

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

DICAM

TESI DI LAUREA

in
Modellistica Idrologica

**REGIME DEI DEFLUSSI IDRICI IN ALTO ADIGE:
ANALISI REGIONALE E RICERCA DI POSSIBILI TREND**

CANDIDATO:
Giovanni Narda

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Attilio Castellarin

CORRELATORE:
Prof. Ing. Alberto Pistocchi

Anno Accademico 2010/11

Sessione III

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1	
CURVE DI DURATA DELLE PORTATE	4
1.1 Definizione ed interpretazione.....	4
1.2 Costruzione delle curve sperimentali.....	8
1.3 Principali impieghi ingegneristici.....	13
CAPITOLO 2	
AREA DI STUDIO.....	26
2.1 Bacini considerati	28
2.2 Dati idrometrici.....	30
CAPITOLO 3	
SISTEMA INFORMATIVO TERRITORIALE.....	33
3.1 Dati reperiti	33
3.1 Descrittori geomorfologici e climatici di bacino	36
CAPITOLO 4	
MODIFICHE DELLE CURVE DI DURATA ANNUALI SPERIMENTALI NEL PERIODO 1990-2009.....	39
4.1 Calcolo della precipitazione media annuale a scala di bacino.....	39
4.2 Curva di durata adimensionale (<i>DAFDC</i>)	41
4.3 Analisi delle variazioni geometriche della <i>DAFDC</i>	43
4.4 Discussione dei risultati	47
CAPITOLO 5	
MODELLO REGIONALE PER LA STIMA DELLA CURVA DI DURATA ANNUALE	52
5.1 Cluster Analysis.....	54

Indice

5.2 Stepwise Regression Analysis	59
5.3 Validazione jack-knife	62
5.4 Discussione dei risultati	64
CONCLUSIONI	68
APPENDICE	72
BIBLIOGRAFIA	107

INTRODUZIONE

L'obiettivo del presente lavoro di Tesi è quello di analizzare una serie di bacini idrografici altoatesini con lo scopo di realizzare un modello regionale che permetta di costruire la *Curva di Durata delle Portate* per quei bacini di cui non si dispongono informazioni (non strumentati) ed inoltre verificare possibili variazioni dell'assetto idrologico avvenuti nell'ultimo ventennio, dal 1990 al 2009, in seguito a vari fattori quali potrebbero essere cambiamenti climatici o fattori antropici ecc.

Le curve di durata delle portate sono strumenti grafici molto utili in diversi campi dell'idrologia tecnica e altri campi che possono essere correlati all'idrologia; esse sono facili da realizzare e semplici da capire: descrivono la relazione esistente tra l'intensità e la frequenza della portata in una determinata sezione fluviale. Le curve di durata forniscono una stima della percentuale di tempo nella quale una data portata viene eguagliata o superata durante il periodo di osservazione o di riferimento (ad esempio un anno).

Le curve di durata delle portate rivestono un importante ruolo nel campo della gestione delle risorse idriche e, più in generale, dell'ingegneria idraulica.

Esse infatti permettono di condensare molteplici informazioni di natura idrologica in un unico grafico e proprio per questo motivo sono diversi gli studi che prevedono il loro utilizzo, a partire dalle applicazioni tradizionali quali analisi sulla realizzabilità di impianti per la produzione di energia idroelettrica, definizione del deflusso minimo vitale (*DMV*) che deve essere garantito per la sopravvivenza dell'ecosistema fluviale, controllo della qualità delle acque, analisi del carico inquinante negli impianti di trattamento delle acque di scarico, analisi di frequenza delle piene e valutazione dei danni prodotti da quest'ultime.

L'interpretazione delle curve di durata delle portate proposta recentemente dalla letteratura scientifica ha inoltre consentito l'estensione del loro utilizzo ad altri studi, quali ad esempio quelli sull'approvvigionamento idrico o sull'analisi dei trend idrologici dovuti a cambiamenti climatici, cambiamenti dell'uso del suolo, derivazioni di corsi d'acqua e in generale tutta una serie di fattori antropici; l'analisi

dei trend idrologici è oggetto tra l'altro della presente Tesi come già osservato all'inizio di questa introduzione.

Il primo capitolo descrive quindi alcuni cenni teorici relativi alla curva di durata delle portate dandone una definizione, diverse possibili interpretazioni, fornendo notizie utili sulla loro costruzione e descrivendo più in dettaglio alcuni tra i principali impieghi ingegneristici.

Nel secondo capitolo si vuole descrivere l'area di studio dal punto di vista geografico, introducendo i bacini che sono stati presi in esame durante lo svolgimento di questo studio e che ricoprono gran parte del territorio dell'Alto Adige. Per ognuno di questi bacini sono stati analizzati i relativi dati idrometrici forniti dall'Istituto Idrografico di Bolzano necessari alla costruzione delle Curve di Durata.

Oltre ai valori di portata media giornaliera si sono reperiti altre informazioni necessarie alla costruzione di un modello regionale per la stima delle portate in bacini non strumentati tra le quali: i valori di precipitazione media annua, il Modello Digitale delle Quote del terreno (*DEM*), la durata della copertura nivale (*SCD*, *Snow Cover Duration*), la copertura di area forestata. Tutte queste informazioni sono state necessarie ai fini della determinazione dei parametri geomorfologici e climatici di bacino, come descritto nel terzo capitolo.

Il quarto capitolo è rivolto alla scoperta di eventuali variazioni del regime dei deflussi idrici dei corsi d'acqua considerati nel periodo compreso tra il 1990 e il 2009 senza indagare sulle possibili cause di queste eventuali modifiche.

L'analisi si basa su un test statistico non parametrico basato a sua volta sulla stima della cosiddetta "pendenza di Sen" (*Sen*, 1968) e quindi, in maniera molto semplificata, sul segno di questa pendenza: un segno positivo indica un trend crescente mentre un segno negativo al contrario un trend decrescente.

Naturalmente il test, come tutti i test statistici, è caratterizzato da un certo livello di significatività che nel caso in esame risulta del 10%.

L'ultimo capitolo descrive la tecnica adottata per costruire il modello regionale di stima delle curve di durata delle portate mediane, basata su una suddivisione dei bacini in classi omogenee effettuata secondo una procedura di "clusterizzazione" basata sulla distanza tra le varie *AFDC* (*cluster analysis*) e, sulla base di questa

suddivisione, sull'adozione di un modello multiregressivo funzione dei parametri geomorfologici e climatici stimati e che meglio rappresentano i bacini considerati (*stepwise regression analysis*).

Capitolo 1

CURVA DI DURATA DELLE PORTATE

1.1 Definizione e interpretazione

La *Curva di Durata delle Portate* rappresenta uno degli strumenti grafici fra i più significativi e di più ampio utilizzo operativo per valutare l'entità della risorsa idrica attesa in una sezione fluviale; permette di rappresentare in maniera completa e compatta l'intero campo di variazione delle portate (*Smakhtin, 2001*).

Essa può essere costruita utilizzando valori di portata orari, giornalieri, mensili o relativi ad altri intervalli temporali di riferimento, anche se la maggior parte delle applicazioni ingegneristiche delle curve di durata si avvale dei valori giornalieri.

La curva di durata esprime infatti nella maggior parte dei casi la relazione tra i valori osservati delle portate medie giornaliere ed il numero di giorni in cui tali valori sono superati o eguagliati nell'arco del generico anno.

È tuttavia consuetudine nella pratica idrologica esprimere tale curva in una scala adimensionale dividendo la durata per 365, in modo da avere in ascisse la percentuale d dei giorni dell'anno in cui la portata è uguagliata o superata, e in ordinata la portata divisa per la portata media del corso d'acqua (Q_m). In questo modo è possibile confrontare le curve di durata di corsi d'acqua molto diversi tra loro.

