1955	2015
W1024010	L' Arc a Bramans	45.2242	6.7645	2528	1190	635	1970	2017
W1034010	L' Arc a St-Michel-De-Maurienne (La Saussaz)	45.2084	6.5146	2432	818	939	1948	2016
W1100010	L' Isere a Chamousset (Pont-Roy Al)	45.5627	6.1994	1880	285	4650	1969	2009
W2222010	Le Drac a Corps (Le Sautet)	44.8176	5.9098	1736	671	990	1970	1999
W2314010	La Bonne a Entraigues (Pont Battant)	44.9	5.945	1977	770	143	1906	2019
W2335210	La Roizonne a La Valette (La Rochette)	44.95	5.87	1804	927.9	71.6	1920	2019
W2714010	La Romanche a Mizoón (Chambon Amont)	45.038	6.184	2405	1057	220	1948	2017
W2755010	L' Eau D'olle a Allemond (La Perniere)	45.1294	6.0198	2006	713	172	1951	2017
W2764010	La Romanche au Bourg-D'oisans (Champeau)	45.1180	5.9769	2140	701	1000	1951	2014
W3200010	L' Isere a St-Gervais (Le Port)	45.2081	5.4669	1595	174	9910	1969	2017
W3315010	Le Meaudret a Meaudre	45.1123	5.5311	1270	957	74	1974	2019

Codice	Bacino	Lat	Lon	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	Area (km^2)	Anno inizio	Anno fine
W3344010	La Bourne a St -Just -De-Claix (P. De M Anne)	45.0630	5.2808	1123	164	787	1970	2017
X0010010	La Durance s Val-Des-Pres (La Vachette)	44.917	6.675	2201	1351	203	1976	2019
X0100010	La Durance a Briancon (a Val)	44.8928	6.6298	2175	1187	548	1955	2017
X0310010	La Durance a Embrun (La Clapiere)	44.552	6.486	2097	787	2170	1960	2019
X0434010	L' Ubaye a Barcelonnette (Abattoir)	44.384	6.652	2206	1132	549	1904	2019
X0454010	L' Ubaye au Lauzet-Ubaye (Roche Rousse)	44.45	6.401	2072	790	946	1960	2019
X0500010	La Durance a Espinasses (Serre-Poncon)	44.4704	6.2804	2017	652	3580	1948	2017
X1034020	Le Buech a Serres (Les Chambons)	44.443	5.714	1236	662	723	1969	2014
X1130010	La Durance a Oraison (Escale)	44.0865	6.0126	1552	415	6760	1973	2017
X1424010	L' Asse a Beynes (Chabrieres)	44.016	6.253	1126	605	375	1953	2017
X2114010	L' Issole a St-Andre-Les-Alpes (Mourefrey)	43.995	6.503	1479	931	137	1908	2019
X2202010	Le Verdon a Demandolx (Castillon)	43.879	6.539	1649	843	655	1948	2017
X2414030	L' Artuby a La Bastide (T Aulane)	43.7638	6.6222	1188	1008	91	1978	2019
X2812010	Le Verdon a Vinon-Sur-Verdon (V.-Greoux)	43.7264	5.8284	1820	314	1085	1969	2015
X3000010	La Durance a St -Paul-Les-Durance	43.7198	5.7397	1303	247	11700	1918	2016
Y5615010	Le Loup a Tourrettes-Sur-Loup (Les Vallettes)	43.6977	7.0063	1007	124	206	1972	2019
Y5615020	Le Loup a Gourdon (Loup-Amont)	43.7206	6.9782	1072	433	140	1951	2002
Y6204020	La Tinee a St -Etienne-De-Tinee	44.252	6.934	2119	1110	167	1950	1990
Y6432010	Le Var a Malaussene (La Mescla)	43.908	7.196	1471	170	1830	1948	2016
Y6442020	Le Var a Carros (Pont De La Manda)	43.7642	7.2038	1344	60	2790	1975	2014
Y6624010	La Roya a Breil-Sur-Roya	43.937	7.515	1454	211	461	1969	2017

ALLEGATO C

Si riportano, per i 428 bacini che compongono l'arco alpino, il valore dello stimatore m, della percentuale (incremento o riduzione) per decennio, della statistica del test di Mann-Kendall Z_{MK} e del *p-value* associato a tale statistica. A ciascun codice bacino è stato aggiunto un prefisso riconoscitivo basato sulla nazione di appartenenza.

Codice	Sen's Slope (m)	% of mean /decade	Z_{MK}	*p-value*
FRV0144010	0.000211	0.55	0.24	0.812
FRV0222010	-0.000944	-4.92	-2.18	0.030
FRV0334010	-0.001374	-5.34	-2.49	0.013
FRV1000010	-0.000064	-0.81	-1.22	0.221
FRV1015010	-0.001307	-6.31	-1.99	0.046
FRV1015030	-0.002409	-9.16	-3.28	0.001
FRV1020010	-0.000085	-0.98	-1.24	0.215
FRV1214010	0.000097	0.22	0.20	0.840
FRV1235610	-0.000959	-4.62	-0.94	0.347
FRV1255010	-0.000758	-3.01	-1.55	0.122
FRV1504010	0.004597	10.13	2.02	0.043
FRV1515010	0.001360	3.50	1.07	0.284
FRV1630010	0.000075	0.86	0.73	0.463
FRV2024010	-0.000151	-0.39	-0.14	0.889
FRV2414010	-0.003550	-6.89	-2.53	0.011
FRV4214010	-0.000656	-4.05	-2.69	0.007
FRV4225010	-0.000088	-0.54	-0.16	0.874
FRW0110010	-0.000562	-5.65	-5.02	0.000
FRW0224010	0.001212	9.68	4.32	0.000
FRW0300010	0.000000	0.00	0.02	0.985
FRW1024010	0.000583	6.26	1.70	0.090
FRW1034010	-0.000764	-6.19	-2.74	0.006
FRW1100010	-0.000632	-6.72	-1.34	0.180
FRW2222010	0.001010	5.47	0.58	0.563
FRW2314010	-0.000096	-0.67	-0.50	0.616
FRW2335210	-0.000389	-2.13	-1.68	0.094
FRW2714010	-0.000812	-5.35	-2.82	0.005
FRW2755010	-0.001438	-6.86	-3.24	0.001
FRW2764010	-0.001250	-8.64	-3.63	0.000
FRW3200010	-0.000180	-2.15	-0.50	0.619
FRW3315010	0.000206	2.24	0.46	0.646

Codice	Sen's Slope (m)	% of mean /decade	Z_{MK}	*p-value*
FRW3344010	-0.000872	-3.61	-0.97	0.330
FRX0010010	-0.000968	-7.58	-1.95	0.051
FRX0100010	-0.000572	-4.90	-2.05	0.040
FRX0310010	-0.000370	-3.52	-1.81	0.071
FRX0434010	-0.000240	-2.05	-1.76	0.078
FRX0454010	-0.000323	-2.59	-1.04	0.298
FRX0500010	-0.000250	-2.36	-1.34	0.181
FRX1034020	0.000391	1.86	0.36	0.719
FRX1130010	-0.000563	-5.69	-0.98	0.327
FRX1424010	0.000000	0.00	-0.02	0.986
FRX2114010	-0.000209	-1.28	-0.84	0.401
FRX2202010	0.000395	2.31	0.76	0.449
FRX2414030	0.002314	9.22	1.34	0.179
FRX2812010	-0.000100	-0.88	-0.27	0.784
FRX3000010	-0.000316	-3.79	-2.41	0.016
FRY5615010	0.000561	2.23	0.45	0.656
FRY5615020	-0.001796	-7.72	-1.99	0.047
FRY6204020	0.000171	0.83	0.22	0.825
FRY6432010	-0.001713	-8.69	-2.59	0.010
FRY6442020	0.000000	0.00	0.00	1.000
FRY6624010	0.002530	9.98	1.47	0.143
AT200105	-0.000445	-0.77	-0.27	0.785
AT200147	-0.000217	-0.84	-0.33	0.744
AT200196	-0.000211	-0.95	-0.28	0.776
AT200204	0.008557	3.58	0.98	0.328
AT200246	0.000143	0.15	0.11	0.912
AT200253	0.002073	2.85	1.37	0.171
AT200261	0.004783	6.00	2.34	0.019
AT200287	0.000859	0.59	0.14	0.885
AT200360	0.001232	2.37	0.35	0.724
AT200378	0.005826	9.40	2.88	0.004

Codice	Sen's Slope (m)	% of mean /decade	ZMK	p-value
AT201012	0.004829	10.96	4.34	0.000
AT201053	0.003545	5.12	1.13	0.258
AT201087	0.000090	0.25	0.10	0.917
AT201111	0.002671	5.37	1.41	0.158
AT201293	-0.001105	-10.28	-3.31	0.001
AT201319	-0.000093	-0.85	0.00	1.000
AT201368	0.001278	3.31	1.47	0.142
AT201459	-0.000541	-4.59	-2.22	0.026
AT201525	-0.000479	-4.25	-2.46	0.014
AT201533	0.000880	5.83	1.48	0.140
AT201566	-0.001018	-6.04	-1.00	0.318
AT201574	0.000450	3.29	1.02	0.310
AT201624	0.000039	0.26	0.06	0.953
AT201657	-0.001861	-13.79	0.00	1.000
AT201681	0.000139	1.34	0.55	0.583
AT201723	-0.000858	-3.63	-0.98	0.329
AT201749	-0.000030	-0.15	-0.12	0.904
AT201780	-0.000676	-4.41	-1.14	0.255
AT201806	-0.000345	-3.21	-0.88	0.381
AT201822	0.004639	8.08	0.97	0.330
AT201863	0.002926	9.71	3.90	0.000
AT201913	0.002960	8.52	3.24	0.001
AT201921	0.002035	5.04	1.16	0.244
AT201939	0.003148	9.70	3.03	0.002
AT201947	0.004235	8.89	2.38	0.017
AT203034	0.004436	8.49	2.38	0.018
AT203042	0.004439	8.92	2.11	0.035
AT203075	-0.000499	-1.88	-1.21	0.225
AT203125	-0.000076	-0.46	-0.24	0.810
AT203141	0.000722	3.24	1.65	0.098
AT203166	0.000446	1.82	0.39	0.693
AT203174	0.000687	2.03	0.21	0.834
AT203208	0.003184	7.77	3.02	0.003
AT203224	0.002661	9.41	3.05	0.002
AT203232	-0.001896	-8.15	-3.03	0.002
AT203257	0.000719	4.15	1.76	0.079
AT203307	0.000896	1.40	0.49	0.625
AT203315	0.000763	1.67	0.43	0.666
AT203323	-0.000064	-0.41	-0.38	0.705
AT203463	0.001621	5.64	1.24	0.216
AT203471	0.000990	2.60	0.79	0.429

Codice	Sen's Slope (m)	% of mean /decade	ZMK	p-value
AT203505	0.002407	6.25	1.09	0.275
AT203711	0.002107	8.41	2.29	0.022
AT203760	0.001389	7.34	1.70	0.090
AT203778	-0.000355	-1.71	-0.37	0.714
AT203786	0.000444	2.70	0.54	0.588
AT204032	0.003494	24.93	1.16	0.246
AT205104	0.001172	2.90	0.83	0.407
AT205120	0.002752	4.60	1.60	0.109
AT205765	0.002777	4.82	2.11	0.035
AT205807	0.001956	4.79	1.28	0.199
AT205815	0.000861	1.95	0.43	0.666
AT205823	0.001818	4.35	1.38	0.169
AT210526	0.001165	4.84	2.25	0.024
AT210542	0.001115	2.19	0.85	0.393
AT210583	-0.000094	-0.22	-0.27	0.788
AT210625	0.000056	0.19	0.12	0.901
AT210641	0.000816	4.32	1.89	0.059
AT210773	-0.000990	-4.92	-0.81	0.417
AT210799	0.000159	1.17	0.48	0.635
AT210815	0.000070	0.63	0.34	0.731
AT210823	-0.000529	-3.96	-0.32	0.751
AT210849	0.000137	1.08	0.26	0.796
AT210864	0.002321	6.95	0.86	0.391
AT210880	0.013748	14.08	2.63	0.009
AT210898	0.000239	0.91	0.33	0.741
AT211102	0.000428	3.69	1.24	0.215
AT211110	-0.000896	-6.15	-1.19	0.236
AT211136	0.000389	3.79	0.79	0.429
AT211169	-0.000157	-1.58	-0.33	0.745
AT211185	0.000051	0.60	0.28	0.783
AT211193	0.000721	7.65	1.46	0.143
AT211227	0.001661	4.52	0.94	0.349
AT211243	0.000336	2.41	0.81	0.417
AT211268	0.001303	13.46	1.88	0.060
AT211292	0.000057	0.73	0.10	0.919
AT211383	0.001626	5.03	1.23	0.220
AT212027	0.000462	4.05	1.71	0.086
AT212068	0.004712	4.41	1.94	0.052
AT212076	0.003689	4.12	1.92	0.055
AT212092	0.001350	4.37	2.75	0.006
AT212126	0.001143	3.35	1.60	0.109

Codice	Sen's Slope (m)	% of mean /decade	ZMK	p-value
AT212167	-0.000469	-2.01	-1.19	0.234
AT212183	-0.000220	-0.71	-0.13	0.897
AT212316	-0.000378	-2.18	-0.77	0.440
AT212324	-0.000427	-2.44	-1.33	0.184
AT212357	-0.000349	-2.35	-1.53	0.126
AT212381	-0.000654	-1.91	-0.36	0.719
AT212431a	0.000112	0.67	0.11	0.912
AT212431	0.000617	6.04	0.54	0.592
AT212522	0.000129	2.52	0.41	0.683
AT212613	0.000300	1.04	0.53	0.596
AT212647	-0.000501	-1.42	-0.50	0.620
AT212670	0.001388	3.72	0.93	0.353
AT212704	0.002159	7.44	1.63	0.102
AT212753	-0.001109	-3.40	-1.07	0.286
AT212787	0.001299	4.13	1.51	0.132
AT212860	0.000114	1.00	0.35	0.725
AT212886	0.000297	3.35	1.17	0.242
AT212894	0.000294	4.07	1.05	0.292
AT212928	0.000338	5.25	1.25	0.213
AT212936	0.000405	6.60	2.60	0.009
AT213082	-0.000672	-5.77	-2.18	0.029
AT213090	0.000500	4.85	1.60	0.110
AT213157	0.000147	2.50	0.33	0.745
AT213199	-0.000347	-2.82	-0.68	0.495
AT230078	-0.000759	-6.59	-0.71	0.481
AT201574a	0.000745	4.23	1.62	0.106
AT203075a	-0.000176	-0.53	-0.27	0.788
ITA11001	0.009320	10.76	2.77	0.006
ITA11005	-0.000882	-4.08	-2.34	0.019
ITA11007	0.000873	1.22	0.45	0.653
ITA11008	-0.004515	-8.61	-2.29	0.022
ITA11011	0.024752	9.36	1.90	0.057
ITA11012	-0.003171	-10.43	-0.69	0.488
ITA11013	-0.001750	-2.65	-1.18	0.236
ITA11015	0.000726	0.33	0.14	0.892
ITA11016	-0.002200	-6.15	-1.38	0.168
ITA11017	-0.001900	-6.28	-0.87	0.383
ITA11018	-0.004163	-22.73	-1.15	0.250
ITA11019	0.000671	1.37	0.25	0.800
ITA11020	-0.000124	-0.51	-0.27	0.783
ITA11021	0.004728	5.53	1.22	0.221

Codice	Sen's Slope (m)	% of mean /decade	ZMK	p-value
ITA11022	0.001632	1.96	0.87	0.382
ITA11023	-0.003967	-18.38	-1.82	0.069
ITA11024	0.001596	3.64	1.22	0.223
ITA11025	-0.000702	-2.04	-0.73	0.463
ITA11026	-0.003827	-4.41	-1.47	0.142
ITA11027	-0.009027	-10.93	-2.03	0.042
ITA11029	-0.000194	-0.89	-0.45	0.649
ITA11030	-0.009588	-15.72	-0.47	0.640
ITA11031	-0.011780	-23.93	-0.34	0.732
ITA11040	-0.003004	-4.45	-0.77	0.441
ITA11050	0.018545	9.07	1.80	0.071
ITA11051	0.002241	13.17	0.81	0.421
ITA11052	-0.005407	-21.62	-1.90	0.057
ITA11053	-0.000856	-2.66	-0.38	0.705
ITA11054	0.000510	2.42	1.02	0.310
ITA11055	0.000016	0.17	0.09	0.927
ITA11056	0.007536	17.94	2.21	0.027
ITA11058	0.000046	0.21	0.00	1.000
ITA11059	-0.005973	-22.32	-2.15	0.031
ITA11074	-0.001192	-1.34	-0.50	0.617
ITA11075	0.074245	37.02	1.39	0.166
ITA11077	-0.001375	-7.77	-0.83	0.404
ITA11081	0.001727	6.31	0.96	0.337
ITA11091	-0.002233	-8.85	-0.44	0.661
ITA11093	-0.029333	-68.31	-1.43	0.152
ITA11094	0.010100	33.25	0.62	0.533
ITA11095	-0.005179	-39.26	-1.51	0.130
ITA11096	-0.000108	-0.72	-0.32	0.753
ITA11097	-0.006769	-7.32	-0.31	0.760
ITA11102	0.001871	10.87	1.57	0.117
ITA11103	0.005611	38.28	2.64	0.008
ITA11106	0.008519	37.28	0.79	0.428
ITA11117	0.000336	0.71	0.39	0.699
ITA11122	-0.003343	-2.36	-0.29	0.770
ITA11125	-0.020771	-44.83	-1.42	0.155
ITA11126	0.000000	0.00	0.00	1.000
ITA11129	-0.004117	-14.38	-0.36	0.721
ITA11130	-0.003545	-18.57	-0.77	0.443
ITA11135	-0.000341	-2.12	-0.21	0.836
ITA11141	0.000437	0.76	0.00	1.000
ITA11142	-0.071123	-53.76	-0.77	0.443