In particolare la Figura 1.1 rappresenta le curve di durata tipiche di tre diversi tipi di corsi d'acqua: la prima (a) caratterizza un corso d'acqua a regime torrentizio con lunghi periodi di secca, in cui la portata massima è molto elevata rispetto alla portata media (es. fiume calabre), valore che si abbassa notevolmente nella seconda figura (b), che caratterizza un comportamento più regolare con brevi periodi di secca (es.

bacini alpini) e soprattutto nell'ultima (c) che caratterizza un fiume di grandi dimensioni a regime permanente (es. fiume Po).

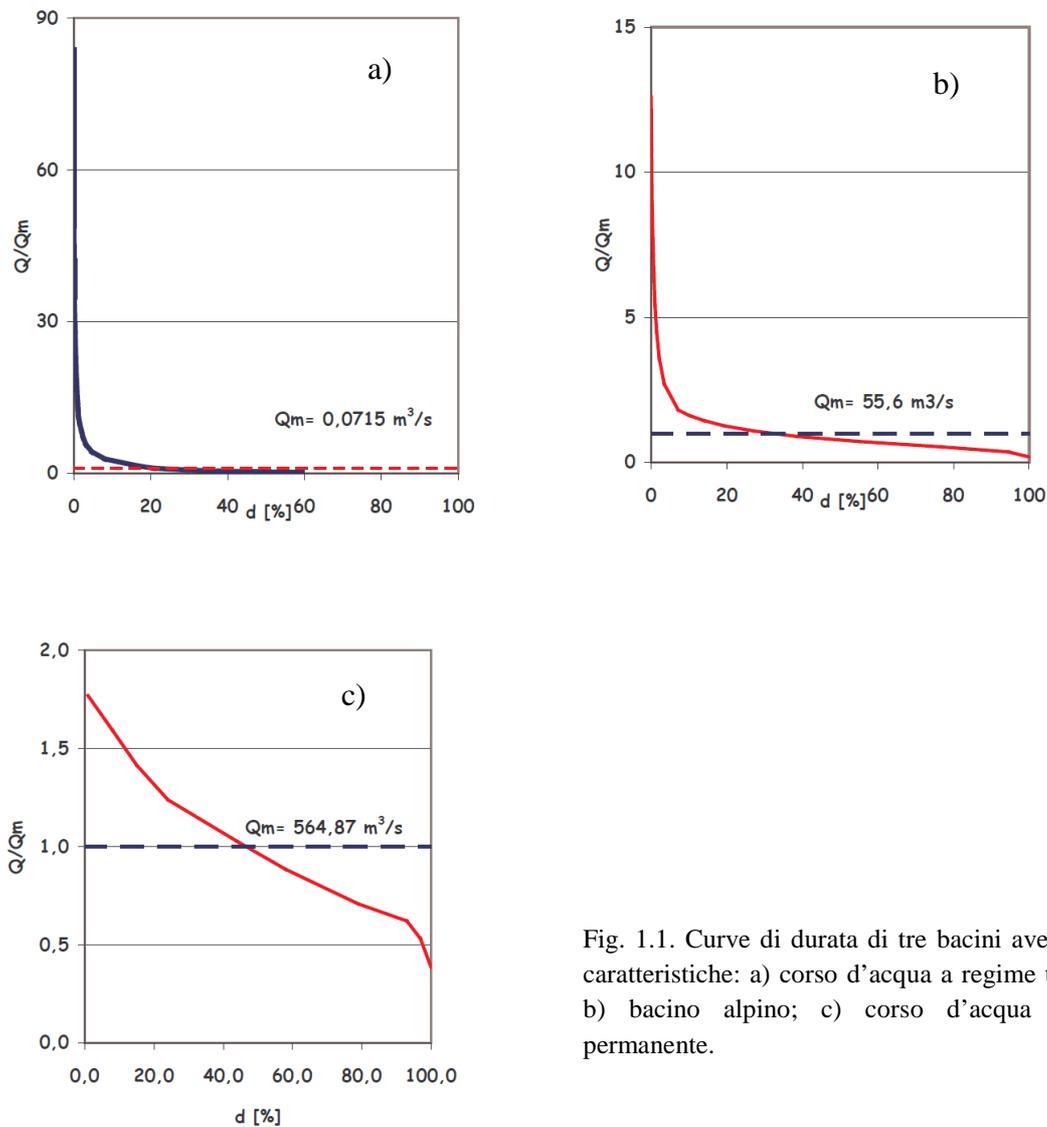


Fig. 1.1. Curve di durata di tre bacini aventi diverse caratteristiche: a) corso d'acqua a regime torrentizio; b) bacino alpino; c) corso d'acqua a regime permanente.

I tratti iniziali delle curve di durata sono quelli di interesse per le analisi di piena mentre i tratti terminali sono ovviamente quelli di interesse per le analisi di magra.

Come si può notare dalle figure, spesso la presenza delle portate massime determina un andamento piuttosto appiattito e poco visibile del ramo inferiore della curva. Per avere una maggiore visibilità e quindi facilitare la lettura della curva è possibile passare ad una rappresentazione logaritmica.

La rappresentazione in scala semilogaritmica consente di avere un intervallo di variabilità della portata più ristretto rispetto alla rappresentazione in scala naturale, ciò comporta un certo appiattimento della curva di durata e una migliore visualizzazione del ramo della curva relativo alle alte durate, risultato molto importante per esempio per quegli studi che pongono la loro attenzione proprio sulle portate di magra, come ad esempio uno studio sull'approvvigionamento idrico. Comporta però anche il fatto di non poter riportare le portate nulle sul grafico, potendo l'argomento del logaritmo essere solo strettamente positivo per ovvie ragioni matematiche.

In letteratura sono noti due diversi approcci per interpretare la curva di durata delle portate a seconda del periodo di tempo che si prende come riferimento:

1. Un primo approccio consiste nel considerare contemporaneamente tutti i valori osservati nell'intero periodo di rilievo disponibile (*POR – Period of Record*) e costruire un'unica curva di durata definita *Curva di Durata Totale* indicata mediante la sigla *FDC*, acronimo inglese di "*Flow Duration Curve*";
2. Il secondo approccio, descritto da *LeBoutillier e Waylen (1993)*, *Vogel e Fennessey (1994)*, consiste invece nel ricavare la curva di durata di ciascun anno (*AFDC, Annual Flow Duration Curve*) e poi nel mediarle per ricavare un'unica curva di durata caratteristica dell'andamento delle portate in un anno "tipico" ma ipotetico per la sezione in esame.

Da quanto appena detto si può dedurre che l'andamento delle curve di durata totali può fortemente variare in funzione del particolare periodo di osservazione adottato perché i dati di portata registrati possono essere anche molto differenti da un periodo all'altro. Questo vale soprattutto per il ramo inferiore della curva, estremamente sensibile ai valori idrologici minimi registrati. Più in generale, tali curve sono fortemente influenzate dalle situazioni estreme (periodi secchi o periodi umidi) che si verificano nel corso dell'intervallo temporale preso a riferimento. Inoltre non consentono di individuare le variazioni stagionali dei deflussi. Tale interpretazione risulta quindi assai utile nel caso in cui il campione è abbastanza ampio da fornire i valori "limite" della distribuzione di portate (massimi e minimi assoluti di portata).

Qualora si utilizzi come metodo di indagine l'approccio *AFDC*, la maggior parte degli studi non consiglia di utilizzare la curva media annuale di durata per caratterizzare il comportamento idrologico medio del periodo di osservazione (*Smakhtin*, 2001). Per tale finalità è infatti suggerita come più rappresentativa la curva di durata mediana; a quest'ultima curva è infatti associabile un chiaro significato fisico in quanto il generico valore Q_d definisce la portata di durata d che viene in media raggiunta e superata un anno ogni due.

Tuttavia nella pratica non vi sono differenze notevoli tra le due curve e questo è dovuto soprattutto al fatto che per alcune sezioni si dispongono di pochi anni di osservazione con deflussi annuali molto simili tra di loro oppure si dispongono di molti anni di osservazione ma che non presentano fenomeni di rilievo durante l'intero periodo di osservazione. In virtù di questa somiglianza in genere viene preferita la costruzione e l'utilizzo della curva media annuale di durata in quanto il suo andamento può sembrare molto più regolare rispetto alla mediana. Questa differenza è facilmente comprensibile se si considera come vengono mediati i dati di portata per ottenere le due curve, procedimento che verrà descritto nel seguente paragrafo.

Ovviamente a tali curve non corrispondono valori di portata effettivamente misurati, poiché media e mediana non individuano necessariamente valori sperimentali e non rappresentano quindi un andamento reale del bacino esaminato (per questo motivo si parla di anno ipotetico).

Questa nuova interpretazione consente però di ovviare ai difetti propri delle curve di durata totali e risulta pertanto molto più vantaggiosa per diverse applicazioni in ambito idrologico.

Utilizzando le curve di durata annuali si perdono informazioni importanti quali i valori massimi e minimi assoluti di portata (che ora corrispondono ai valori medi di tutti i massimi e di tutti i minimi osservati); è possibile però individuare eventuali caratteristiche stagionali dei regimi fluviali ed eventuali periodi di alte o basse portate che si verificano nell'arco di un anno. Inoltre tali curve non sono influenzate dai periodi secchi o umidi che possono caratterizzare gli N anni di osservazione.

1.2 Costruzione delle curve sperimentali

Per costruire la curva di durata delle portate risulta fondamentale un lungo periodo di osservazione, indicato con parecchie decine di anni. Essa si deriva dall'andamento cronologico delle portate (Fig.1.2); ai fini ingegneristici generalmente si considerano le portate giornaliere, come già osservato.

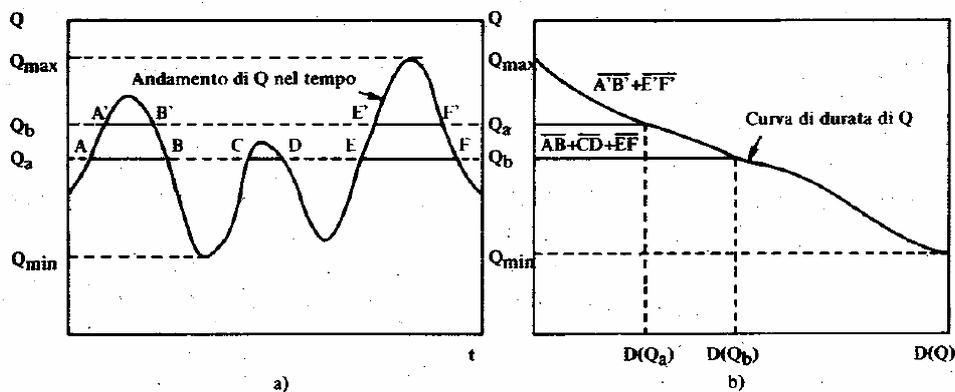


Fig. 1.2. Andamento cronologico delle portate

CURVA DI DURATA TOTALE

La curva *FDC* si costruisce disponendo in ordine decrescente tutti i valori osservati raccolti in un unico campione. È stato già ricordato come fosse consuetudine nella pratica idrologica esprimere tale curva in una scala adimensionale in modo da avere in ascisse la percentuale delle durate e in ordinata la portata divisa per la portata media del corso d'acqua.

La durata in termini percentuali può essere interpretata come una misura della probabilità di superamento del corrispondente valore di portata e la curva di durata come una funzione di distribuzione di probabilità (in questo caso di superamento) delle portate medie giornaliere.

Ricordiamo dalla statistica che la probabilità di non superamento di un determinato valore x è una funzione di x che viene detta funzione di probabilità cumulata (*CDF*, *Cumulative Distribution Function*), adimensionale:

$$CDF = F_X(x) = \text{prob}(X \leq x)$$

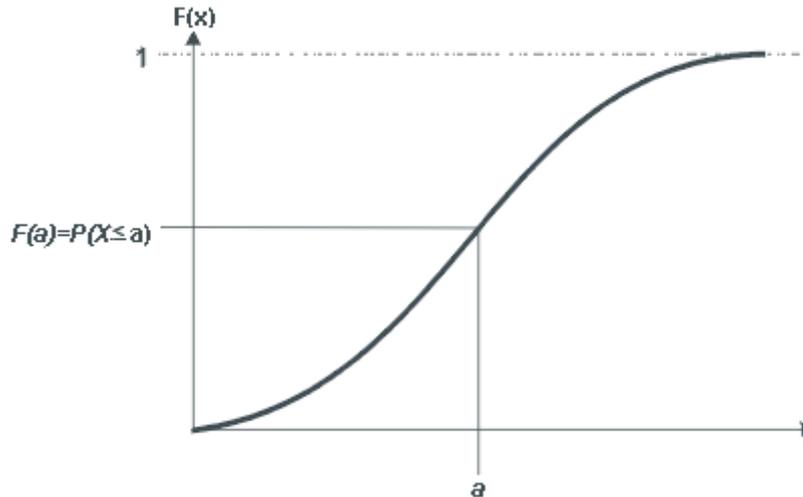


Fig 1.3. Funzione di probabilità cumulata

Con riferimento a quest'ultima lettura della curva di durata, se si definisce con Q la generica variabile casuale rappresentativa della portata media giornaliera, la probabilità che Q sia minore ad un generico valore q si può scrivere come:

$$CDF : F_Q(q) = \text{prob}(Q < q)$$

Si definisce quindi la curva di durata delle portate come:

$$F_{QD}(q) = \text{prob}(Q \geq q) = 1 - F_Q(q)$$

La stima di $F_{QD}(q)$ può essere effettuata ricorrendo a metodi parametrici o metodi non parametrici. L'approccio mediante metodi parametrici consiste nella definizione di una forma matematica parametrica della distribuzione di probabilità e nel successivo adattamento di tale distribuzione ai dati osservati mediante la stima dei valori dei parametri che in essa compaiono.

I metodi non parametrici consentono la stima di $F_{QD}(q)$ senza fare alcuna ipotesi sulla sua forma matematica ma solo definendo degli stimatori empirici dei quantili. In generale questi stimatori si basano su combinazioni dei dati osservati in funzione della loro posizione della serie ordinata.

Nel seguente lavoro si è usata la *Plotting Position di Weibull (WPP)* per stimare la $F_{QD}(q)$, per tanto con riferimento ad un campione di N valori non nulli, la durata d_i , ovvero il generico valore della probabilità di superamento risulta:

$$d_i = \frac{i}{N+1}$$

e la relativa portata è:

$$q(d_i) = Q_d \equiv q_i$$

dove con q_i si è indicato l' i -esimo valore di portata giornaliera nella serie ordinata in senso decrescente e con $i=1, 2, \dots, N$.

CURVA DI DURATA ANNUALE

La procedura per costruire la *AFDC* è simile, ma in pratica viene costruita una curva di durata per ciascun anno stimata mediante un approccio non parametrico.

A partire da tale campione di curve è possibile quindi derivare la stima di curve di durata di specifico interesse, quali ad esempio la *AFDC mediana* relativa all'anno "medio" o "tipico", o la fascia fiduciaria di assegnata probabilità attorno alla *AFDC mediana (curve percentili)*, intervallo che permette di quantificare la variabilità delle portate osservate durante l'anno (fig. 1.4).