Codice	Sen's Slope (m)	% of mean /decade	ZMK	p-value
ITA11143	0.009674	18.53	1.37	0.171
ITA11144	0.003657	37.44	0.81	0.419
ITA11145	-0.001375	-12.43	-0.41	0.680
ITA11146	-0.000126	-0.84	-0.14	0.885
ITA11149	0.005140	13.41	0.55	0.586
ITA11150	0.001108	7.27	0.40	0.692
ITA11154	0.013425	20.75	0.39	0.696
ITA11156	-0.013125	-38.90	-0.54	0.592
ITA11157	0.002108	12.79	0.23	0.822
ITA11164	0.002711	8.17	1.60	0.110
ITA11166	0.020642	10.28	0.69	0.487
ITA11167	-0.007550	-24.11	-0.31	0.755
ITA11169	-0.002082	-0.94	-0.17	0.863
ITA11172	-0.010962	-6.58	-0.66	0.510
ITA11173	-0.011375	-14.49	0.00	1.000
ITA11176	-0.002567	-7.87	-2.78	0.005
ITA11177	-0.009839	-27.90	-0.99	0.321
ITA11178	0.005620	7.51	0.10	0.921
ITA11180	-0.003636	-5.26	0.00	1.000
ITA11184	0.000569	1.12	0.11	0.909
ITA11185	0.002667	4.44	2.25	0.025
ITA11186	-0.003533	-5.87	-1.43	0.152
ITA11187	0.001433	3.02	1.06	0.289
ITA11188	0.000429	1.55	0.68	0.497
ITA11189	-0.008738	-31.46	-0.55	0.582
ITA11194	0.003955	25.50	2.97	0.003
ITA11195	0.076171	69.46	2.30	0.021
ITA11196	0.002942	8.38	1.39	0.163
ITA11197	0.000835	4.35	0.33	0.743
ITA11198	0.000529	1.23	0.00	1.000
ITA12001	-0.018065	-31.15	-3.03	0.002
ITA12002	0.002061	6.29	0.51	0.607
ITA12003	-0.000404	-1.40	-0.45	0.653
ITA12006	0.000000	0.00	0.00	1.000
ITA12007	-0.010193	-19.53	-0.99	0.322
ITA12009	-0.000412	-4.51	-3.15	0.002
ITA12010	-0.001875	-6.79	-0.18	0.855
ITA12011	-0.000492	-3.98	-2.52	0.012
ITA12012	0.001512	4.47	1.20	0.232
ITA12013	0.000363	2.28	0.42	0.673
ITA12014	0.002511	17.46	5.26	0.000

Codice	Sen's Slope (m)	% of mean /decade	ZMK	p-value
ITA12015	-0.000146	-0.44	-0.23	0.819
ITA12016	0.000122	0.70	0.23	0.821
ITA12017	0.000647	6.58	4.33	0.000
ITA12018	0.001000	10.27	1.48	0.138
ITA12019	0.001072	7.97	2.37	0.018
ITA12020	0.000039	0.37	0.13	0.894
ITA12021	-0.000442	-6.31	-3.14	0.002
ITA12023	0.001600	4.84	0.18	0.861
ITA12024	0.004520	23.10	1.58	0.114
ITA12025	0.005440	18.74	2.15	0.031
ITA12027	0.000235	0.94	0.39	0.700
ITA12030	0.001418	9.75	0.87	0.386
ITA12031	0.040192	51.91	1.65	0.099
ITA12032	-0.000599	-2.25	-0.70	0.483
ITA12033	-0.001263	-9.95	-0.97	0.332
ITA12034	-0.000061	-0.35	-0.30	0.765
ITA12036	-0.000744	-8.99	-1.60	0.111
ITA12038	0.004475	21.37	2.22	0.027
ITA12044	-0.000696	-1.20	-0.30	0.767
ITA12045	0.000000	0.00	0.07	0.944
ITA12046	-0.000543	-3.64	-0.24	0.812
ITA12047	-0.003340	-5.06	-0.20	0.843
ITA12050	-0.000070	-0.65	-0.54	0.590
ITA12051	-0.001080	-14.92	-1.81	0.070
ITA12052	0.013629	32.34	3.22	0.001
ITA12053	-0.000845	-3.40	-0.84	0.398
ITA12054	-0.000395	-0.39	-0.10	0.917
ITA12057	-0.000679	-1.63	-0.68	0.493
ITA12058	0.001686	6.21	1.92	0.055
ITA12059	0.000782	3.19	1.12	0.263
ITA12063	0.001800	8.71	2.68	0.007
ITA12069	-0.000102	-0.29	-0.08	0.938
ITA12070	-0.016445	-20.75	-0.49	0.625
ITA12071	-0.001661	-9.90	-0.70	0.483
ITA12072	-0.001572	-11.23	-1.58	0.114
ITA12073	0.029709	41.14	1.51	0.132
ITA12075	-0.002228	-4.96	-0.42	0.677
ITA12076	0.004120	14.67	2.25	0.024
ITA12078	0.010570	14.36	1.94	0.053
ITA12079	0.015081	14.66	1.30	0.194
ITA12081	-0.000509	-2.08	-0.54	0.587

Codice	Sen's Slope (m)	% of mean /decade	ZMK	p-value
ITA12083	-0.030422	-23.13	-1.58	0.115
ITA12084	-0.010463	-14.87	-0.78	0.434
ITA12085	0.001564	9.66	1.23	0.218
CH2135	0.000103	0.85	1.58	0.113
CH2019	-0.000405	-1.10	-1.17	0.244
CH2016	0.000255	3.56	3.83	0.000
CH2029	0.000187	3.02	5.27	0.000
CH2085	-0.000018	-0.13	-0.08	0.934
CH2063	0.000236	3.27	3.89	0.000
CH2457	0.000379	2.37	1.06	0.289
CH2030	0.000103	0.80	2.18	0.030
CH2205	0.000150	1.71	3.19	0.001
CH2141	0.000254	1.68	1.52	0.127
CH2232	0.012969	13.42	3.97	0.000
CH2609	-0.004663	-2.62	-0.33	0.741
CH2299	0.002328	2.13	1.19	0.234
CH2480	-0.000273	-1.04	-1.37	0.171
CH2290	-0.000384	-1.03	-1.02	0.308
CH2170	0.000007	0.03	0.03	0.977
CH2262	-0.001339	-2.95	-1.10	0.272
CH2604	0.009496	10.02	1.94	0.053
CH2333	-0.000497	-3.04	-1.19	0.233
CH2086	0.000105	0.22	0.17	0.864
CH2474	0.001303	1.00	0.39	0.698
CH2263	-0.002392	-10.16	-4.84	0.000
CH2436	0.005116	3.88	0.71	0.475
CH2327	0.000071	0.26	0.06	0.952
CH2053	-0.003170	-13.92	-9.68	0.000
CH2117	-0.001814	-19.72	-2.25	0.024
CH2409	0.013969	14.99	4.71	0.000
CH2481	0.001346	3.92	4.24	0.000
CH2498	-0.000896	-2.28	-0.28	0.778
CH2607	0.004499	4.81	0.50	0.617
CH2203	-0.000585	-2.04	-1.23	0.217
CH2635	-0.000303	-0.16	-0.19	0.850
CH2276	0.001597	3.99	1.43	0.154
CH2387	-0.000721	-2.97	-0.37	0.708
CH2603	0.000010	0.01	0.00	1.000
CH2403	-0.000217	-1.28	-0.48	0.630
CH2067	-0.000060	-0.40	-0.52	0.604
CH2105	0.000201	1.02	1.50	0.134

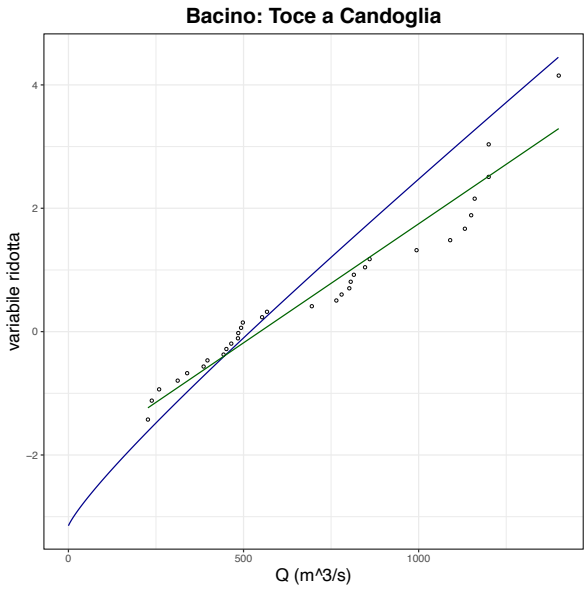
Codice	Sen's Slope (m)	% of mean /decade	ZMK	p-value
CH2265	-0.000776	-5.62	-2.43	0.015
CH2418	0.000056	0.37	0.03	0.973
CH2469	0.000409	1.58	2.41	0.016
CH2634	0.001060	1.78	1.70	0.090
CH2487	0.002419	3.54	0.82	0.412
CH2244	-0.000591	-1.13	-0.61	0.543
CH2150	-0.000160	-0.52	-0.45	0.649
CH2355	-0.000010	-0.06	-0.03	0.974
CH2243	0.000038	0.24	0.46	0.643
CH2099	0.000008	0.05	0.14	0.888
CH2352	0.002228	4.69	1.84	0.065
CH2372	-0.000008	-0.02	-0.04	0.969
CH2104	-0.000528	-3.42	-4.77	0.000
CH2269	0.000646	1.32	1.20	0.229
CH2109	0.001351	4.03	5.88	0.000
CH2475	0.002012	2.00	0.29	0.775
CH2368	-0.001134	-0.76	-0.13	0.897
CH2161	0.001098	2.40	3.56	0.000
CH2300	0.005823	3.67	1.65	0.100
CH2420	-0.003015	-3.93	-2.78	0.005
CH2384	0.001946	3.56	4.27	0.000
CH2371	-0.000551	-2.99	-0.79	0.430
CH2378	-0.000306	-1.12	-1.55	0.121
CH2319	-0.000509	-1.89	-0.70	0.486
CH2304	0.000144	1.01	0.39	0.697
CH2185	0.000109	0.58	0.33	0.741
CH2366	-0.000655	-1.48	-0.33	0.741
CH2078	-0.000265	-0.95	-0.54	0.587
CH2493	-0.002420	-14.47	-2.06	0.039
CH2430	-0.003094	-2.30	-1.44	0.150
CH2087	-0.003581	-5.88	-4.45	0.000
CH2152	-0.000030	-0.23	-0.35	0.730
CH2018	0.000409	2.80	4.91	0.000
CH2110	0.000397	2.38	4.06	0.000
CH2056	0.000056	0.15	0.14	0.891
CH2289	0.000136	1.68	3.18	0.001
CH2473	-0.000242	-1.12	-1.01	0.311
CH2602	-0.000600	-2.05	-2.49	0.013
CH2288	-0.000088	-1.47	-2.49	0.013
CH2143	0.000088	1.11	1.86	0.063
CH2091	0.000127	1.56	1.91	0.056

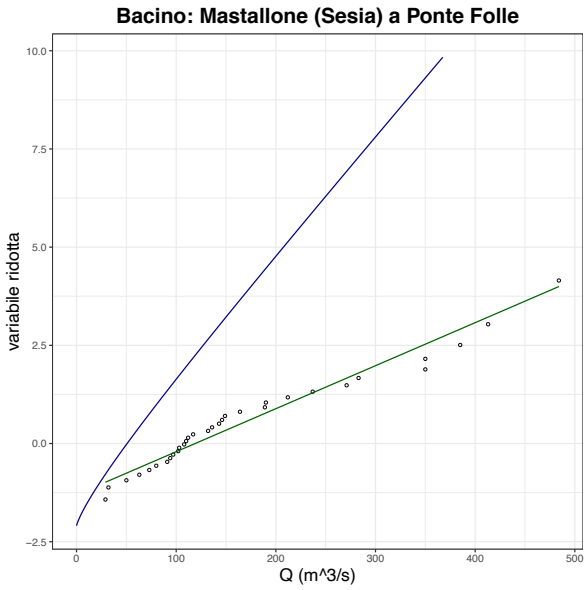
Codice	Sen's Slope (m)	% of mean /decade	Z_{MK}	*p-value*
CH2024	-0.000358	-2.51	-2.43	0.015
CH2346	0.000353	1.24	0.47	0.640
CH2174	0.000123	1.30	2.39	0.017
CH2606	0.000063	0.90	2.77	0.006
CH2268	0.001308	2.45	2.00	0.045
CH2419	-0.000095	-0.25	-0.28	0.779
CH2011	-0.000560	-3.51	-4.79	0.000
CH2356	0.010988	5.95	1.15	0.249
CH2612	0.002549	1.08	0.12	0.907
CH2347	-0.043112	-12.80	-2.65	0.008
CH2617	-0.000386	-3.49	-1.22	0.224
CH2256	0.002171	4.97	2.25	0.024
CH2215	-0.001023	-4.73	-2.09	0.037
CH2342	0.001877	4.97	1.40	0.162
CH2160	-0.000051	-0.15	-0.11	0.913
CH2119	-0.001715	-6.56	-5.31	0.000
CH2102	0.000026	0.23	0.33	0.744
CH2491	0.001435	4.30	3.15	0.002
CH2426	-0.000817	-2.22	-0.60	0.549
CH2179	0.001060	2.35	1.73	0.084
CH2176	-0.001645	-3.84	-2.49	0.013
CH2488	-0.000186	-0.70	-0.21	0.833
CH2219	0.002424	4.70	2.76	0.006
CH2151	0.000650	2.69	2.33	0.020
CH2112	0.002072	2.02	1.74	0.082
CH2468	0.003867	4.06	0.85	0.395
CH2239	0.000031	0.26	0.04	0.972
CH2307	0.000371	1.57	0.86	0.390
CH2303	0.003218	4.60	2.17	0.030
CH2020	-0.001393	-2.37	-2.01	0.044
CH2494	0.000641	0.90	0.03	0.973
CH2364	-0.002444	-6.47	-4.10	0.000
CH2605	-0.004282	-2.00	-0.30	0.767
CH2486	-0.005520	-6.45	-0.92	0.358
CH2351	-0.000928	-4.85	-4.76	0.000
CH2033	-0.001836	-3.71	-2.84	0.005
CH2200	0.000667	1.72	1.89	0.059
CH2187	-0.000039	-0.11	-0.14	0.892

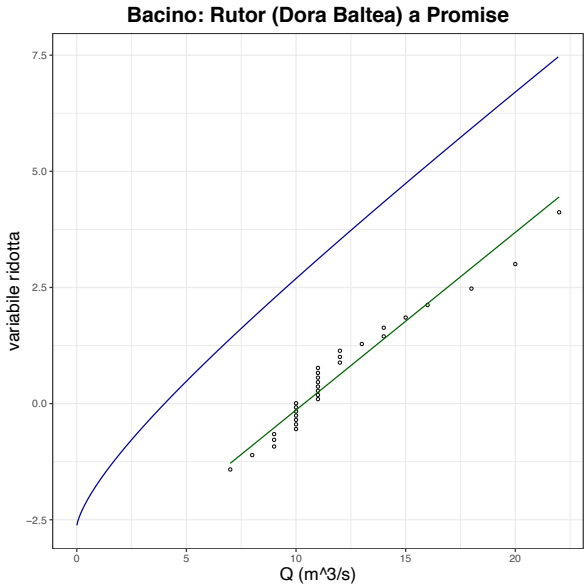
ALLEGATO D

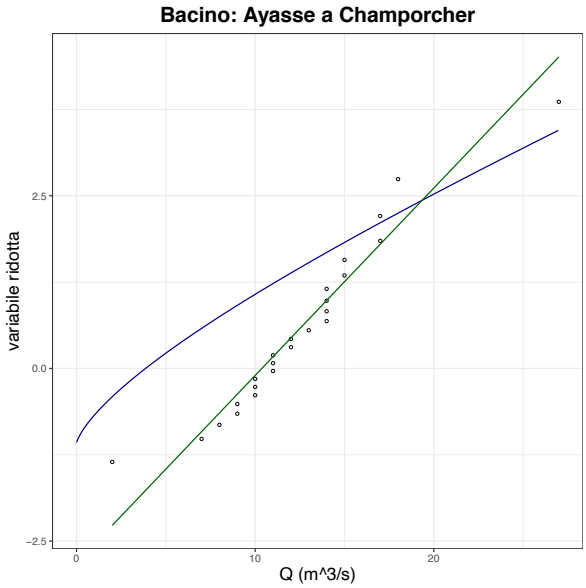
Grafici del confronto tra le curve di frequenza cumulate ottenute mediante l'applicazione del modello con i dati osservati, inseriti nel grafico seguendo la plotting position di Hazen.

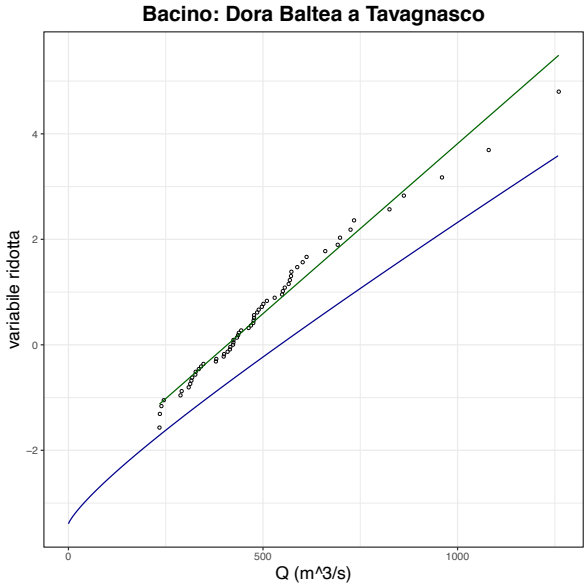
Legenda: in blu è rappresentata la curva di frequenza cumulata ottenuta con il metodo Hypsometric (C = 0.5), i cerchi neri sono le osservazioni delle portata massime giornaliere, mentre la curva verde identifica la distribuzione di Gumbel associata alle osservazioni.

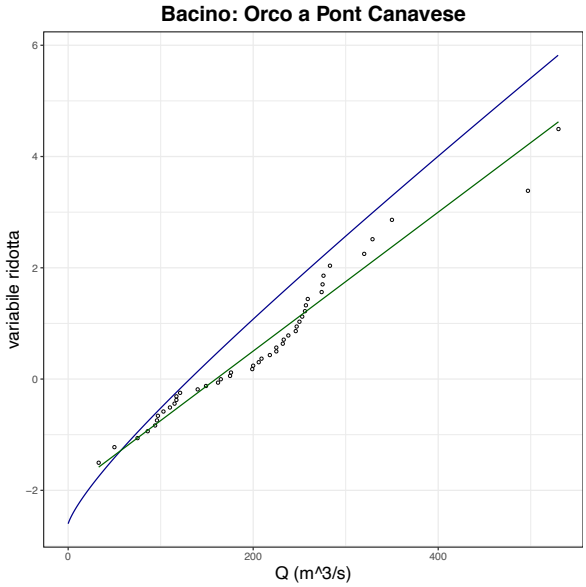


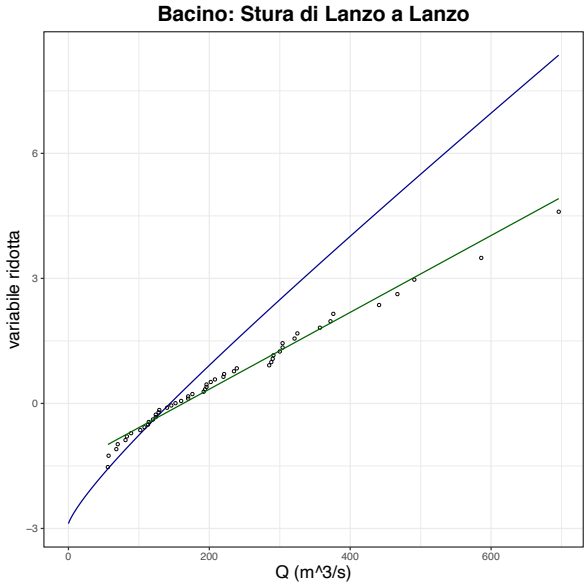


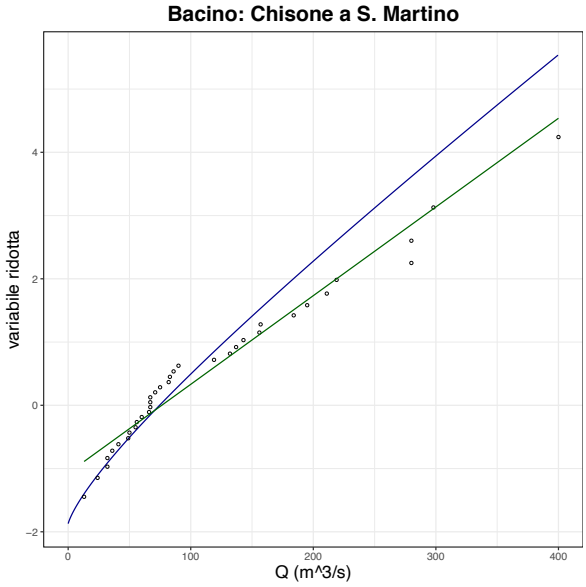


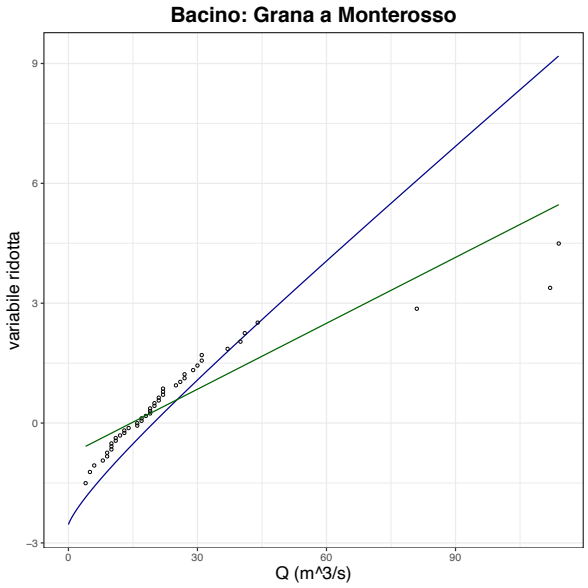


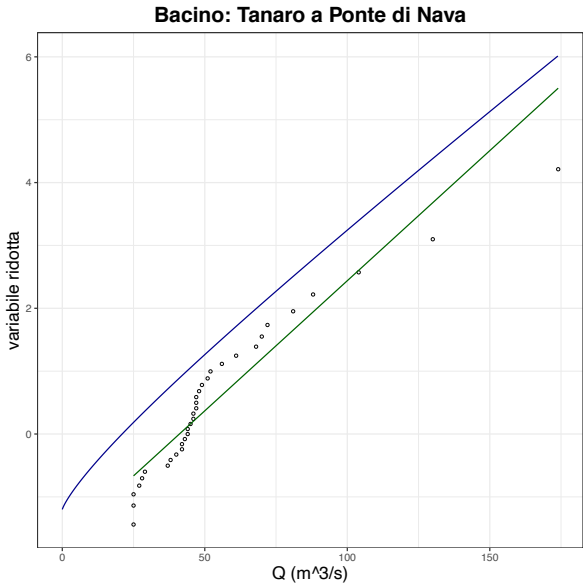

Bacino: Dora Baltea a Tavagnasco
variabile ridotta
Q (m^3/s)

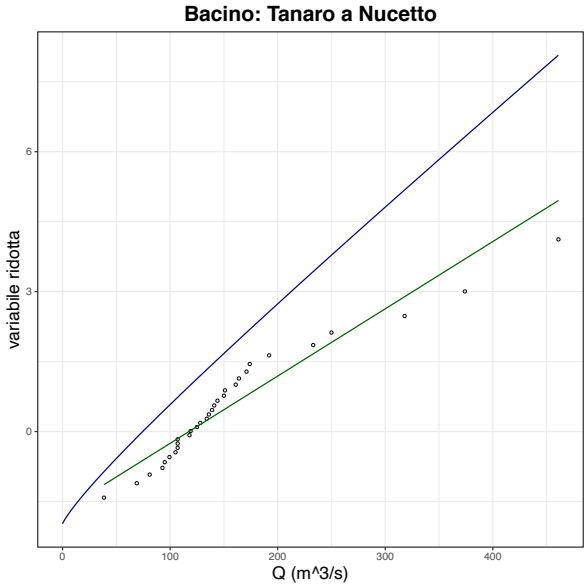

Bacino: Orco a Pont Canavese
variabile ridotta
Q (m^3/s)

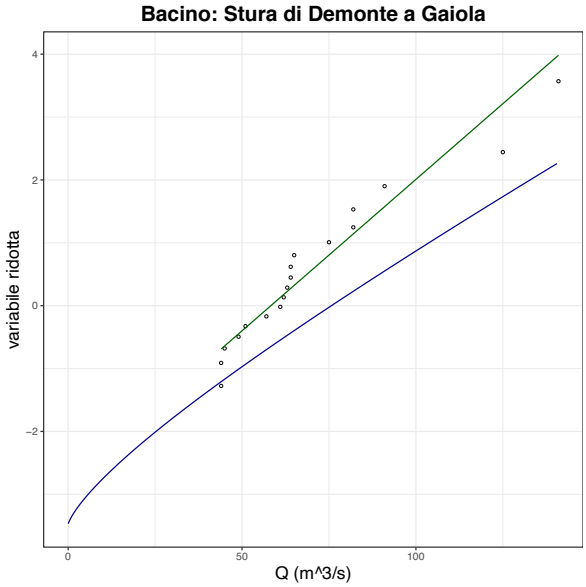

Bacino: Stura di Lanzo a Lanzo
variabile ridotta
Q (m^3/s)

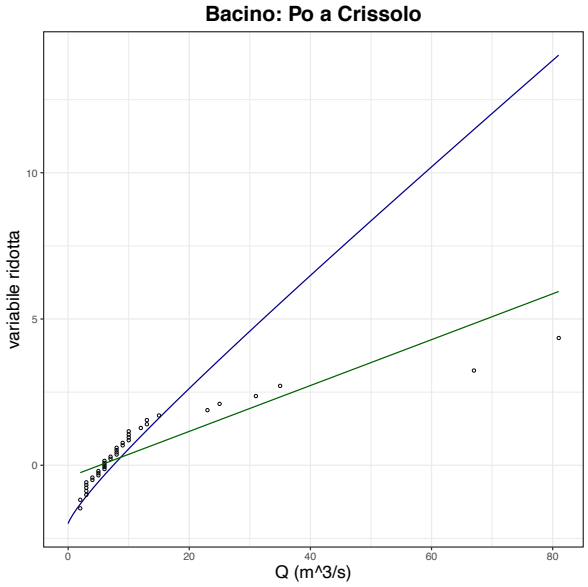

Bacino: Chisone a S. Martino
variabile ridotta
Q (m^3/s)

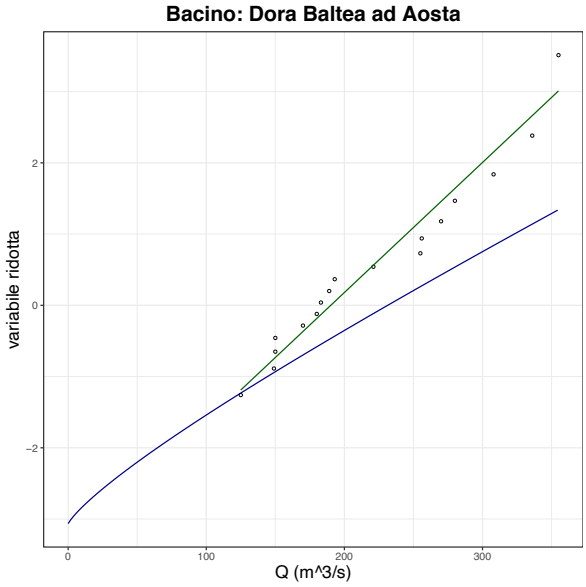

Bacino: Grana a Monterosso
variabile ridotta
Q (m^3/s)

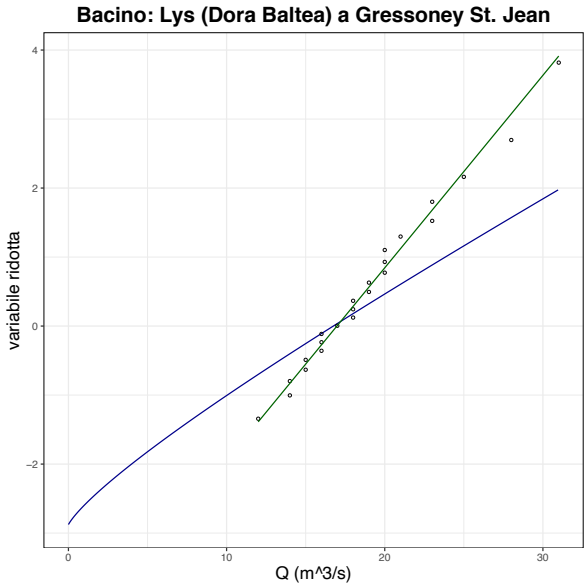

Bacino: Tanaro a Ponte di Nava
variabile ridotta
Q (m^3/s)

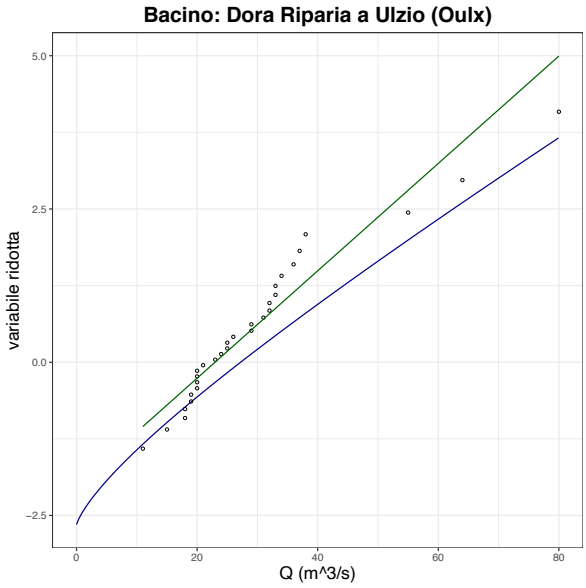

Bacino: Tanaro a Nucetto
variabile ridotta
Q (m^3/s)

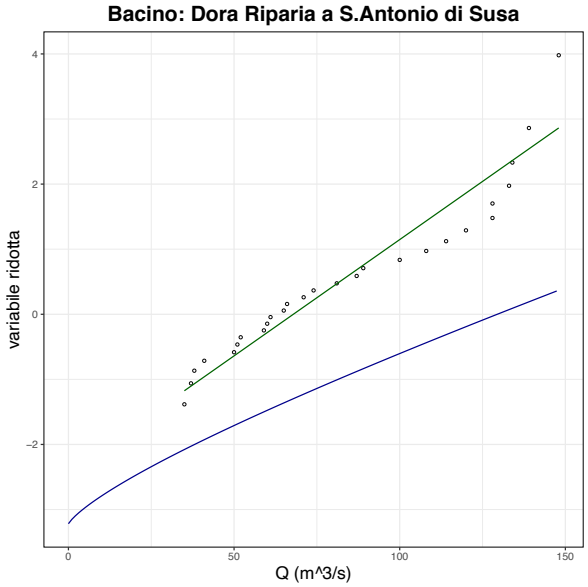

Bacino: Stura di Demonte a Gaiola
variabile ridotta
Q (m^3/s)

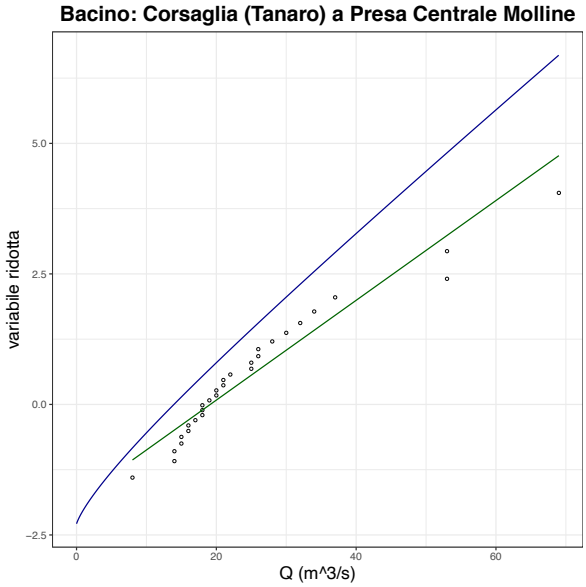

Bacino: Po a Crissolo
variabile ridotta
Q (m^3/s)