Dalle *AFDC* così ottenute si può poi calcolare il valore medio delle portate che risultano da ognuna di queste per una prefissata durata ottenendo quella che è indicata come *Curva Media Annuale delle Durate*.

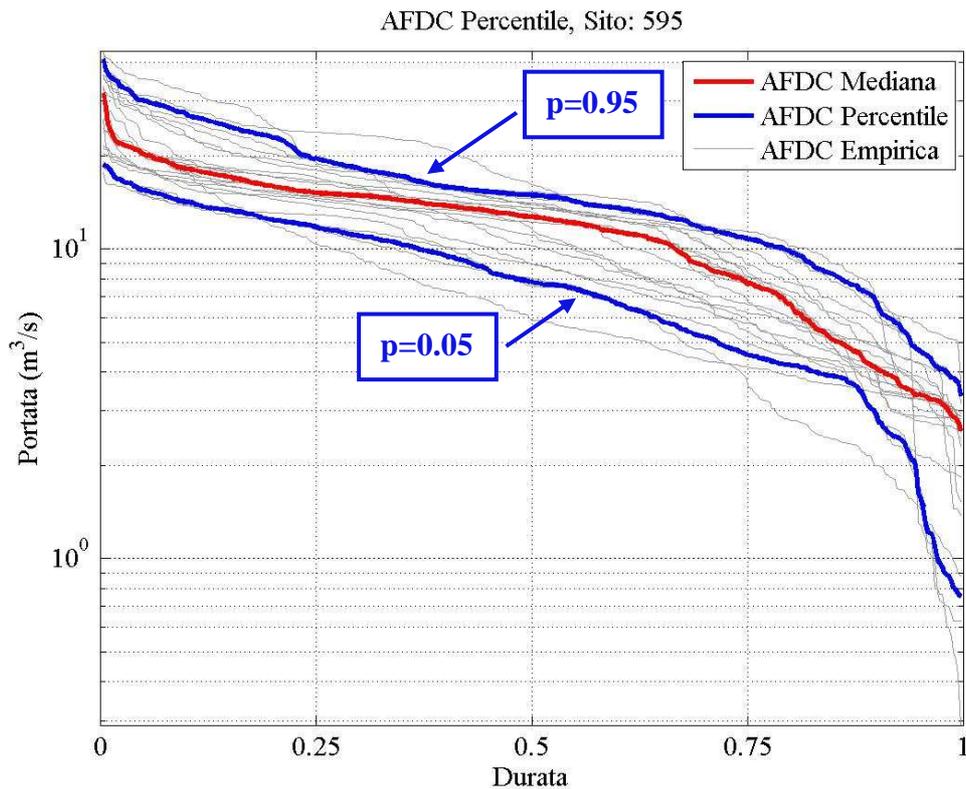


Fig. 1.4. Curve di durata annuali, mediana, e percentili al 5% e al 95%

Ipotizzando di avere a disposizione N anni di osservazione, la curva mediana è ottenuta associando ad ogni passo di durata relativa il valore mediano tra gli N valori di portata corrispondenti a quella durata, cioè il valore di portata osservato $q_{i,j}$ che occupa la posizione centrale nel campione di N dati ordinato in maniera decrescente relativo a quella durata. Il valore mediano riferito alla durata relativa d_i rappresenta quindi quella portata che è stata superata il 50% delle volte; il valore mediano delle durate attigue può anche essere molto differente dal valore precedente, per questo motivo l'andamento della curva mediana risulta più irregolare rispetto a quello della curva media.

La curva media è invece ottenuta associando ad ogni passo di durata relativa la media statistica degli N valori di portata corrispondenti a quella durata; indicando con d_i la i -esima durata, la portata media Q_i associata a tale durata è ottenuta come:

$$Q_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N q_{i,j}$$

dove $q_{i,j}$ è la portata corrispondente alla durata d_i osservata nell'anno j . La curva che si ottiene con questo procedimento presenta un andamento piuttosto regolare in quanto le differenze di valore tra le portate corrispondenti a durate attigue risultano alquanto ridotte.

Le due metodologie di costruzione della curva di durata, *FDC* e *AFDC*, conducono peraltro a stime di Q_d significativamente diverse; in particolare il metodo della *FDC* produce curve caratterizzate da una maggior variabilità, soprattutto nella zona delle durate più elevate, cioè delle portate di magra, mentre la metodologia *AFDC* produce curve di durata più “smussate” verso gli estremi proprio per l'effetto di media esteso ai vari anni e, soprattutto nel caso di campioni di limitata numerosità, è meno influenzata da periodi di campionamento caratterizzati da portate in alveo particolarmente elevate o particolarmente basse.

D'altra parte l'approccio mediante la curva *FDC* rappresenta un'applicazione usuale nella pratica idrologica e, diversamente dall'*AFDC*, può essere utilizzato per la generazione di serie sintetiche da utilizzare nel contesto degli studi idrologici.

Poiché uno degli obiettivi di interesse della presente tesi è quello di definire una procedura regionale tramite cui costruire la curva di durata per un generico bacino di cui non si hanno informazioni, si farà riferimento alla *Curva Annuale delle Durate Mediana*.

1.3 Principali impieghi ingegneristici

Una curva di durata delle portate fornisce, come già specificato nel paragrafo precedente, una stima della percentuale di tempo nella quale una data portata viene eguagliata o superata durante l'intero periodo di osservazione.

Come si può leggere da *Vogel e Fennessey* (1995), le curve di durata delle portate riassumono il vecchio proverbio cinese “un'immagine vale più di mille parole”, data la loro abilità a riunire un gran numero di informazioni idrologiche in un unico grafico e data la loro semplicità di uso, di interpretazione e comprensione.

Sono diversi gli impieghi ingegneristici in cui viene usato questo potente strumento grafico, tant'è che ancora oggi, nonostante la sua introduzione sia tutt'altro che recente, non esiste in letteratura un testo, un articolo, una rivista che li raccolga tutti.

Probabilmente le prime applicazioni riguardano la valutazione economica della capacità di produzione di energia idroelettrica di un impianto (*Hickox e Wessenauer*, 1933; *Searcy*, 1959; *Warnick*, 1984).

In questo paragrafo si vuole fare una sintesi di alcuni principali impieghi della *FDC* a partire dagli studi relativi alla gestione delle risorse idriche, come ad esempio l'approvvigionamento idrico, la produzione di energia idroelettrica come accennato prima, la definizione del deflusso minimo vitale, fino al controllo della qualità delle acque, analisi del carico inquinante negli impianti di trattamento delle acque di scarico, fino ancora all'analisi di frequenza delle piene, valutazione dei danni prodotti dalle piene ed infine l'analisi dei trend, aspetto tra l'altro oggetto di questo lavoro di tesi, dovuti ai cambiamenti climatici o di uso del suolo o agli effetti della vegetazione.

CURVE DI DURATA DEGLI INDICATORI DI RISORSA IDRICA

Una Curva di Durata dell'Indicatore di Risorsa Idrica (*Water Resource Index Duration Curve*) è definita come la relazione che descrive la probabilità di superamento di un particolare indicatore preso come riferimento quale potrebbe essere la potenza prodotta da un impianto idroelettrico, il volume di sedimenti trasportato dalla corrente fluviale, la concentrazione media di inquinanti ecc.

La Figura 1.5 mostra come si costruisce una curva di questo tipo: la relazione esistente tra le portate misurate in una determinata sezione e l'indicatore scelto viene descritta in base alla cosiddetta Curva Caratteristica (*Rating Curve*) che combinata con una curva di durata delle portate relativa alla stessa sezione permette di produrre la curva di durata dell'indicatore di interesse.