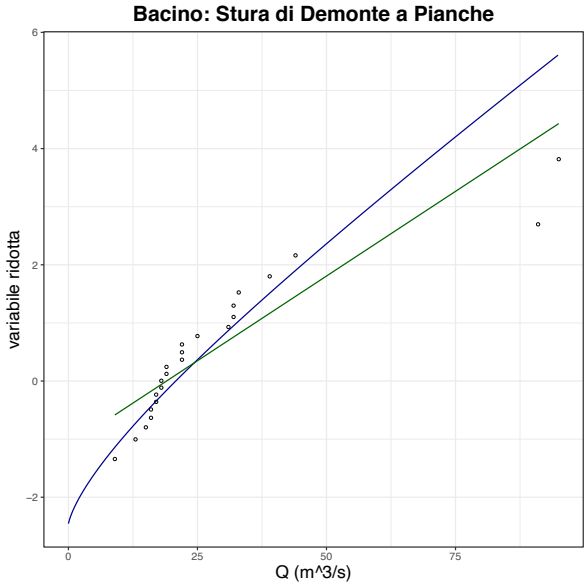

Bacino: Dora Baltea ad Aosta
variabile ridotta
Q (m^3/s)

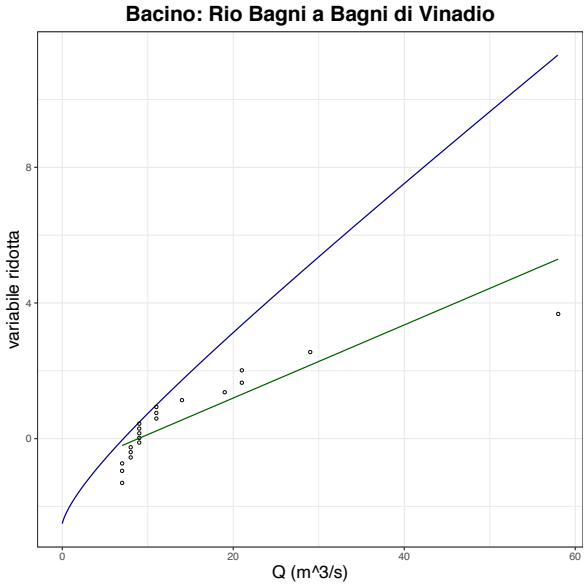

Bacino: Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean
variabile ridotta
Q (m^3/s)

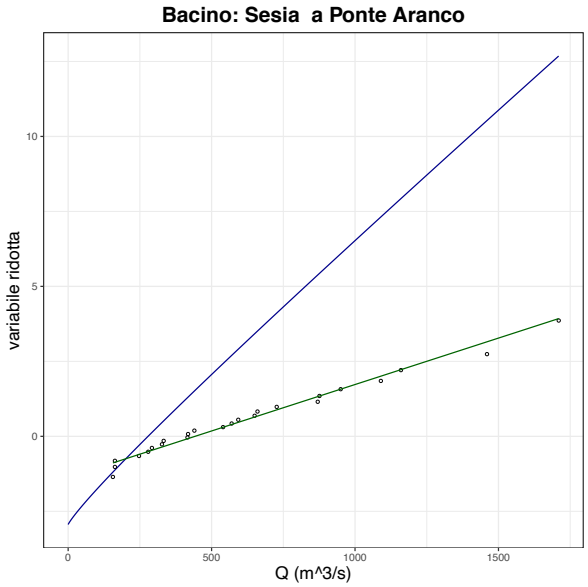

Bacino: Dora Riparia a Ulzio (Oulx)
variabile ridotta
Q (m^3/s)

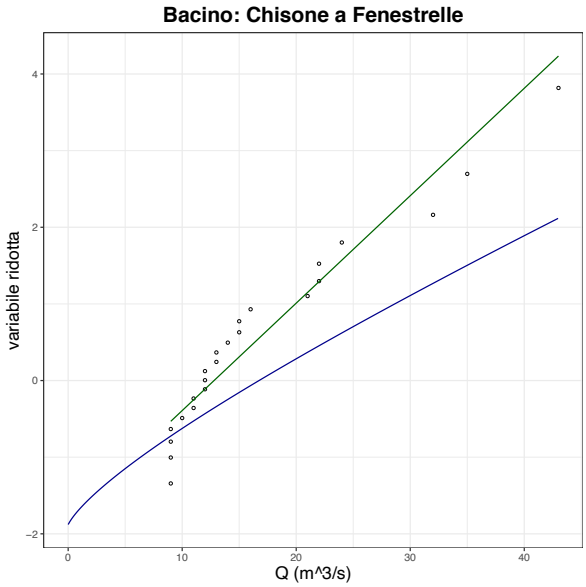

Bacino: Dora Riparia a S.Antonio di Susa
variabile ridotta
Q (m^3/s)


Bacino: Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline
variabile ridotta
Q (m^3/s)


Bacino: Stura di Demonte a Pianche
variabile ridotta
Q (m^3/s)


Bacino: Rio Bagni a Bagni di Vinadio
variabile ridotta
Q (m^3/s)

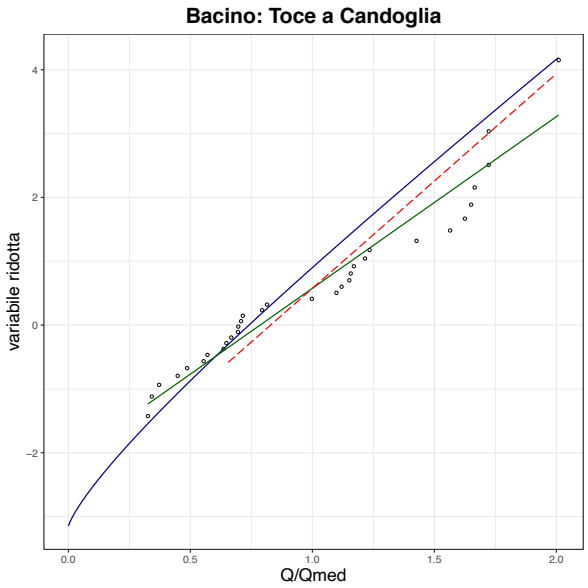

Bacino: Sesia a Ponte Aranco
variabile ridotta
Q (m^3/s)

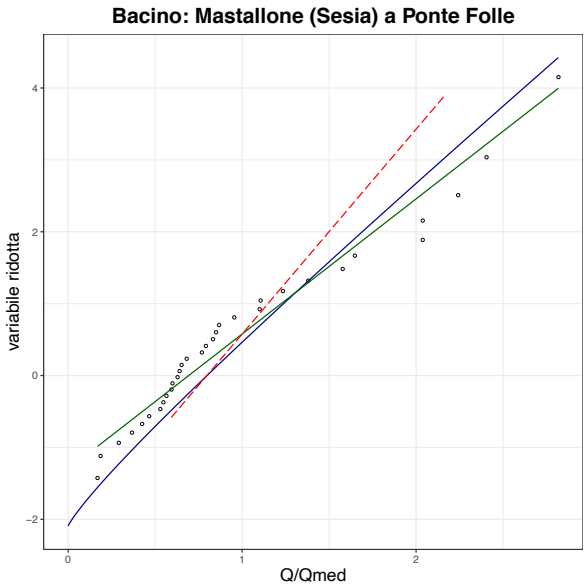

Bacino: Chisone a Fenestrelle
variabile ridotta
Q (m^3/s)

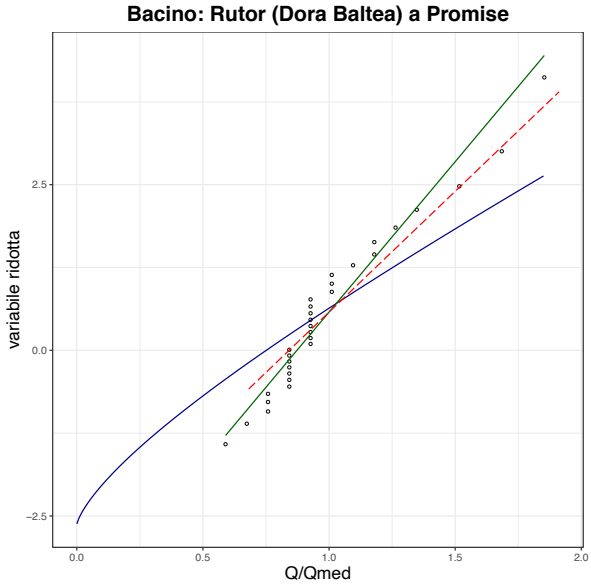
ALLEGATO E

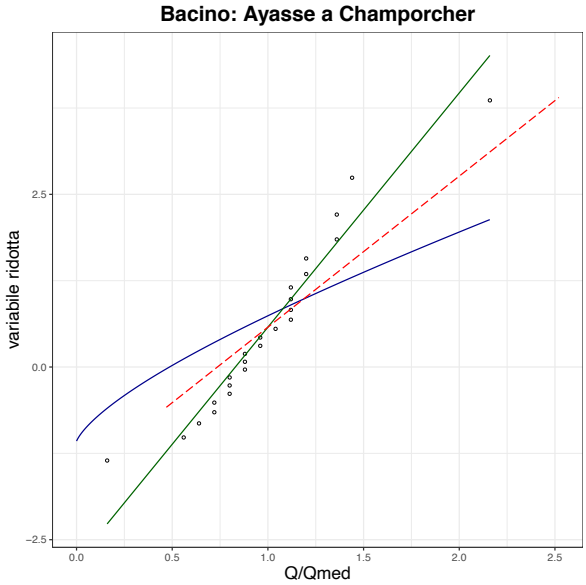
Grafici del confronto tra le curve di frequenza cumulate ottenute mediante l'applicazione del modello con i dati osservati, inseriti nel grafico seguendo la plotting position di Hazen. Sulle ascisse il valore di portata Q adimensionalizzato dividendolo per la portata media.

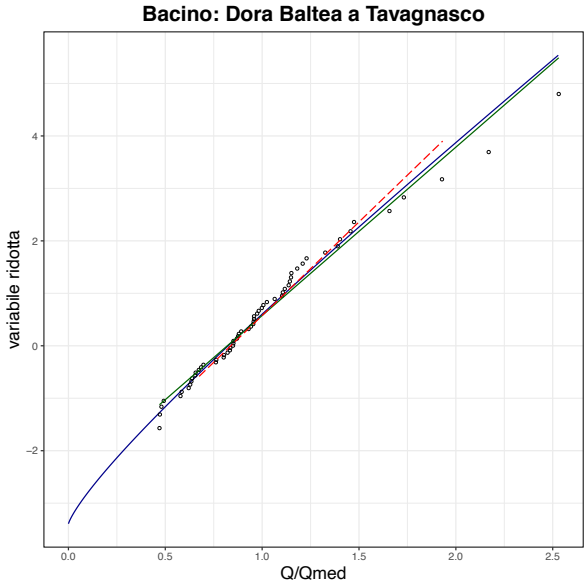
Legenda: in blu è rappresentata la curva di frequenza cumulata ottenuta con il metodo Hypsometric (C = 0.5), i cerchi neri sono le osservazioni delle portata massime giornaliere, mentre la curva verde identifica la distribuzione di Gumbel associata alle osservazioni.