Ovviamente l'accuratezza della curva risultante dipende dall'accuratezza delle curve che vengono combinate insieme.

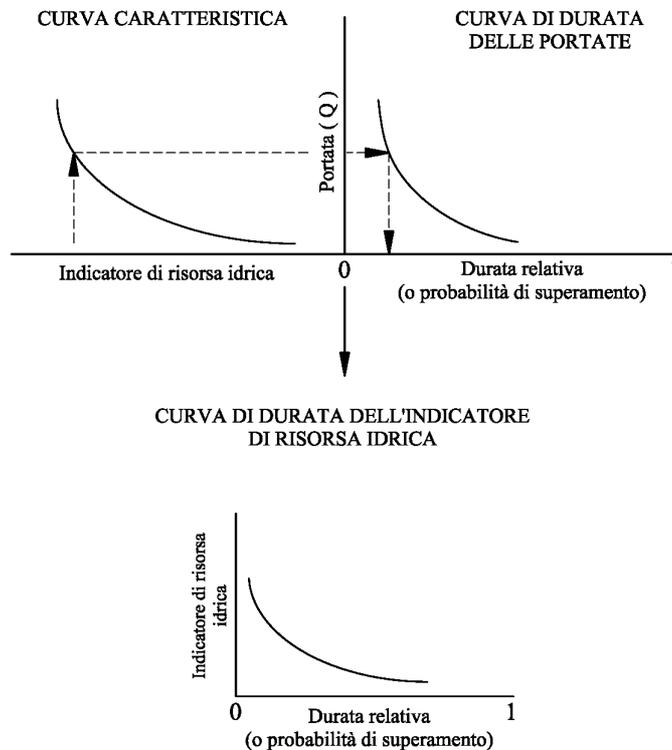


Fig.1.5. Costruzione della curva di durata dell'indicatore di risorsa idrica

L'interpretazione di una curva di durata dell'indicatore di risorsa idrica dipende dalla metodologia utilizzata per costruirla. Ad esempio, se si utilizza la mediana delle curve di durata annuali, allora la risultante curva di durata dell'indicatore di risorsa idrica rappresenta la probabilità di superamento dell'indicatore scelto durante un ipotetico anno "tipico" o mediano per la sezione in esame.

ANALISI SULLA FATTIBILITÀ DI IMPIANTI PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA IDROELETTRICA

Le curve di durata sono di solito utilizzate negli studi di fattibilità di impianti idroelettrici per definire le manovre idrauliche di controllo dei deflussi per gli impianti ad acqua fluente. Esse, peraltro, possono anche essere impiegate per identificare la quantità d'acqua che è opportuno invasare durante i periodi di bassa produttività per gli impianti con una modesta capacità di invaso giornaliera, per sopperire alla richiesta nei periodi in cui essa raggiunge valori di picco (*Palmer e Duder, 1990*).

La Figura 1.6 illustra la curva caratteristica che descrive la relazione esistente tra le portate Q misurate in una determinata sezione e la potenza P prodotta dall'impianto, costruita a partire dalla curva che descrive la relazione esistente tra il carico idraulico effettivo dell'impianto (*Effective Head, H*) e la portata.

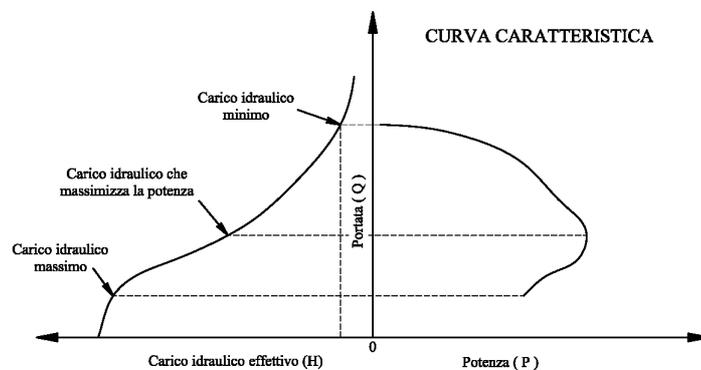


Fig. 1.6. Costruzione della curva caratteristica potenza-portata

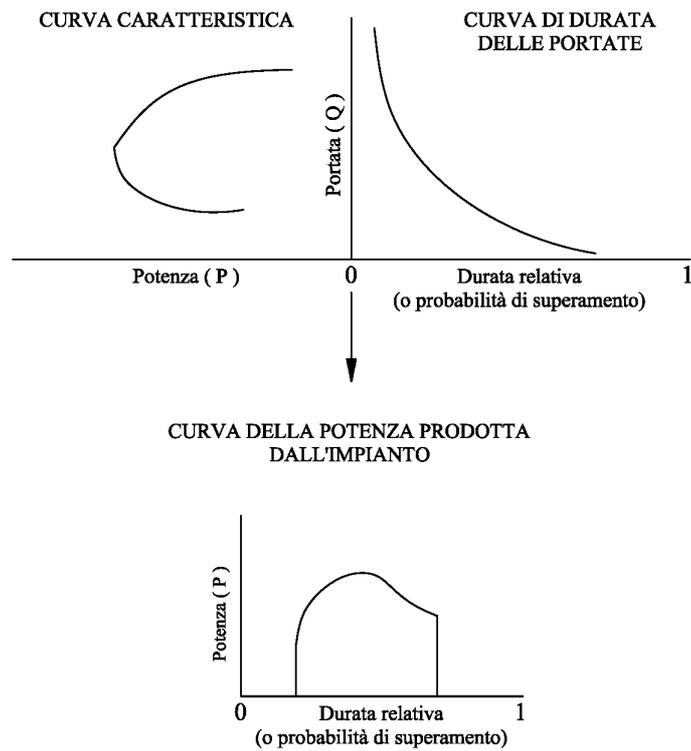


Fig. 1.7. Costruzione della curva di durata della potenza prodotta dall'impianto

Dalla combinazione della curva caratteristica potenza-portata e di una curva di durata delle portate si ricava la curva di durata della potenza prodotta dall'impianto (*Power Duration Curve*), come mostrato in Figura 1.7.

La curva di durata della potenza rappresenta la probabilità di superamento di vari livelli di potenza che l'impianto per la produzione di energia idroelettrica può raggiungere durante l'intero periodo di osservazione.

L'area sottesa dalla curva di durata della potenza rappresenta l'energia media annua o l'energia annua prodotta dall'impianto in un ipotetico anno "tipico" o mediano a seconda che si utilizzi una *FDC* o una *AFDC*.

VALUTAZIONE DEL DEFLUSSO MINIMO VITALE (DMV)

Recentemente, l'interesse per l'ambiente riguardo agli effetti dell'urbanizzazione sugli ecosistemi acquatici è cresciuto. La prospettiva attuale dell'ingegneria ambientale vede i corsi d'acqua come un complesso ecosistema in equilibrio dinamico e pianifica lo sfruttamento della risorsa idrica nel rispetto delle varie componenti del sistema naturale studiato e delle loro complesse relazioni. Spesso gli ingegneri vengono interpellati per definire i valori di deflusso minimo vitale necessario, ad esempio, per garantire la sopravvivenza delle specie ittiche che popolano un determinato corso d'acqua, determinati livelli di temperatura, di torbidità, determinate concentrazioni di sedimenti e in generale per conservare e preservare l'habitat acquatico esistente.

Al fine di salvaguardare e assicurare determinati valori di portata negli alvei dei fiumi, è necessario quantificare la quantità di acqua disponibile. Probabilmente l'approccio più largamente accettato e sicuramente il più diffuso negli USA è "l'*Instream Flow Incremental Method*" (IFIM), introdotto dal *Cooperative Instream Flow Group* del *Fish and Wildlife Service* degli USA (Milhous et al., 1990) e costituito da un insieme di modelli che possono prevedere cambiamenti nelle specie ittiche e in altri habitat dovuti a modifiche nel regime dei deflussi idrici del fiume considerato.