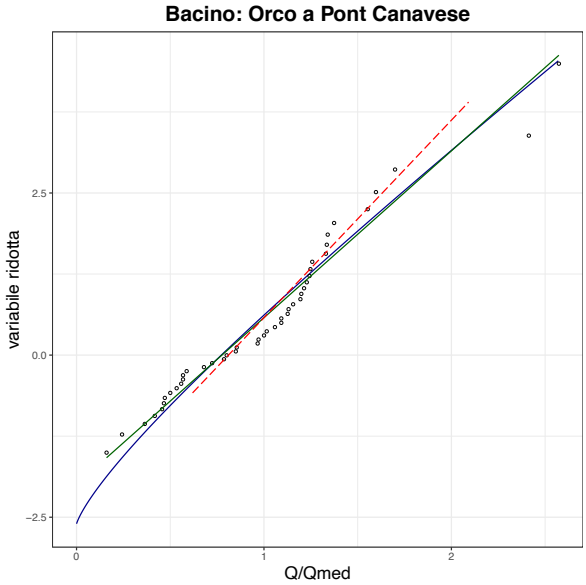


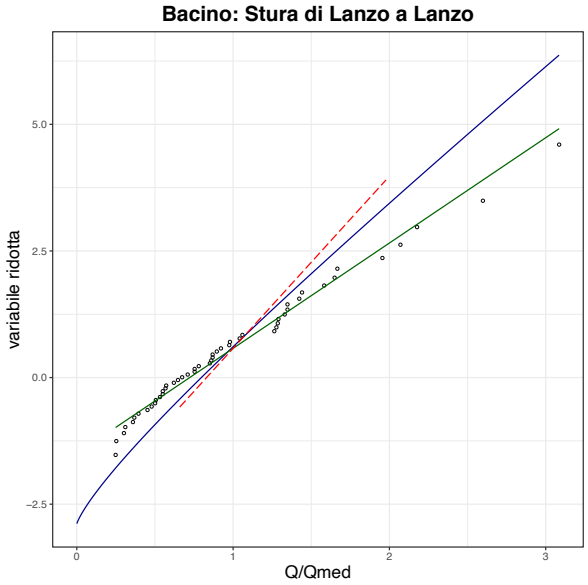


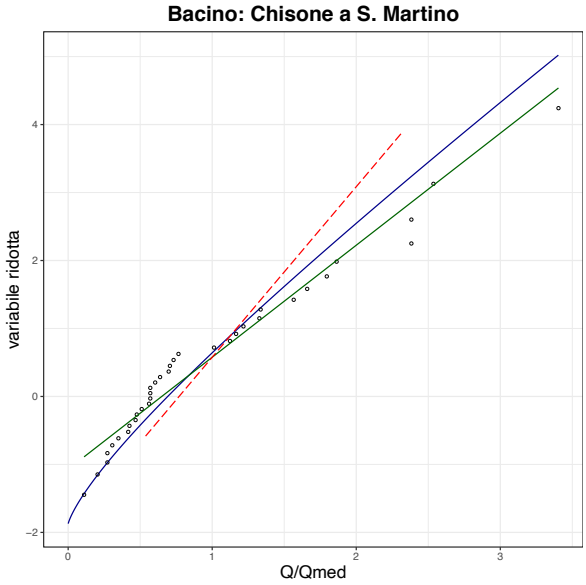


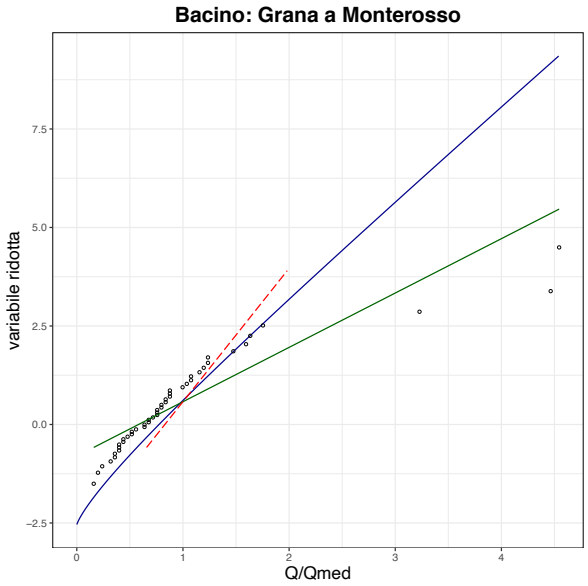


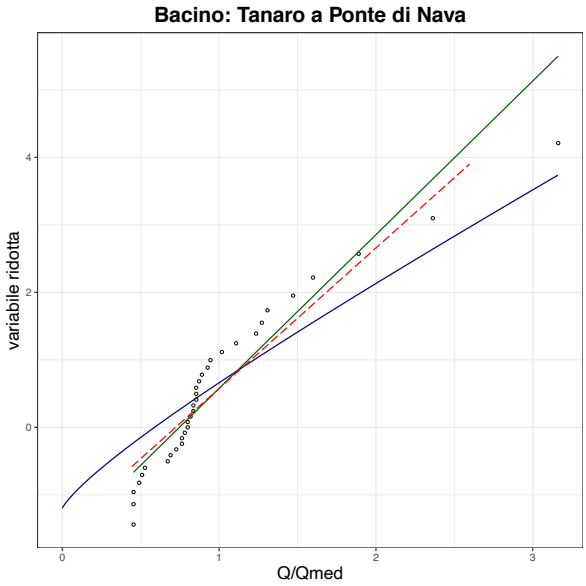

Bacino: Dora Baltea a Tavagnasco
variabile ridotta
Q/Qmed

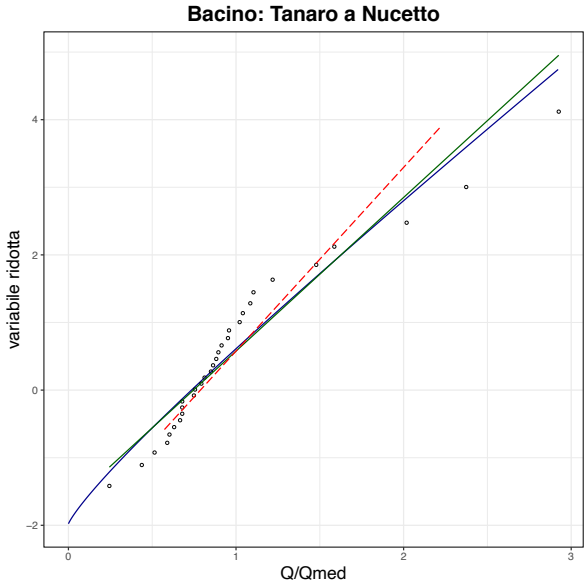

Bacino: Orco a Pont Canavese
variabile ridotta
Q/Qmed

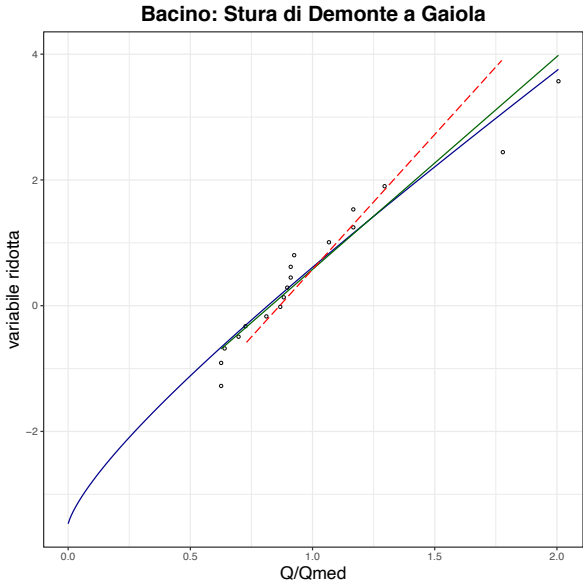

Bacino: Stura di Lanzo a Lanzo
variabile ridotta
Q/Qmed

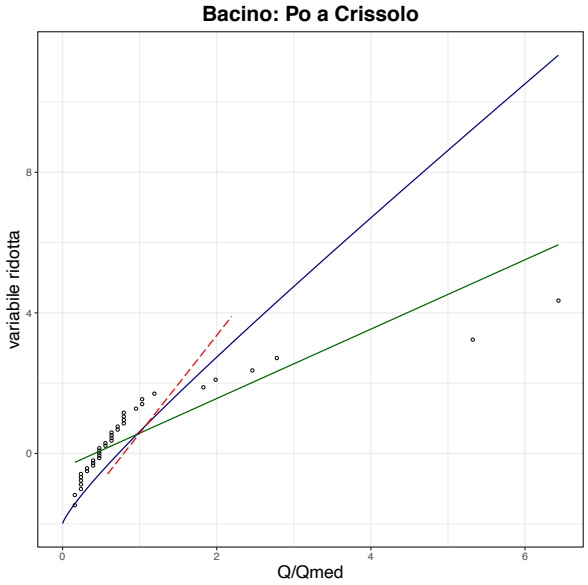

Bacino: Chisone a S. Martino
variabile ridotta
Q/Qmed

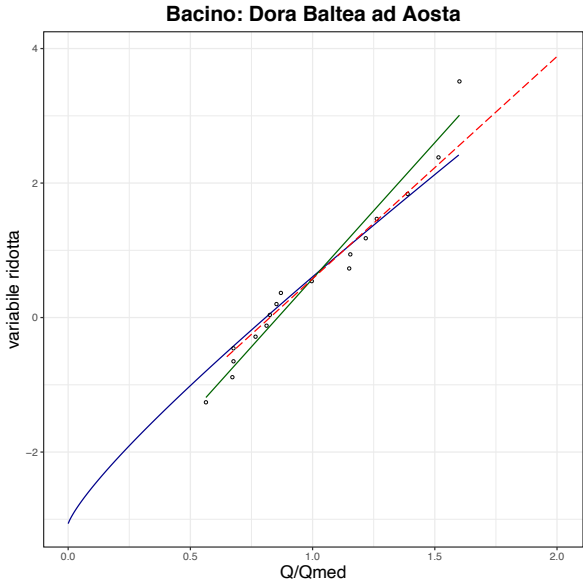

Bacino: Grana a Monterosso
variabile ridotta
Q/Qmed

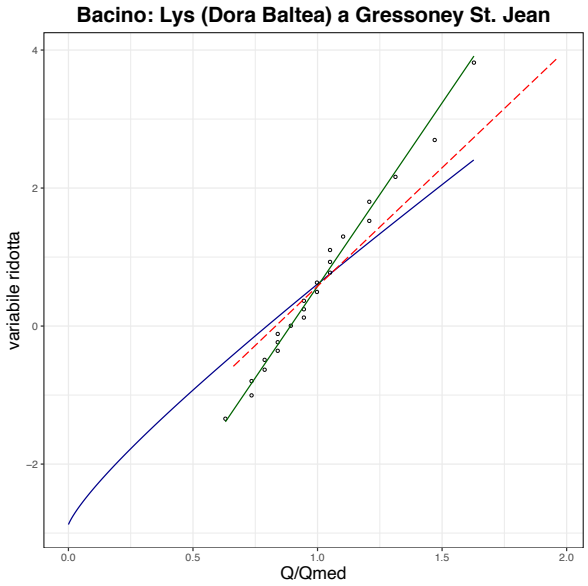

Bacino: Tanaro a Ponte di Nava
variabile ridotta
Q/Qmed

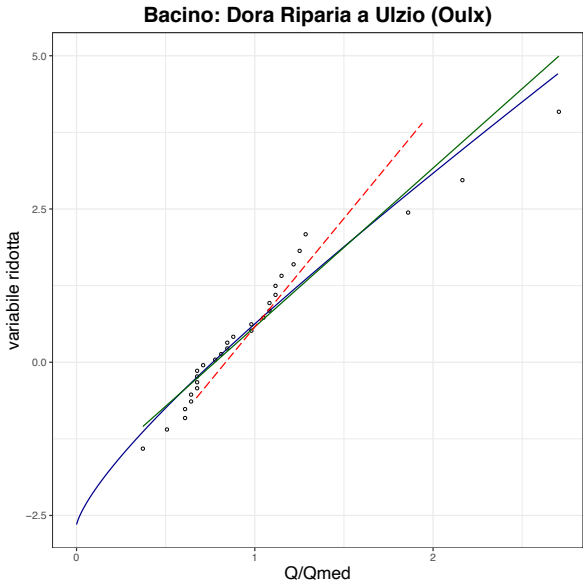

Bacino: Tanaro a Nucetto
variabile ridotta
Q/Qmed

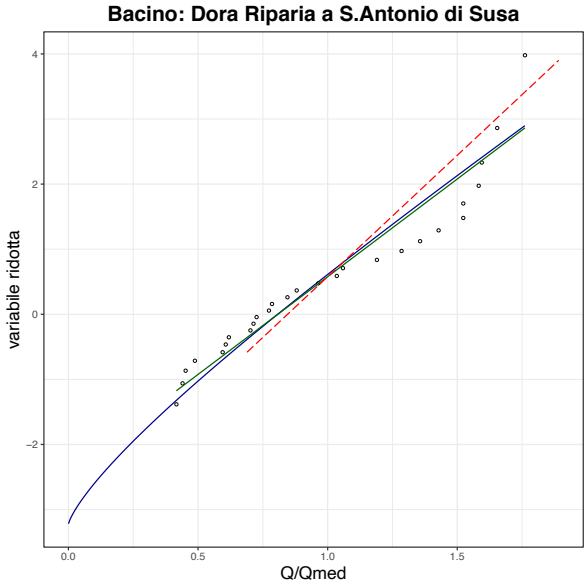

Bacino: Stura di Demonte a Gaiola
variabile ridotta
Q/Qmed

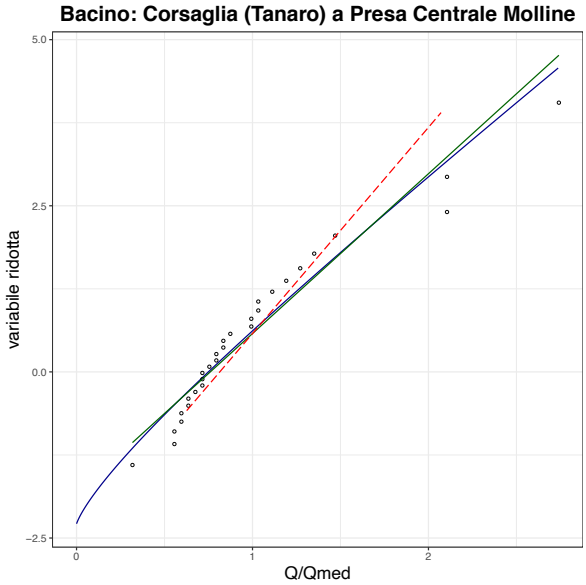

Bacino: Po a Crissolo
variabile ridotta
Q/Qmed

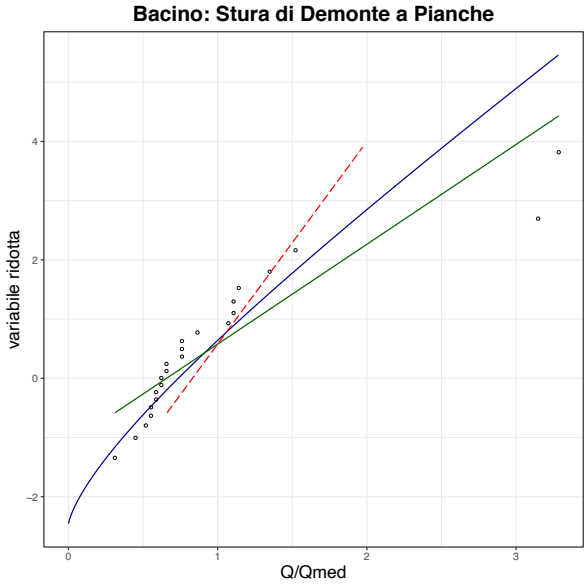

Bacino: Dora Baltea ad Aosta
variabile ridotta
Q/Qmed

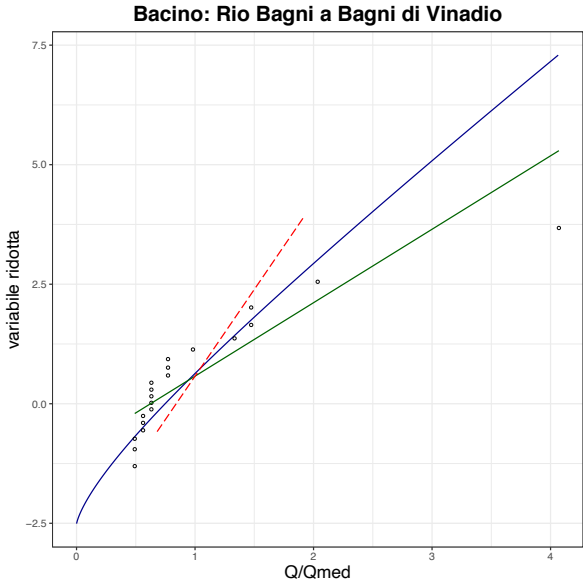

Bacino: Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean
variabile ridotta
Q/Qmed

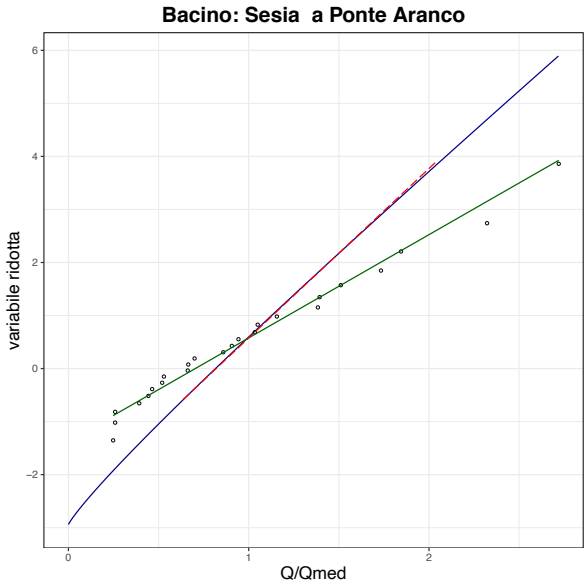

Bacino: Dora Riparia a Ulzio (Oulx)
variabile ridotta
Q/Qmed

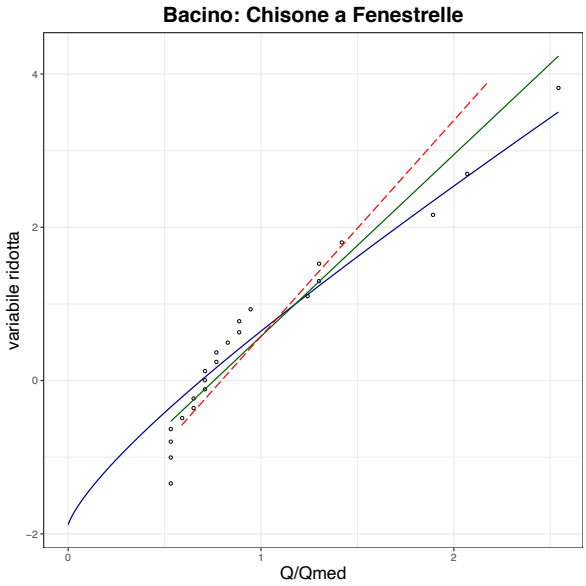

Bacino: Dora Riparia a S.Antonio di Susa
variabile ridotta
Q/Qmed


Bacino: Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline
variabile ridotta
Q/Qmed


Bacino: Stura di Demonte a Pianche
variabile ridotta
Q/Qmed


Bacino: Rio Bagni a Bagni di Vinadio
variabile ridotta
Q/Qmed


Bacino: Sesia a Ponte Aranco
variabile ridotta
Q/Qmed


Bacino: Chisone a Fenestrelle
variabile ridotta
Q/Qmed

ALLEGATO F

Valori dei parametri descrittori di input del campione italiano costituito da 140 bacini idrografici.

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P (mm/anno)	α	λ
11001	Sarca di Nambron a Pian di Nambron	3184	2339	1376	-0.18	1221.67	91.51	2.88
11005	Adda a Fuentes	3963	1859	201	0.43	1133.73	13.46	9.00
11007	Brembo a Ponte Briolo	2839	1187	260	1.37	1691.40	43.44	9.70
11008	Serio a Ponte Cene	2957	1336	365	1.15	1647.61	33.68	8.26
11011	S. Bernardino a Santino	2245	1253	280	0.03	1963.70	156.94	10.31
11012	Toce a Cadarese	3293	2144	730	-0.27	1326.93	16.94	12.50
11013	Toce a Candoglia	4488	1671	203	1.65	1397.69	50.79	5.29
11015	Mastallone (Sesia) a Ponte Folle	2417	1324	492	0.51	1747.58	201.78	3.74
11016	Rutor (Dora Baltea) a Promise	3414	2554	1508	-0.25	1127.00	26.23	5.93
11017	Savara a Eau Rousse	3916	2694	1650	0.27	988.79	14.31	21.68
11018	Artanavaz a St Oyen	3167	2230	1351	0.10	1626.61	11.79	8.22
11019	Ayasse a Champorcher	3119	2364	1372	-0.34	1249.45	33.47	7.08
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	4727	2085	259	0.74	990.64	19.32	4.85
11021	Orco a Pont Canavese	3835	1928	429	0.43	1201.61	94.76	2.67
11022	Stura di Lanzo a Lanzo	3633	1769	461	0.70	1182.88	72.89	4.04
11023	Chisone a Soucheres Basses	3228	2226	1506	0.64	776.86	26.64	2.28
11024	Chisone a S. Martino	3228	1734	417	0.21	921.79	59.31	2.02
11025	Grana a Monterosso	2607	1534	711	0.49	1006.19	52.02	1.76
11026	Tanaro a Ponte di Nava	2612	1569	788	0.54	954.77	124.40	1.87
11027	Tanaro a Nucetto	2612	1224	453	1.41	994.54	91.87	2.66
11029	Stura di Demonte a Gaiola	2980	1817	661	0.01	1024.03	29.23	2.03
11030	Gesso della Valletta	3139	2096	912	-0.17	1192.72	66.65	2.73
11031	Gesso di Entracque	3178	1886	815	0.32	1182.48	58.31	2.42
11040	Po a Crissolo	3704	2240	1294	0.92	1007.41	126.36	1.41
11050	Cervo (Sesia) a Passobreve	2508	1493	586	0.18	1494.17	246.39	2.36
11051	Dora Baltea ad Aosta	4727	2262	547	0.72	1048.63	10.56	9.10
11052	Evançon a Champoluc	4157	2635	1553	0.67	991.02	19.97	4.89
11053	Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean	4427	2637	1398	0.74	969.66	23.00	6.27
11054	Dora Riparia a Ulzio (Oulx)	3258	2168	1079	0.00	792.66	25.44	2.35
11055	Dora Riparia a S.Antonio di Susa	3577	1898	385	0.17	801.90	5.48	10.27
11056	Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline	2593	1529	643	0.32	1123.86	34.62	4.40
11058	Stura di Demonte a Pianche	2980	2073	972	-0.25	959.65	23.85	2.76
11059	Rio Bagni a Bagni di Vinadio	2932	2138	1257	-0.14	1048.93	71.70	1.46

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P (mm/anno)	α	λ
11074	Sesia a Campertogno	4471	2113	828	1.48	1202.68	97.91	2.63
11075	Sesia a Ponte Aranco	4471	1496	328	3.03	1530.05	183.75	3.56
11077	Chisone a Fenestrelle	3228	2152	1153	0.12	786.85	25.08	2.20
11081	Sarca a Ponte Plaza	3140	2003	1156	0.55	1255.94	23.56	4.17
11091	Dora Baltea a Ponte di Mombardone	4727	2402	1011	1.16	1412.47	4.84	4553.33
11093	Lys a d'Ejola	4427	3110	1812	0.02	978.11	17.95	35.01
11094	Stura di Viù a Usseglio	3517	2375	1280	0.07	1109.87	28.12	3.63
11095	Dora di Bardonecchia a Beaulard	3328	2187	1122	0.11	684.81	6.57	18.02
11096	Varaita a Rore	3700	2111	837	0.39	863.02	23.37	1.69
11097	Tanaro a Ormea	2612	1512	719	0.63	960.90	62.98	7.10
11102	Po a S.Mauro Torinese	3704	1081	195	4.02	897.49	13.75	4.88
11103	Po a Casale Monferrato	4727	1251	103	4.19	943.72	15.21	4.12
11106	Adda a Tirano	3757	2167	425	-0.13	929.54	19.64	4.19
11117	Breuil a Alpette	3072	2459	1797	-0.11	1146.62	16.80	72.59
11122	Cannobino a Traffiume	2126	1107	208.45	0.21	2081.80	115.23	4.69
11125	Chiavanne a Alpette	3164	2485	1792	-0.03	1130.80	34.44	5.74
11126	Chiusella a Gurzia	2792	1374	421	0.81	1264.45	197.59	2.56
11129	Dora Baltea a Mazzè	4743	1883	206	1.22	1005.46	24.48	4.24
11130	Dora di Rhemes a Notre Dame	3562	2664	1717	-0.08	1056.62	5.01	405.90
11135	Dora Riparia a Torino Ponte Washington	3583	1655	210.68	0.54	861.90	13.46	4.43
11141	Grand'Eyvia a Cretaz	3902	2583	1476	0.30	971.13	30.33	15.08
11142	Isorno a Pontetto	2670	1617	340.26	-0.25	1396.08	131.71	3.18
11143	Lys a Guillemore	4487	2260	912	1.12	1018.30	67.26	2.15
11144	Maira a Racconigi	3196	1326	256.46	1.31	877.69	9.02	3.65
11145	Maira a Saretto	3196	2411	1521	-0.17	897.62	6.26	11.94
11146	Maira a San Damiano Macra	3196	1899	710	0.14	883.59	17.58	2.46
11149	Marmore a Perreres	4383	2739	1839	1.46	999.38	40.13	2.92
11150	Melezet a Melezet	3164	2389	1497	-0.19	708.29	8.91	10.80
11154	Orco a San Benigno Canavese	3885	1567	212	1.23	1183.90	63.58	3.26
11156	Pellice a Villafranca Piemonte	3234	1542	249.61	0.50	969.48	35.81	2.86
11157	Po a Carignano	3760	1101	221.65	4.18	900.19	15.91	3.36
11164	Rutor a La Joux	3343	2570	1600	-0.29	1148.37	16.27	19.06
11166	San Bernardino a Trobaso	2277	1211	216	0.11	2017.50	113.57	11.93
11167	Stura di Demonte a Fossano	3197	1518	309.65	0.64	1089.22	24.68	5.03
11169	Sermenza a Rimasco	2878	1855	893	0.10	1406.67	178.38	4.81
11172	San Giovanni a Possaccio	2131	1002	216	0.72	2141.98	262.75	1.68
11173	Stura di Lanzo a Torino	3618	1368	214.32	1.71	1136.60	51.77	7.72
11176	Stura di Viù a Malciaussia	3430	2622	1794	-0.04	1111.57	26.93	4.55
11177	Tanaro a Alba	3197	1072	157.21	2.51	981.87	37.81	2.81
11178	Tanaro a Garessio	2622	1435	573.54	0.62	1018.21	53.50	6.29
11180	Tanaro a Piantorre	2622	1067	337.23	2.09	977.31	60.88	4.00
11184	Toce a Lago d'Avino	3479	2550	2212	3.50	1282.77	48.96	3.37
11185	Toce a Lago Busin	2849	2524	2370	2.05	1349.42	29.01	20.01
11186	Toce a Lago del Sabbione	3331	2765	2417	1.07	1040.01	36.36	9.81

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P (mm/anno)	α	λ
11187	Toce a Lago Vannino	3175	2527	2147	1.22	1154.68	19.49	37.56
11188	Varaita a Castello	3242	2406	1570	0.00	877.40	15.86	11.48
11189	Varaita a Rossana	3716	1797	492.9	0.78	865.36	29.12	2.92
11194	Po Palazzolo Vercellese	4743	1240	145	4.29	948.69	11.87	5.37
11195	Sarca di Val Genova Malga Ceret	3561	2629	1431	-0.31	1300.25	189.84	1.52
11196	Sarca di Val Genova	3561	2358	900	-0.25	1269.78	14.99	32.22
11197	Sarca Nago	3492	1460	74	0.77	1157.37	16.73	4.09
11198	Sarca Saone	3176	1593	492.805	0.72	1252.72	19.65	24.28
12001	Tagliamento a Pioverno	2668	1160	232	1.07	1839.81	44.18	5.43
12002	Piave a Presenaio	2585	1699	953	0.29	1378.06	18.04	12.95
12003	Piave a Ponte della Lasta	2933	1673	872	0.97	1257.54	18.53	8.21
12006	Brenta a Barziza (Bassano)	2903	1250	110	0.74	1300.13	41.21	3.57
12007	Astico a Forni di Val dAstico	1924	1170	308	-0.18	1391.59	27.88	14.25
12009	Adige a Tel	3859	2105	454	0.10	721.14	4.07	27.14
12010	Plan a Plan	3382	2400	1604	0.37	848.14	23.97	4.11
12011	Adige a Ponte dAdige	3859	1919	237	0.24	777.87	6.94	12.20
12012	Ridanna a Vipiteno	3423	1926	940	0.87	937.24	21.08	8.96
12013	Isarco a Pra di Sopra	3456	1876	759	0.68	937.76	10.62	7.47
12014	Rienza a Monguelfo	3047	1882	1101	0.82	991.50	16.02	2.65
12015	Aurino a Ca' di Pietra	3408	2156	1050	0.20	1223.63	15.88	20.23
12016	Gadera a Mantana	3074	1879	962	0.49	930.01	16.95	3.34
12017	Rienza a Vandoies	3408	1858	727	0.60	950.37	5.13	15.48
12018	Ega a Ponte Nova	2795	1644	883	0.86	907.83	5.27	13.71
12019	Avisio a Soraga	3216	2061	1196	0.54	986.65	9.34	6.77
12020	Adige a Trento	3859	1716	191	0.67	890.21	6.26	10.41
12021	Adige a Boara Pisani	3851	1494	-3	0.98	932.08	3.92	12.40
12023	Piave a Ponte Cordevole	2581	1678	1042	0.69	1414.06	25.15	5.43
12024	Padola a Ponte Padola	2933	1844	1205	1.22	1091.36	16.14	4.56
12025	Piave Ansiei a Auronzo	3101	1777	833	0.66	1083.16	26.81	3.65
12027	Boite a Vodo	3137	1826	831	0.51	1105.29	22.17	3.98
12030	Cordevole a Caprile	3225	1881	980	0.82	1071.79	11.58	4.92
12031	Mis a Ponte SantAntonio	2772	1262	353	1.14	1493.22	80.58	2.95
12032	Piave a Segusino	3196	1354	198	1.01	1320.34	28.56	2.80
12033	Brenta a Ospedaletto	2535	1198	295	0.80	1160.09	10.66	4.39
12034	Rio Valsura Lana	3458	1920	340	-0.04	862.55	11.70	7.52
12036	Adige a Pescantina	3859	1615	68	0.75	915.67	5.10	9.25
12038	Boite a Perarolo	3137	1751	582	0.29	1113.31	12.75	9.58
12044	Riva a Seghe di Riva	3286	2380	1532	0.10	1020.12	22.05	53.81
12045	Noce a Ponte Ravina	3688	2147	789	0.21	1007.87	8.33	25.67
12046	Noce a Dermulo	3688	1764	398	0.67	954.59	11.88	4.92
12047	Travignolo a Sottosassa	3094	1964	1219	0.87	1087.45	46.58	6.50
12050	Adige Bronzolo	3859	1795	223	0.50	864.00	5.20	20.37
12051	Adige Spondigna	3903	2207	884	0.45	779.97	3.99	12.86
12052	Aurino Caminata	3488	2110	848	0.14	1076.83	28.56	7.19
12053	Aurino S Giorgio	3488	2034	819	0.31	1049.38	10.41	34.78
12054	Cellina Barcis	2706	1304	382	0.87	1631.43	110.74	2.77

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P (mm/anno)	α	λ
12057	Cismon Corlo	3192	1375	253	1.06	1306.40	49.97	2.37
12058	Cordevole Alleghe diga	3334	1862	965	1.10	1081.07	22.31	4.59
12059	Cordevole Saviner	3152	1911	1028	0.67	1028.72	16.26	7.63
12063	Isarco Fortezza	3504	1862	720	0.72	934.66	11.50	12.53
12069	Piave Pieve diga	3087	1645	649	0.74	1193.34	33.05	3.52
12070	Posina Stancari	2204	1101	303	0.62	1680.37	65.34	4.57
12071	Rio Anterselva Bagni Salomone	3436	2025	1088	0.85	912.89	9.42	12.21
12072	Rio Casies Colle	2837	1957	1196	0.24	901.99	8.88	8.55
12073	Rio Massiaga	2080	1712	1121	-0.51	1257.65	96.53	2.05
12075	Astico alla Diga di Leda	2308	1200	232	0.22	1571.93	36.95	4.59
12076	Avisio a Stramentizzo	3200	1831	773	0.47	1015.16	36.06	2.16
12078	Diga di Careser	3325	2968	2535	-0.25	957.28	55.95	5.46
12079	Diga di Forte Buso	3158	2021	1407	1.51	1099.74	94.67	3.66
12081	Diga di Santa Giustina	3675	1765	514	0.88	949.24	18.14	5.80
12083	Diga di Speccheri	2232	1343	764	0.90	1514.63	160.31	2.32
12084	Diga di Val Schener	3192	1512	538	1.26	1307.89	109.00	1.71
12085	Diga di Zoccolo	3434	2163	1112	0.33	881.39	9.92	9.42

ALLEGATO G

Ripartizione in cluster dei bacini appartenenti al campione italiano analizzato a seguito dell'applicazione del metodo *k-means* con centroidi definiti. Per ciascun gruppo viene riportata una tabella contenete i valori dei set di parametri descrittori.

Tabella G.4: Cluster 1 (8 bacini).

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P totale annua (mm/anno)	$\alpha_{Q\ colmo}$	$\lambda_{Q\ colmo}$
11075	Sesia a Ponte Aranco	4471	1496	328	3.03	1530.05	183.75	3.56
11102	Po a S.Mauro Torinese	3704	1081	195	4.02	897.49	13.75	4.88
11103	Po a Casale Monferrato	4727	1251	103	4.19	943.72	15.21	4.12
11157	Po a Carignano	3760	1101	221.65	4.18	900.19	15.91	3.36
11177	Tanaro a Alba	3197	1072	157.21	2.51	981.87	37.81	2.81
11180	Tanaro a Piantorre	2622	1067	337.23	2.09	977.31	60.88	4.00
11184	Toce a Lago d'Avino	3479	2550	2212	3.50	1282.77	48.96	3.37
11194	Po Palazzolo Vercellese	4743	1240	145	4.29	948.69	11.87	5.37

Tabella G.5: Cluster 2 (15 bacini).

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P totale annua (mm/anno)	$\alpha_{Q\ colmo}$	$\lambda_{Q\ colmo}$
11007	Brembo a Ponte Briolo	2839	1187	260	1.37	1691.40	43.44	9.70
11008	Serio a Ponte Cene	2957	1336	365	1.15	1647.61	33.68	8.26
11011	S. Bernardino a Santino	2245	1253	280	0.03	1963.70	156.94	10.31
11015	Mastallone (Sesia) a Ponte Folle	2417	1324	492	0.51	1747.58	201.78	3.74
11050	Cervo (Sesia) a Passobreve	2508	1493	586	0.18	1494.17	246.39	2.36
11122	Cannobino a Traffiume	2126	1107	208.45	0.21	2081.80	115.23	4.69
11166	San Bernardino a Trobaso	2277	1211	216	0.11	2017.50	113.57	11.93
11172	San Giovanni a Possaccio	2131	1002	216	0.72	2141.98	262.75	1.68
12001	Tagliamento a Pioverno	2668	1160	232	1.07	1839.81	44.18	5.43
12007	Astico a Forni di Val d'Astico	1924	1170	308	-0.18	1391.59	27.88	14.25
12031	Mis a Ponte SantAntonio	2772	1262	353	1.14	1493.22	80.58	2.95
12054	Cellina Barcis	2706	1304	382	0.87	1631.43	110.74	2.77
12070	Posina Stancari	2204	1101	303	0.62	1680.37	65.34	4.57
12075	Astico alla Diga di Leda	2308	1200	232	0.22	1571.93	36.95	4.59

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P totale annua (mm/anno)	$\alpha_{Q\ colmo}$	$\lambda_{Q\ colmo}$
12083	Diga di Speccheri	2232	1343	764	0.90	1514.63	160.31	2.32
12001	Tagliamento a Pioverno	2668	1160	232	1.07	1839.81	44.18	5.43
12007	Astico a Forni di Val d'Astico	1924	1170	308	-0.18	1391.59	27.88	14.25
12031	Mis a Ponte SantAntonio	2772	1262	353	1.14	1493.22	80.58	2.95
12054	Cellina Barcis	2706	1304	382	0.87	1631.43	110.74	2.77
12070	Posina Stancari	2204	1101	303	0.62	1680.37	65.34	4.57
12075	Astico alla Diga di Leda	2308	1200	232	0.22	1571.93	36.95	4.59
12083	Diga di Speccheri	2232	1343	764	0.90	1514.63	160.31	2.32

Tabella G.6: Cluster 3 (11 bacini).

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P totale annua (mm/anno)	$\alpha_{Q\ colmo}$	$\lambda_{Q\ colmo}$
11017	Savara a Eau Rousse	3916	2694	1650	0.27	988.79	14.31	21.68
11093	Lys a d'Ejola	4427	3110	1812	0.02	978.11	17.95	35.01
11164	Rutor a La Joux	3343	2570	1600	-0.29	1148.37	16.27	19.06
11185	Toce a Lago Busin	2849	2524	2370	2.05	1349.42	29.01	20.01
11187	Toce a Lago Vannino	3175	2527	2147	1.22	1154.68	19.49	37.56
11196	Sarca di Val Genova	3561	2358	900	-0.25	1269.78	14.99	32.22
12009	Adige a Tel	3859	2105	454	0.10	721.14	4.07	27.14
12015	Aurino a Ca' di Pietra	3408	2156	1050	0.20	1223.63	15.88	20.23
12044	Riva a Seghe di Riva	3286	2380	1532	0.10	1020.12	22.05	53.81
12045	Noce a Ponte Ravina	3688	2147	789	0.21	1007.87	8.33	25.67
12053	Aurino S Giorgio	3488	2034	819	0.31	1049.38	10.41	34.78

Tabella G.7: Cluster 4 (15 bacini).