Una curva caratteristica che mette in relazione il grado di vivibilità (*Weighted Useable Habitat*) con la portata defluente nel corso d'acqua viene realizzata per una particolare specie durante un particolare stadio della sua vita. Questa curva caratteristica viene poi combinata con una curva di durata delle portate per ottenere una curva di durata del grado di vivibilità (*Habitat Duration Curve*), come rappresentato in Figura 1.8.

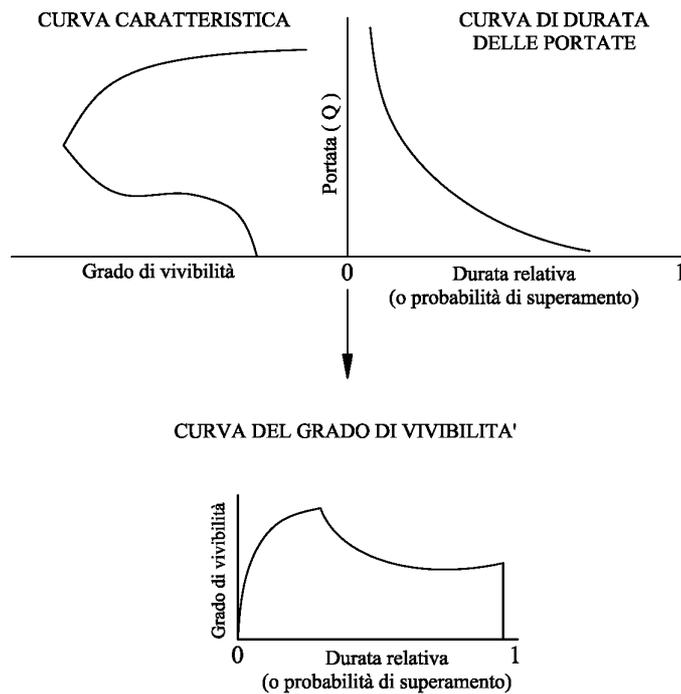


Fig. 1.8. Costruzione della curva del grado di vivibilità

CURVE DI DURATA NELLO STUDIO SULL'APPROVVIGIONAMENTO IDRICO

Il problema dell'approvvigionamento idrico e di come distribuire al meglio le risorse idriche disponibili è un problema sempre esistito e che, probabilmente, diverrà sempre più difficile da risolvere.

È possibile definire i migliori piani di distribuzione di acqua determinando le quantità d'acqua che si possono prelevare e assegnare ad ogni utenza attraverso l'utilizzo di funzioni di distribuzione cumulate, prendendo in considerazione il rapporto tra il grado di continuità nel tempo che deve essere garantito per i prelievi richiesti (Alaouze, 1991).

La Figura 1.9 illustra l'applicazione di una curva di durata delle portate per definire in che modo ripartire due prelievi di acqua (q_1 e q_2) che devono essere prelevati rispettivamente con una continuità temporale riferita all'anno pari a p_1 e pari a p_2 .

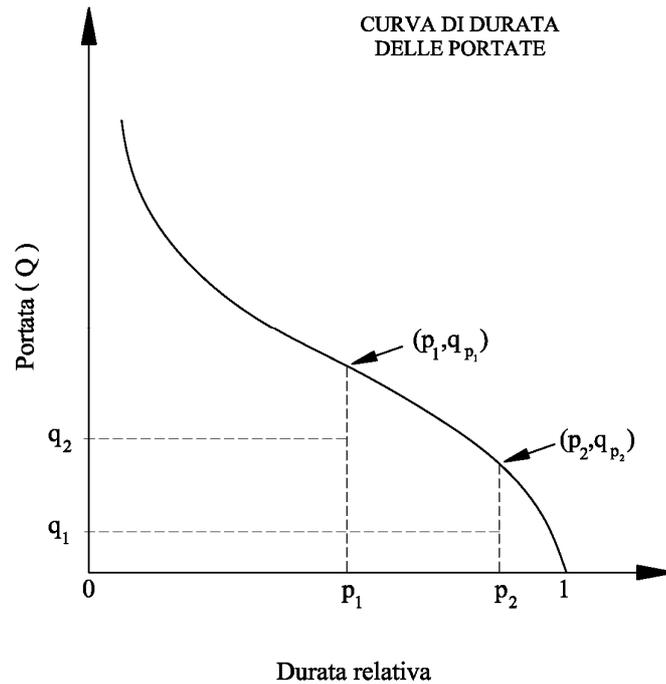


Fig. 1.9. Curva di durata delle portate che descrive la relazione esistente tra ogni valore di continuità del servizio p_i e il relativo prelievo massimo q_{pi}

Se venisse richiesto un solo prelievo per una durata complessiva pari a p_1 , tale quantità d'acqua dovrebbe essere pari a q_{p1} . Ogni ulteriore prelievo richiesto con continuità uguale o maggiore di p_1 è calcolato a partire da q_{p1} attraverso la seguente formula:

$$q_i = w_i \cdot q_{p1} \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, n$$

dove

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

In generale, per questo tipo di applicazione, la curva di durata delle portate descrive quindi la relazione esistente tra ogni valore di continuità del servizio p_i richiesto e il relativo prelievo massimo q_{pi} .

CONTROLLO DELLA QUALITÀ DELLE ACQUE

L'obiettivo principale dei vari piani di controllo della qualità delle acque è quello di mantenere un determinato livello di qualità per un certo periodo di tempo. *Searcy* (1959) propose una costruzione della curva di durata relativa a diversi parametri di qualità delle acque quali: carico di sedimenti, torbidità e durezza.

Procedendo allo stesso modo dei casi precedenti, definita una curva caratteristica in funzione di un determinato parametro scelto come indicatore, in combinazione con una curva di durata delle portate è possibile costruire una Curva di Durata dell'Indicatore della Qualità delle Acque (*Water Quality Index Duration Curve*) utile per determinare la frequenza con cui un determinato livello di qualità ambientale viene rispettato o meno, rappresentando la probabilità di superamento di ogni valore dell'indicatore di qualità su un determinato periodo di riferimento (fig. 1.10).

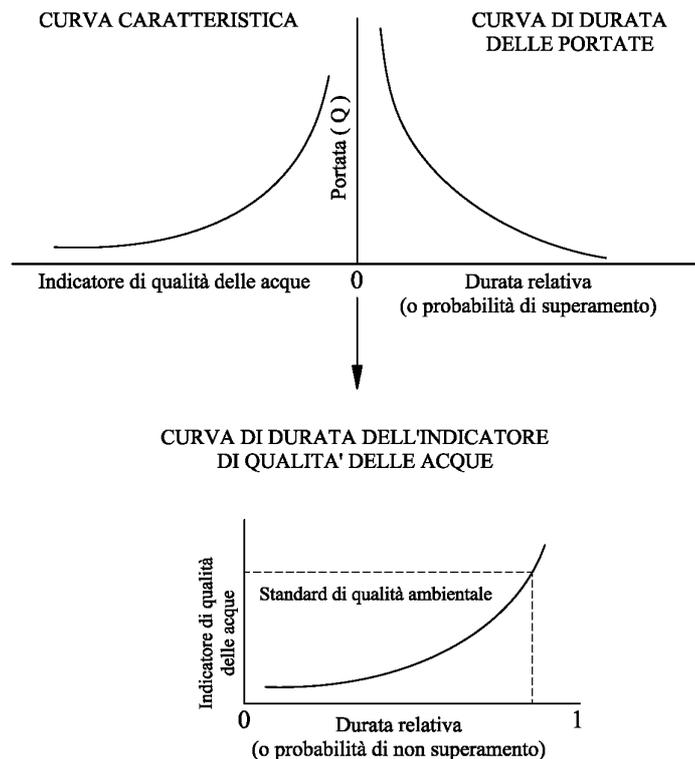


Fig. 1.10. Costruzione di una curva di durata dell'indicatore di qualità delle acque

Ma ad esempio, anche nella progettazione di impianti di trattamento delle acque di scarico si deve identificare il giusto equilibrio tra i costi d'impianto, gli standard di qualità ambientale e la probabilità di non superamento di quest'ultimi.