Codice	**Bacino**	**Quota max** (m s.l.m.)	**Quota media** (m s.l.m.)	**Quota min** (m s.l.m.)	**ζ**	**P totale annua** (mm/anno)	**$\alpha_{Q\ colmo}$**	**$\lambda_{Q\ colmo}$**
11001	Sarca di Nambron a Pian di Nambron	3184	2339	1376	-0.18	1221.67	91.51	2.88
11012	Toce a Cadarese	3293	2144	730	-0.27	1326.93	16.94	12.50
11016	Rutor (Dora Baltea) a Promise	3414	2554	1508	-0.25	1127.00	26.23	5.93
11018	Artanavaz a St Oyen	3167	2230	1351	0.10	1626.61	11.79	8.22
11019	Ayasse a Champorcher	3119	2364	1372	-0.34	1249.45	33.47	7.08
11030	Gesso della Valletta	3139	2096	912	-0.17	1192.72	66.65	2.73
11059	Rio Bagni a Bagni di Vinadio	2932	2138	1257	-0.14	1048.93	71.70	1.46
11081	Sarca a Ponte Plaza	3140	2003	1156	0.55	1255.94	23.56	4.17
11094	Stura di Viù a Usseglio	3517	2375	1280	0.07	1109.87	28.12	3.63
11125	Chiavanne a Alpette	3164	2485	1792	-0.03	1130.80	34.44	5.74
11169	Sermenza a Rimasco	2878	1855	893	0.10	1406.67	178.38	4.81
11176	Stura di Viù a Malciaussia	3430	2622	1794	-0.04	1111.57	26.93	4.55
11195	Sarca di Val Genova Malga Ceret	3561	2629	1431	-0.31	1300.25	189.84	1.52
12052	Aurino Caminata	3488	2110	848	0.14	1076.83	28.56	7.19
12073	Rio Massiaga	2080	1712	1121	-0.51	1257.65	96.53	2.05

Tabella G.8: Cluster 5 (58 bacini).

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P totale annua (mm/anno)	$\alpha_{Q\ colmo}$	$\lambda_{Q\ colmo}$
11005	Adda a Fuentes	3963	1859	201	0.43	1133.73	13.46	9.00
11013	Toce a Candoglia	4488	1671	203	1.65	1397.69	50.79	5.29
11021	Orco a Pont Canavese	3835	1928	429	0.43	1201.61	94.76	2.67
11022	Stura di Lanzo a Lanzo	3633	1769	461	0.70	1182.88	72.89	4.04
11024	Chisone a S. Martino	3228	1734	417	0.21	921.79	59.31	2.02
11025	Grana a Monterosso	2607	1534	711	0.49	1006.19	52.02	1.76
11026	Tanaro a Ponte di Nava	2612	1569	788	0.54	954.77	124.40	1.87
11027	Tanaro a Nucetto	2612	1224	453	1.41	994.54	91.87	2.66
11029	Stura di Demonte a Gaiola	2980	1817	661	0.01	1024.03	29.23	2.03
11031	Gesso di Entracque	3178	1886	815	0.32	1182.48	58.31	2.42
11056	Corsaglia (Tanaro) a Presa Centrale Molline	2593	1529	643	0.32	1123.86	34.62	4.40
11074	Sesia a Campertogno	4471	2113	828	1.48	1202.68	97.91	2.63
11097	Tanaro a Ormea	2612	1512	719	0.63	960.90	62.98	7.10
11126	Chiusella a Gurzia	2792	1374	421	0.81	1264.45	197.59	2.56
11129	Dora Baltea a Mazzè	4743	1883	206	1.22	1005.46	24.48	4.24
11135	Dora Riparia a Torino Ponte Washington	3583	1655	210.68	0.54	861.90	13.46	4.43
11142	Isorno a Pontetto	2670	1617	340.26	-0.25	1396.08	131.71	3.18
11144	Maira a Racconigi	3196	1326	256.46	1.31	877.69	9.02	3.65
11154	Orco a San Benigno Canavese	3885	1567	212	1.23	1183.90	63.58	3.26
11156	Pellice a Villafranca Piemonte	3234	1542	249.61	0.50	969.48	35.81	2.86
11167	Stura di Demonte a Fossano	3197	1518	309.65	0.64	1089.22	24.68	5.03
11173	Stura di Lanzo a Torino	3618	1368	214.32	1.71	1136.60	51.77	7.72
11178	Tanaro a Garessio	2622	1435	573.54	0.62	1018.21	53.50	6.29
11189	Varaita a Rossana	3716	1797	492.9	0.78	865.36	29.12	2.92
11197	Sarca Nago	3492	1460	74	0.77	1157.37	16.73	4.09
11198	Sarca Saone	3176	1593	492.805	0.72	1252.72	19.65	24.28
12002	Piave a Presenaio	2585	1699	953	0.29	1378.06	18.04	12.95
12003	Piave a Ponte della Lasta	2933	1673	872	0.97	1257.54	18.53	8.21
12006	Brenta a Barziza (Bassano)	2903	1250	110	0.74	1300.13	41.21	3.57
12012	Ridanna a Vipiteno	3423	1926	940	0.87	937.24	21.08	8.96
12013	Isarco a Pra di Sopra	3456	1876	759	0.68	937.76	10.62	7.47
12014	Rienza a Monguelfo	3047	1882	1101	0.82	991.50	16.02	2.65
12016	Gadera a Mantana	3074	1879	962	0.49	930.01	16.95	3.34

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P totale annua (mm/anno)	$\alpha_{Q\ colmo}$	$\lambda_{Q\ colmo}$
12017	Rienza a Vandoies	3408	1858	727	0.60	950.37	5.13	15.48
12018	Ega a Ponte Nova	2795	1644	883	0.86	907.83	5.27	13.71
12020	Adige a Trento	3859	1716	191	0.67	890.21	6.26	10.41
12021	Adige a Boara Pisani	3851	1494	-3	0.98	932.08	3.92	12.40
12023	Piave a Ponte Cordevole	2581	1678	1042	0.69	1414.06	25.15	5.43
12024	Padola a Ponte Padola	2933	1844	1205	1.22	1091.36	16.14	4.56
12025	Piave Ansiei a Auronzo	3101	1777	833	0.66	1083.16	26.81	3.65
12027	Boite a Vodo	3137	1826	831	0.51	1105.29	22.17	3.98
12030	Cordevole a Caprile	3225	1881	980	0.82	1071.79	11.58	4.92
12032	Piave a Segusino	3196	1354	198	1.01	1320.34	28.56	2.80
12033	Brenta a Ospedaletto	2535	1198	295	0.80	1160.09	10.66	4.39
12036	Adige a Pescantina	3859	1615	68	0.75	915.67	5.10	9.25
12038	Boite a Perarolo	3137	1751	582	0.29	1113.31	12.75	9.58
12046	Noce a Dermulo	3688	1764	398	0.67	954.59	11.88	4.92
12047	Travignolo a Sottosassa	3094	1964	1219	0.87	1087.45	46.58	6.50
12050	Adige Bronzolo	3859	1795	223	0.50	864.00	5.20	20.37
12057	Cismon Corlo	3192	1375	253	1.06	1306.40	49.97	2.37
12058	Cordevole Alleghe diga	3334	1862	965	1.10	1081.07	22.31	4.59
12059	Cordevole Saviner	3152	1911	1028	0.67	1028.72	16.26	7.63
12063	Isarco Fortezza	3504	1862	720	0.72	934.66	11.50	12.53
12069	Piave Pieve diga	3087	1645	649	0.74	1193.34	33.05	3.52
12076	Avisio a Stramentizzo	3200	1831	773	0.47	1015.16	36.06	2.16
12079	Diga di Forte Buso	3158	2021	1407	1.51	1099.74	94.67	3.66
12081	Diga di Santa Giustina	3675	1765	514	0.88	949.24	18.14	5.80
12084	Diga di Val Schener	3192	1512	538	1.26	1307.89	109.00	1.71

Tabella G.9: Cluster 6 (30 bacini).

Codice	Bacino	Quota max (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Quota min (m s.l.m.)	ζ	P totale annua (mm/anno)	$\alpha_{Q\ colmo}$	$\lambda_{Q\ colmo}$
11020	Dora Baltea a Tavagnasco	4727	2085	259	0.74	990.64	19.32	4.85
11023	Chisone a Soucheres Basses	3228	2226	1506	0.64	776.86	26.64	2.28
11040	Po a Crissolo	3704	2240	1294	0.92	1007.41	126.36	1.41
11051	Dora Baltea ad Aosta	4727	2262	547	0.72	1048.63	10.56	9.10
11052	Evançon a Champoluc	4157	2635	1553	0.67	991.02	19.97	4.89
11053	Lys (Dora Baltea) a Gressoney St. Jean	4427	2637	1398	0.74	969.66	23.00	6.27
11054	Dora Riparia a Ulzio (Oulx)	3258	2168	1079	0.00	792.66	25.44	2.35
11055	Dora Riparia a S.Antonio di Susa	3577	1898	385	0.17	801.90	5.48	10.27
11058	Stura di Demonte a Pianche	2980	2073	972	-0.25	959.65	23.85	2.76
11077	Chisone a Fenestrelle	3228	2152	1153	0.12	786.85	25.08	2.20
11095	Dora di Bardonecchia a Beaulard	3328	2187	1122	0.11	684.81	6.57	18.02
11096	Varaita a Rore	3700	2111	837	0.39	863.02	23.37	1.69
11106	Adda a Tirano	3757	2167	425	-0.13	929.54	19.64	4.19
11141	Grand'Eyvia a Cretaz	3902	2583	1476	0.30	971.13	30.33	15.08
11143	Lys a Guillemore	4487	2260	912	1.12	1018.30	67.26	2.15
11145	Maira a Saretto	3196	2411	1521	-0.17	897.62	6.26	11.94
11146	Maira a San Damiano Macra	3196	1899	710	0.14	883.59	17.58	2.46
11149	Marmore a Perreres	4383	2739	1839	1.46	999.38	40.13	2.92
11150	Melezet a Melezet	3164	2389	1497	-0.19	708.29	8.91	10.80
11186	Toce a Lago del Sabbione	3331	2765	2417	1.07	1040.01	36.36	9.81
11188	Varaita a Castello	3242	2406	1570	0.00	877.40	15.86	11.48
12010	Plan a Plan	3382	2400	1604	0.37	848.14	23.97	4.11
12011	Adige a Ponte dAdige	3859	1919	237	0.24	777.87	6.94	12.20
12019	Avisio a Soraga	3216	2061	1196	0.54	986.65	9.34	6.77
12034	Rio Valsura Lana	3458	1920	340	-0.04	862.55	11.70	7.52
12051	Adige Spondigna	3903	2207	884	0.45	779.97	3.99	12.86
12071	Rio Anterselva Bagni Salomone	3436	2025	1088	0.85	912.89	9.42	12.21
12072	Rio Casies Colle	2837	1957	1196	0.24	901.99	8.88	8.55
12078	Diga di Careser	3325	2968	2535	-0.25	957.28	55.95	5.46
12085	Diga di Zoccolo	3434	2163	1112	0.33	881.39	9.92	9.42

ALLEGATO H

In questo allegato vengono riportati i codici utilizzati in RStudio®. Si riporta, per ciascun codice, una breve descrizione dello scopo per il quale è stato utilizzato.

1. Estrazione serie di portate al colmo di piena da banca dati HYDRO

Codice necessario ad estrarre le serie storiche portata al colmo di piena a partire dal file .csv scaricato dalla banca dati idrologici HYDRO (rif. Capitolo 1). Il file .csv originale contiene, per ogni anno disponibile, tutti i valori di portata media giornaliera misurati.

```
setwd("~/…")
info<-read.csv(".csv", sep=";")
codici<-data.frame(info[,1])

for (k in 1:49){
  setwd("~/Utente/HYDRO_data/Estrazione/originals_HYDRO")
  namefile<-paste0(codici[k,1],"_orig.csv")
  dati1<-read.csv(namefile, sep=";",na.strings=c("",NA))
  codice_staz<-codici[k,1]
  iniz<-info[k,2]
  fine<-info[k,3]
  ar<-info[k,5] #area bacino
  qmedia<-info[k,4] #quota media bacino
  anni<-seq(iniz,fine,by=1) # lunghezza serie storica
  dati1<-dati1[,-1]
  serie_massimi<-rep(0,length(anni))
  #countNA<-rep(0,length(anni))
  h=0
  for (i in 1:length(anni)){

    a<-42+h
    b<-72+h
    matrix_year<-as.matrix(dati1[a:b,])
    matrix_year<-matrix_year[,c(1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23)]
    numberNA<-sum(is.na(matrix_year))

    if(numberNA>73){ # 73 corrisponde al 20% di dati mancanti
      serie_massimi[i]=NA # l’anno viene scartato
      h=h+73
    } else {
      matrix_year[is.na(matrix_year)] <- 0
      num_year<-as.numeric(matrix_year) #crea un vettore con i valori relativi all'anno
      max_year<-max(num_year) #estrare il Massimo annuo
      serie_massimi[i]=max_year #salva il massimo annuo nel vettore della serie storica
      h=h+73
    }
  }
  serie_max_q<-serie_massimi/ar
  area<-rep(ar,length(anni))
  quota_media<-rep(qmedia,length(anni))

  serie_storica<-cbind(anni,serie_massimi,serie_max_q,quota_media,area)
  serie_storica_noNA<-na.omit(serie_storica)
```

2. Theil – Sen e test di Mann Kendall

Funzioni per il calcolo dello stimatore Theil-Sen e per l'applicazione del test di Mann Kendall. Le due funzioni sono state impiegate nell'ambito dell'individuazione di trend temporali all'interno delle serie storiche di portata al colmo di piena riferite al campione di bacini rappresentativi dell'arco alpino (capitolo 2).

```
#TWO-SIDED TEST FOR TREND

sen_slope <- function(dframe,discharge_name="Qmax",year_name="year") {
  #check for duplicated values
  if(length(which(duplicated(dframe)))>0) {
    dframe <- dframe[-which(duplicated(dframe)),]
  }
  #check for NAs
  if(length(which(is.na(dframe[,discharge_name])))>0) {
    dframe <- dframe[-which(is.na(dframe[,discharge_name])),]
  }
  #slopes
  mk <- 0
  for(i in c(1:(nrow(dframe)-1) )) {
    for(j in c((i+1):nrow(dframe))) {
      mk <- c(mk,ifelse(!is.na((dframe[j,discharge_name]-
dframe[i,discharge_name])/(dframe[j,year_name]-
dframe[i,year_name])),(dframe[j,discharge_name]-
dframe[i,discharge_name])/(dframe[j,year_name]-dframe[i,year_name]) , NA))
    }
  }
  mk <- mk[-1]
  sen <- median(mk,na.rm=TRUE)
return(c(sen=sen))
}

mann_kendall_trend <-
function(dframe,discharge_name="Qmax",year_name="year",continuity=TRUE) {

  #Remove NAs
  if(length(which(is.na(dframe[,discharge_name])))>0) {
    dframe <- dframe[-which(is.na(dframe[,discharge_name])),]
  }

  #mann-kendall
  mk <- NA
  for(i in c(1:(nrow(dframe)-1) )) {
    for(j in c((i+1):nrow(dframe))) {
      mk <- c(mk,sign(dframe[j,discharge_name]-dframe[i,discharge_name]) )
    }
  }
  mk <- mk[-1]
  mk <- sum(mk,na.rm=T)

  #for variance, need number of ties
  series <- dframe[,discharge_name]
  n <- length(series)
  if(any(duplicated(series))) {
    #indices of elements, that occur multiple times
    duplicate_indices <- which(duplicated(series))
    #number of elements with multiple occurences
    p <- length(unique(series[duplicate_indices]))
    #first occurrence of element with multiple occurrences
    t_index <- sapply(unique(series[duplicate_indices]), function(k) min(which(series==k))
)
    #number of occurrences of a duplicated element
    t <- sapply(unique(series[duplicate_indices]), function(k) length(which(series==k)))
```

```
    var_mk <- (n*(n-1)*(2*n+5) - sum(sapply(t, function(j) j*(j-1)*(2*j+5))) )/18
  }
  #no ties
  else if(!any(duplicated(series))) {
    var_mk <- (n*(n-1)*(2*n+5))/18
  }
  #actual test-statistic
  if(continuity==FALSE) {
    Z <- mk/sqrt(var_mk)
  }
  else if(continuity==TRUE) {
    Z <- sign(mk)*(abs(mk)-1)/sqrt(var_mk)
  }
  #p-value with normal distribution, assuming two-sided test here
  p_val <- (1-pnorm(abs(Z)))*2

  return(c(sign_sum=mk,test_stat=Z,p_val=p_val))
}
```

3. Modello FloodAlp

Funzione che consente l'applicazione del modello *FloodAlp* (Allamano P. et al., 2009)

```
FloodAlp_mod <- function(q, z_max, z_min, zita, R, alfa, lambda) {
  C <- 0.5 # resta fisso per tutti i bacini
  ZT_min <- 0 # resta fisso per tutti i bacini
  ZT_max <- 3000 # resta fisso per tutti i bacini
  lambda_star <- lambda*(ZT_max-z_min)/(ZT_max-ZT_min)
  if (z_max < ZT_max){     ######### BOUNDED
    t <- seq(1,365,by=1)
    ZT <- (ZT_max-ZT_min)/(365/2)*t+ZT_min
    index_t_min <- which(ZT>z_min)
    index_t_max <- which(ZT>z_max)
    t0_3 <- 0
    t_min_3 <- index_t_min[1]
    t_max_3 <- index_t_max[1]
    t_tilde_3 <- 365/2

    temp1 <- rep(0)
    temp2 <- rep(0)
    fc_0_3  <- stepfun(x = t0_3:t_min_3 , y = rep(0,t_min_3-t0_3+2))
    X_0_3  <- stepfun(x = t0_3:t_min_3 , y = rep(1,t_min_3-t0_3+2))
    fc_t_3  <- function(t) {((1+zita)*(((ZT_max-ZT_min)/
                                        365*2*t+ZT_min)-z_min))/(zita*(((ZT_max-ZT_min)/

365*2*t+ZT_min)-z_min)+z_max-z_min)}
    X_t_3     <-     function(t)     {1-((1+zita)*(((ZT_max-ZT_min)/     365*2*t+ZT_min)-
z_min))/(zita*(((ZT_max-ZT_min)/ 365*2*t+ZT_min)-z_min)+z_max-z_min)}
    fc_1_3 <- stepfun(x = t_max_3:t_tilde_3,y = rep(1,t_tilde_3- t_max_3+2))
    X_1_3 <- stepfun(x = t_max_3:t_tilde_3,y = rep(0,t_tilde_3- t_max_3+2))
    for (t in seq(1,t_tilde_3,1)){
      if (t<t_min_3){
        fc_3 <- fc_0_3
        X_3 <- X_0_3
        Integral_fc_3 <- integrate(fc_3,t,t+1)
        Integral_X_3 <- integrate(X_3,t,t+1)
      }else if (t<t_max_3){
        fc_3 <- fc_t_3
        X_3 <- X_t_3
        Integral_fc_3 <- integrate(fc_3,t,t+1)
        Integral_X_3 <- integrate(X_3,t,t+1)
      } else{
        fc_3 <- fc_1_3
        X_3 <- X_1_3
        Integral_fc_3 <- integrate(fc_3,t,t+1)
        Integral_X_3 <- integrate(X_3,t,t+1)
      }
      temp1[t]  <- Integral_fc_3$value
      temp2[t]  <- Integral_X_3$value
    }
    Result1 <- sum(temp1)
    Result2 <- sum(temp2)
    SM_star_3  <- (R/365/1000)*(Result2/Result1)

    #costruzione della curva di probabilità cumulata PQam
    # per diversi valori di q (portata specifica)
    integrale_P_II_3 <- rep(0)

    for (i in seq(1, length(q), by=1)){
      y  <- function(t) {exp(-q[i]/
                             (C*alfa)/
                             (((1+zita)*(((ZT_max-ZT_min)/365*2*t+ZT_min)-z_min))/
```

```
                                  (zita*(((ZT_max-ZT_min)/365*2*t+ZT_min)-z_min)+z_max-
z_min)))}
      Integral_3 <- integrate (y,t_min_3,t_max_3)
      integrale_P_II_3[i]  <- Integral_3$value
    }

    P_II_3 <- 1-(exp(SM_star_3/(C*alfa)))/(t_max_3-t_min_3)*integrale_P_II_3
    P_III_3 <- 1-exp(-(q-SM_star_3)/(C*alfa))
    W_II_3 <- (z_max-z_min)/(ZT_max-z_min)
    W_III_3 <- (ZT_max-z_max)/(ZT_max-z_min)
    PQ = W_II_3*P_II_3+W_III_3*P_III_3
    P_Qam_3 = exp(-lambda_star*(1-PQ))}

  if (z_max >= ZT_max){    #HIGH ELEVATION
    t <- seq(1,365,by=1)
    ZT <- (ZT_max-ZT_min)/(365/2)*t+ZT_min
    index_t_min <- which(ZT>z_min)
    index_t_max <- which(ZT>z_max)
    t0_3 <- 0
    t_min_3 <- index_t_min[1]
    t_max_3 <- index_t_max[1]
    t_tilde_3 <- 365/2
    temp1 <- rep(0)
    temp2 <- rep(0)
    fc_0_3  <- stepfun(x = t0_3:t_min_3 , y = rep(0,t_min_3-t0_3+2))
    X_0_3  <- stepfun(x = t0_3:t_min_3 , y = rep(1,t_min_3-t0_3+2))

    fc_t_3<-function(t){((1+zita)*(((ZT_max-ZT_min)/365*2*t+ZT_min)-
z_min))/(zita*(((ZT_max-ZT_min)/ *2*t+ZT_min)-z_min)+z_max-z_min)}
    X_t_3 <- function(t)  {
      1-((1+zita)*(((ZT_max-ZT_min)/365*2*t+ZT_min)-z_min)/(zita*(((ZT_max-
ZT_min)/365*2*t+ZT_min)-z_min)+z_max-z_min))
    }

    for (t in seq(1,t_tilde_3,1)){
      if (t<t_min_3){
        fc_3 <- fc_0_3
        X_3 <- X_0_3
        Integral_fc_3 <- integrate(fc_3,t,t+1)
        Integral_X_3 <- integrate(X_3,t,t+1)
      }else if (t<t_tilde_3){
        fc_3 <- fc_t_3
        X_3 <- X_t_3
        Integral_fc_3 <- integrate(fc_3,t,t+1)
        Integral_X_3 <- integrate(X_3,t,t+1)
      }
      temp1[t]  <- Integral_fc_3$value
      temp2[t]  <- Integral_X_3$value
    }
    Result1 <- sum(temp1)
    Result2 <- sum(temp2)

    #costruzione della curva di probabilità cumulata PQam
    SM_star_3  <- (R/365/1000)*(Result2/Result1)
    #costruzione della curva di probabilità cumulata PQam
    # per diversi valori di q (portata specifica) che devo specificare io
    integrale_P_II_3 <- rep(0)
    for (i in seq(1, length(q), by=1)){
      y  <-  function(t)  {exp(-q[i]/(C*alfa)/(((1+zita)*  ZT_max-ZT_min)/365*2*t+ZT_min)-
z_min))/ zita*(((ZT_max-ZT_min)/365*2*t+ZT_min)-z_min)+ z_max-z_min)))}
      Integral_3 <- integrate (y,t_min_3,t_tilde_3)
      integrale_P_II_3[i]  <- Integral_3$value
    }
    P_II_3 <- 1-(exp(SM_star_3/(C*alfa)))/(t_tilde_3-t_min_3)*integrale_P_II_3
    P_Qam_3 <- exp(-lambda_star*(1-P_II_3))
  }

  return(P_Qam_3)} #output del modello: CDF
```

4. Metodo di aggregazione *k-means*

Script realizzato per l'implementazione del metodo k-means impostando i centroidi di primo tentativo pari alle curve medie dei gruppi ricavati empiricamente (vedi capitolo 5).

```
mean_curves<-read.table("means_curves6bacini.txt",header= TRUE)
clusters_curves<-read.table("6gruppi_mean_curve.txt",header= TRUE)

########## K-MEANS ANALYSIS IN 2 PARTI (uso come centroidi iniziali le 6 curve)
dati_completi<-read.table("5par_zmean.txt",header= TRUE)
dati_nocod<-dati_completi[,-1]
cod=dati_completi[,1]

normalize <- function(x) {
  return ((x - min(x)) / (max(x) - min(x)))
}
Z_mean<-normalize(dati_completi$Z_mean)
zita<-normalize(dati_completi$zita)
R<-normalize(dati_completi$P)
alfa<-normalize(dati_completi$alfa)
lambda<-normalize(dati_completi$lambda)
dati_col_norm<-data.frame(cbind(cod,Z_mean,zita,R,lambda,alfa))

zm<-cbind(cod,Z_mean,rep(1,137))
z<-cbind(cod,zita,rep(2,137))
r<-cbind(cod,R,rep(3,137))
a<-cbind(cod,alfa,rep(5,137))
l<-cbind(cod,lambda,rep(4,137))
TOT<-data.frame(rbind(zm,z,r,l,a))

#togliere alfa da dati_iniz e da cluster_curves perchè non voglio considerare alfa
nell'operazione
# di clustering
dati_iniz_norm_noalfa<-dati_iniz_norm[,-5] #dati normalizzati ma senza alfa
curves<-clusters_curves[,-5] #6 centroidi iniziali (mean curves) senza alfa
codice<-dati_col_norm[,1]

nclusters=6
# K-Means Cluster Analysis
fit <- kmeans(dati_iniz_norm_noalfa, centers=curves, nstart=100) # save cluster assignment
#fit <- kmeans(dati_iniz_norm, centers=curves, nstart=100) # save cluster assignment
res.cluster1 <- fit$cluster
res.cluster <- fit$cluster
res.cluster<-data.frame(res.cluster)
sort<-cbind(codice,dati_iniz_norm,res.cluster)

ris<-data.frame(rep(res.cluster1,5))
dati_kmeans_spaghetti<-cbind(TOT,ris)

dati_cluster_1<-subset(dati_kmeans_spaghetti, dati_kmeans_spaghetti[,4]==1)
dati_1<-data.frame(dati_cluster_1[,-4])
dati_cluster_2<-subset(dati_kmeans_spaghetti, dati_kmeans_spaghetti[,4]==2)
dati_2<-data.frame(dati_cluster_2[,-4])
dati_cluster_3<-subset(dati_kmeans_spaghetti, dati_kmeans_spaghetti[,4]==3)
dati_3<-data.frame(dati_cluster_3[,-4])
dati_cluster_4<-subset(dati_kmeans_spaghetti, dati_kmeans_spaghetti[,4]==4)
dati_4<-data.frame(dati_cluster_4[,-4])
dati_cluster_5<-subset(dati_kmeans_spaghetti, dati_kmeans_spaghetti[,4]==5)
dati_5<-data.frame(dati_cluster_5[,-4])
dati_cluster_6<-subset(dati_kmeans_spaghetti, dati_kmeans_spaghetti[,4]==6)
dati_6<-data.frame(dati_cluster_6[,-4])
```

5. Metodo di aggregazione gerarchica di Ward

Script realizzato per l'implementazione del metodo di Ward. Facendo girare il seguente codice è possibile ottenere il dendrogramma di cluster e impostare le soglie di taglio di tale dendrogramma per ottenere la suddivisione in gruppi (vedi capitolo 5, §5.3).

```
dati_col<-read.table("5par_zmean.txt",header= TRUE)

# NORMALIZZO I PARAMETRI (0-1)
normalize <- function(x) {
  return ((x - min(x)) / (max(x) - min(x)))
}
Z_mean<-normalize(dati_col$Z_mean)
zita<-normalize(dati_col$zita)
R<-normalize(dati_col$P)
alfa<-normalize(dati_col$alfa)
lambda<-normalize(dati_col$lambda)

zm<-cbind(cod,Z_mean,rep(1,137))
z<-cbind(cod,zita,rep(2,137))
r<-cbind(cod,R,rep(3,137))
a<-cbind(cod,alfa,rep(5,137))
l<-cbind(cod,lambda,rep(4,137))

dati_norm<-data.frame(cbind(cod,Z_mean,zita,R,lambda,alfa))
dati_col_norm<-data.frame(rbind(zm,z,r,l,a))

# WARD clustering
x<-dati_norm[,-1]
x<-x[,-5]
data<-x

criteria <- CHCriterion(data, kmax = 10,
                        clustermethod = "hclust", method = "ward.D")
criteria$data
criteria$plot

row.names(x)<-nomi
# Dissimilarity matrix
dist <- dist(x, method = "euclidean")
hc<-hclust(dist, method = "ward.D")

plot(hc, labels = NULL,  hang = -0.8, cex = 0.6,
     main = "Cluster dendrogram", sub = NULL,
     xlab = NULL, ylab = "Height")

# Define nodePar
hcd <- as.dendrogram(hc)
nodePar <- list(lab.cex = 0.8, pch = c(NA, 19),
                cex = 0.4, col = "red")
# Customized plot; remove labels
plot(hcd, ylab = "Height", nodePar = nodePar, leaflab = "none")


sub_grp <- cutree(hc, k = 6) # definizione del numero di cluster k
dat<-cbind(dati_norm,sub_grp)
```

6. CHIndex e WSS

Funzioni per il calcolo del valore di k, numero di cluster, ottimale. Tali indici sono stati applicati nell'ambito della clustering analysis riportata al capitolo 5.

Fonte: https://github.com/ethen8181/machine-learning/blob/master/clustering_old/clustering/clustering_functions.R

```
# ------------------------------------------------------------------------------------
#### Choosing the right k for clustering
library(dplyr)
library(tidyr)
library(ggplot2)

## method 1. WSS :compute the total within sum square error, this measures how close
#  are the points in a cluster to each other

# [Distance] : calculates the sum squared distance of a given cluster of points,
#              note that "sum squared distance" is used here for measuring variance
Distance <- function(cluster)
{
  # the center of the cluster, mean of all the points
  center <- colMeans(cluster)

  # calculate the summed squared error between every point and
  # the center of that cluster
  distance <- apply( cluster, 1, function(row)
  {
    sum( ( row - center )^2 )
  }) %>% sum()

  return(distance)}

# calculate the within sum squared error manually for hierarchical clustering
# [WSS] : pass in the dataset, and the resulting groups(cluster)
WSS <- function( data, groups )
{
  k <- max(groups)

  # loop through each groups (clusters) and obtain its
  # within sum squared error
  total <- lapply( 1:k, function(k)
  {
    # extract the data point within the cluster
    cluster <- subset( data, groups == k )

    distance <- Distance(cluster)
    return(distance)
  }) %>% unlist()

  return( sum(total) )}

# testing
# sum_squared_error <- WSS( data = mtcars_scaled, groups =  groups )

# this value will will decrease as the number of clusters increases,
# because each cluster will be smaller and tighter.
# And the rate of the decrease will slow down after the optimal cluster number


## method 2 : Calinski-Harabasz index, ratio of the between cluster variance
#                     to the total within cluster variance
# http://www.mathworks.com/help/stats/clustering.evaluation.calinskiharabaszevaluation-class.html
```

```
# TSS (total sum of square) : the squared distance of all the data points from
# the dataset's centroid

# BSS (between sum of square) = TSS - WSS, measures how far apart are the clusters
# from each other
# !! a good clustering has a small WSS and a high BSS

# CHIndex = B / W, the ratio should be maximized at the optimal k
# B = BSS(k) / (k-1) ; k = # of cluster
# W = WSS(k) / (n-k) ; n = # of data points

# [CHCriterion] : calculates both Calinski-Harabasz index and within sum squared error
# @kmax          = maximum cluster number, caculates the CH index from 2 cluster to kmax
# @clustermethod = "kmeanspp", "hclust"

CHCriterion <- function( data, kmax, clustermethod, ...  )
{
  if( !clustermethod %in% c( "kmeanspp", "hclust" ) )
    stop( "method must be one of 'kmeanspp' or 'hclust'" )

  # total sum squared error (independent with the number of cluster k)
  tss <- Distance( cluster = data )

  # initialize a numeric vector storing the score
  wss <- numeric(kmax)

  # k starts from 2, cluster 1 is meaningless
  if( clustermethod == "kmeanspp" )
  {
    for( k in 2:kmax )
    {
      results <- Kmeanspp( data, k, ... )
      wss[k]  <- results$tot.withinss
    }
  }else # "hclust"
  {
    d <- dist( data, method = "euclidean" )
    clustering <- hclust( d, ... )
    for( k in 2:kmax )
    {
      groups <- cutree( clustering, k )
      wss[k] <- WSS( data = data, groups =  groups )
    }
  }
# between sum of square
  bss <- tss - wss[-1]

  # cluster count start from 2!
  numerator <- bss / ( 1:(kmax-1) )
  denominator <- wss[-1] / ( nrow(data) - 2:kmax )

  criteria <- data.frame( k = 2:kmax,
                          CHIndex = numerator / denominator,
                          wss = wss[-1] )

  # convert to long format for plotting
  criteria_long <- gather( criteria, "index", "value", -1 )

  plot <- ggplot( criteria_long, aes( k, value, color = index ) ) +
    geom_line() + geom_point( aes( shape = index ), size = 3 ) +
    facet_wrap( ~ index, scale = "free_y" ) +
    guides( color = FALSE, shape = FALSE )

  return( list( data = criteria,
                plot = plot ) )}
```