Nella figura 1.11 lo standard di qualità ambientale è rappresentato dall'ossigeno disciolto (*DO*) presente nel corso d'acqua ricettore, mentre l'efficienza dell'impianto di trattamento è data dalla percentuale di *BOD* rimossa dall'impianto stesso (Male e Ogawa, 1984).

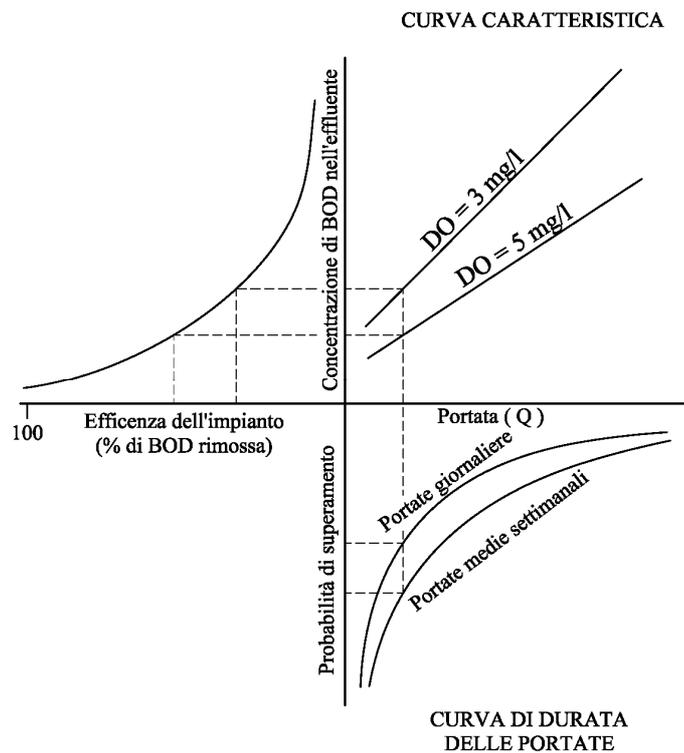


Fig. 1.11. Diagramma composto adottato da Male e Ogawa per illustrare e quantificare l'influenza delle variabili coinvolte nella selezione di un impianto di trattamento delle acque di scarico

VALUTAZIONE DEI DANNI ASSOCIATI A POSSIBILI EVENTI ALLUVIONALI

Fissati i valori di progetto della probabilità di superamento idonei ad assicurare che durante l'intero periodo di vita delle opere di protezione idraulica dalle piene, la portata di piena di progetto venga superata in media soltanto una volta, la portata di

progetto con riferimento ad una curva di durata totale è definita come quella portata che ha probabilità di superamento $p_{\text{prog}} = 1 - 0,5^{1/N}$, dove N indica il tempo di vita utile dell'intervento considerato espresso in anni (*Beard*, 1943).

Molti studi cercano di produrre una stima dei danni provocati mediamente dalle piene in un anno, o dei benefici medi annui ottenuti dagli interventi di protezione idraulica. Tali studi impiegano sequenze di portate massime annuali per caratterizzare la frequenza degli eventi di piena estremi concentrandosi così solo sui danni provocati da eventi estremi. Tuttavia, anche portate di dimensioni inferiori a quelle che caratterizzano gli eventi massimi annuali provocano danni non trascurabili e non ha quindi senso ignorarli. Le curve di durata delle portate permettono proprio di non tralasciare nessun evento di piena, indipendentemente dalla sua intensità.

La Figura 1.12 mostra come si può utilizzare una curva di durata annuale per determinare la frequenza e l'intensità dei danni prodotti per un particolare sito (*Damage Duration Curve*).

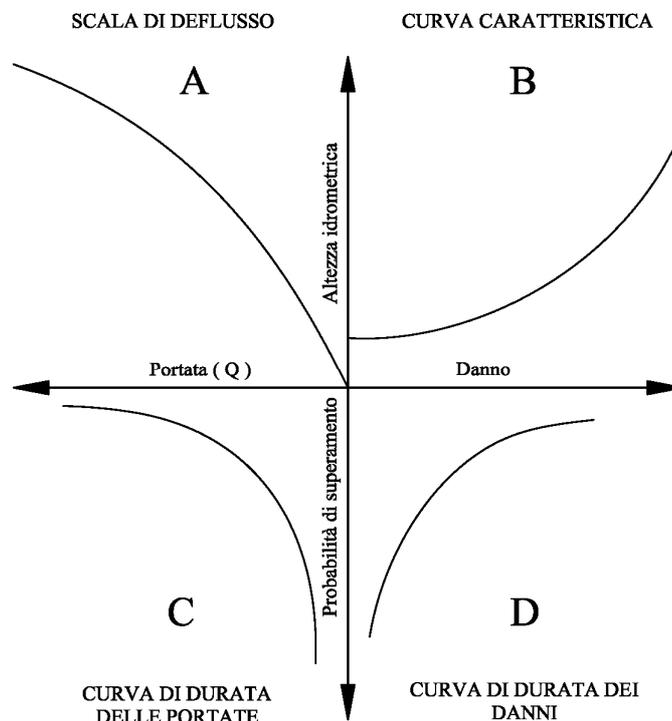


Fig. 1.12. Costruzione di una curva di durata dei danni prodotti dalle piene

Di conseguenza è anche possibile valutare diverse strategie di intervento in relazione al danno atteso, ognuna delle quali avrà un suo costo di progetto. Delle relazioni permettono di valutare l'andamento dei costi relativamente a diverse alternative di progetto (fig. 1.13).

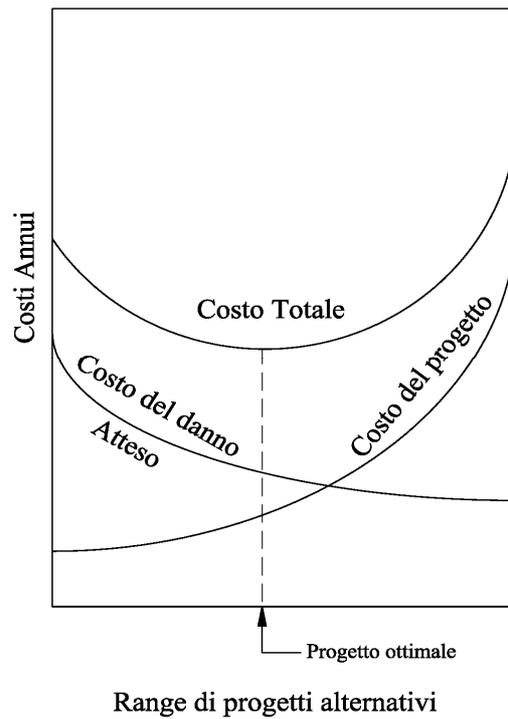


Fig. 1.13. Relazione esistente tra i costi di danno atteso e i costi di progetto per un range di strategie di controllo delle piene

VARIAZIONE DELL'ASSETTO IDROLOGICO

Una *FDC* rappresenta il regime dei deflussi idrici ed è quindi uno strumento molto utile per osservare il comportamento idrologico di un dato bacino, ma non solo, la sua forma e la sua pendenza danno delle indicazioni sulle caratteristiche geologiche del bacino (fig. 1.14).

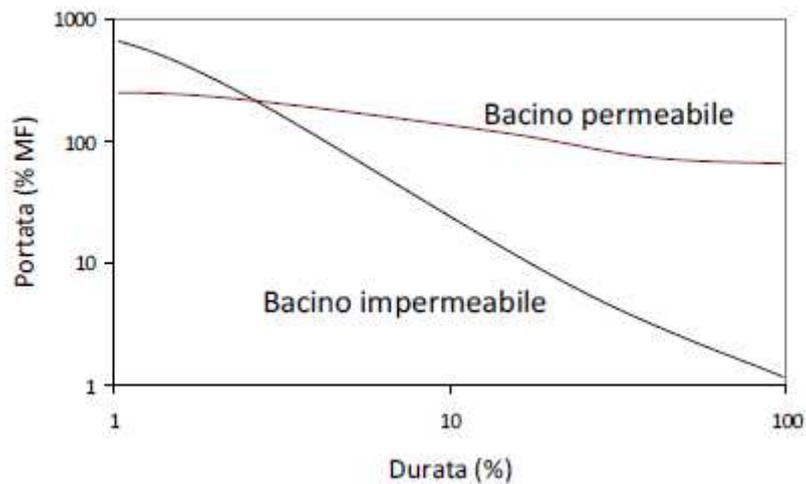


Fig. 1.14. Permeabilità del bacino dedotta dalla forma e dalla pendenza della curva di durata

È importante rendersi conto, soprattutto quando si costruiscono curve di durata in bacini non strumentati, del fatto che il regime di frequenza dei deflussi idrici può subire modifiche nel tempo per effetto di cambiamenti dell'uso del suolo, cambiamenti climatici, derivazioni di corsi d'acqua, ecc.

Recentemente, diversi studi empirici e sperimentali sono stati condotti sugli effetti indotti dalle attività antropiche sull'andamento della *FDC*.

Per esempio, *Brown et al. (2005)* hanno condotto degli studi su una serie di bacini australiani e neozelandesi, dimostrando gli effetti prodotti da un cambiamento indotto della vegetazione.

La figura 1.15 mostra la differenza tra l'andamento di una curva di durata osservata dopo 1 anno dalla piantumazione di una pineta e dopo un periodo di 8 anni: nonostante una similarità dei livelli annuali di precipitazione si vede una riduzione di circa il 50% delle alte portate e di circa il 100% delle basse portate con deflussi nella zona di magra che cessano una volta che le piante hanno ben radicato nel terreno.

Al contrario, il rimpiazzo di una foresta nativa mediante prati da pascolo ha portato ad un aumento dei livelli di falda associato ad aumento dei deflussi profondi con conseguente aumento dei deflussi superficiali di magra e in misura minore di quelli di piena (fig. 1.16).

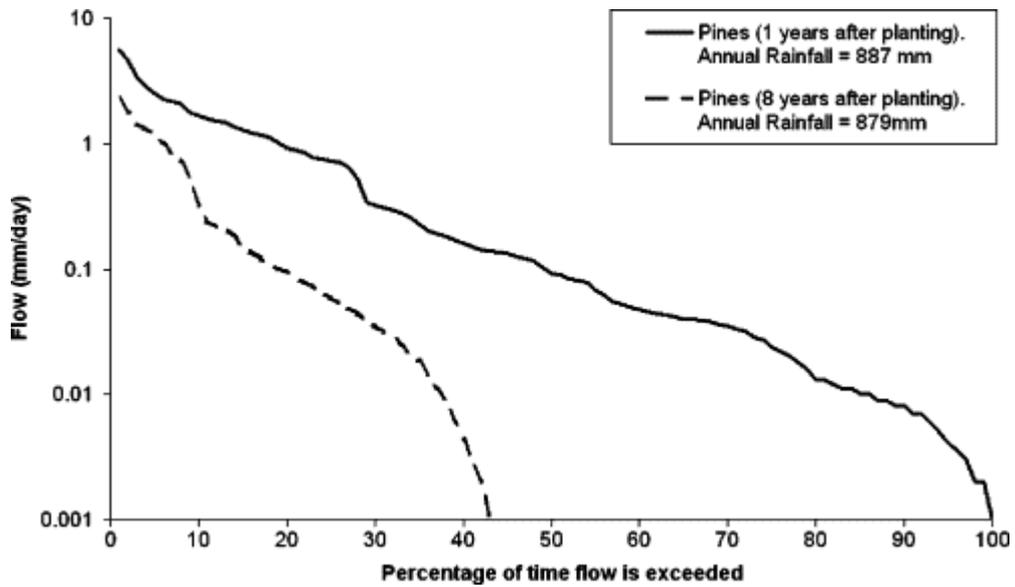


Fig. 1.14. Curva di durata del bacino del fiume Red Hill, Australia, dopo 1 anno (linea continua) e dopo 8 anni (linea tratteggiata) dalla piantumazione di una pineta

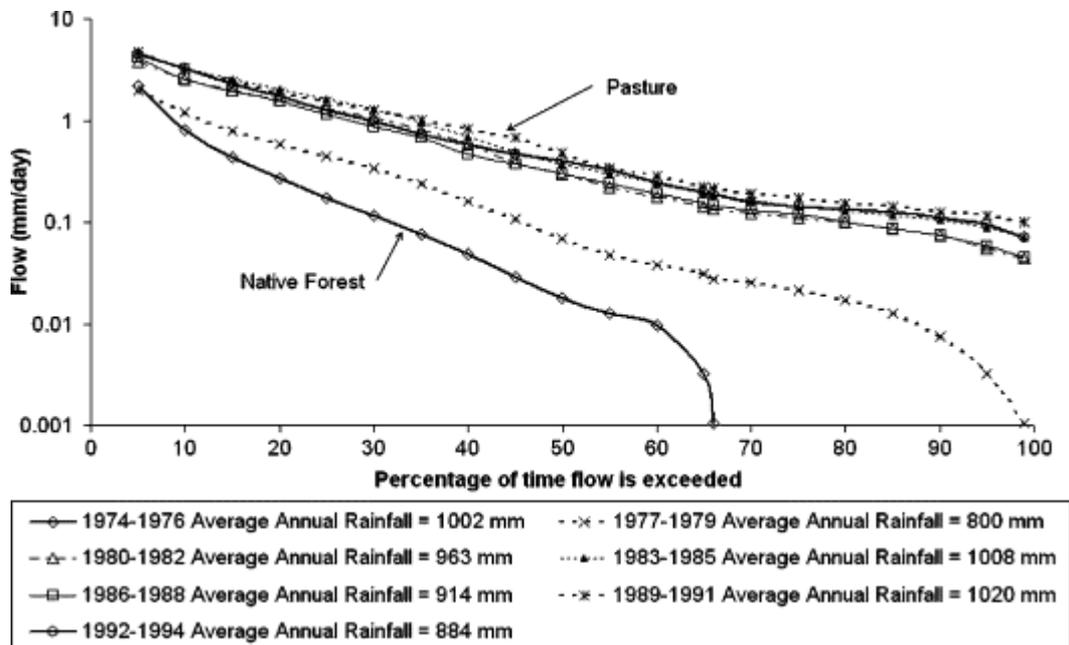


Fig. 1.15. Effetto della sostituzione di una foresta nativa con un prato da pascolo in un bacino australiano in termini di curva di durata delle portate

Capitolo 2

AREA DI STUDIO

L'analisi effettuata nel corso di questo lavoro di Tesi riguarda principalmente i bacini dell'Alto Adige (fig. 2.1), con particolare riferimento al bacino del fiume Adige e ai suoi principali sottobacini (www.bacino-adige.it).

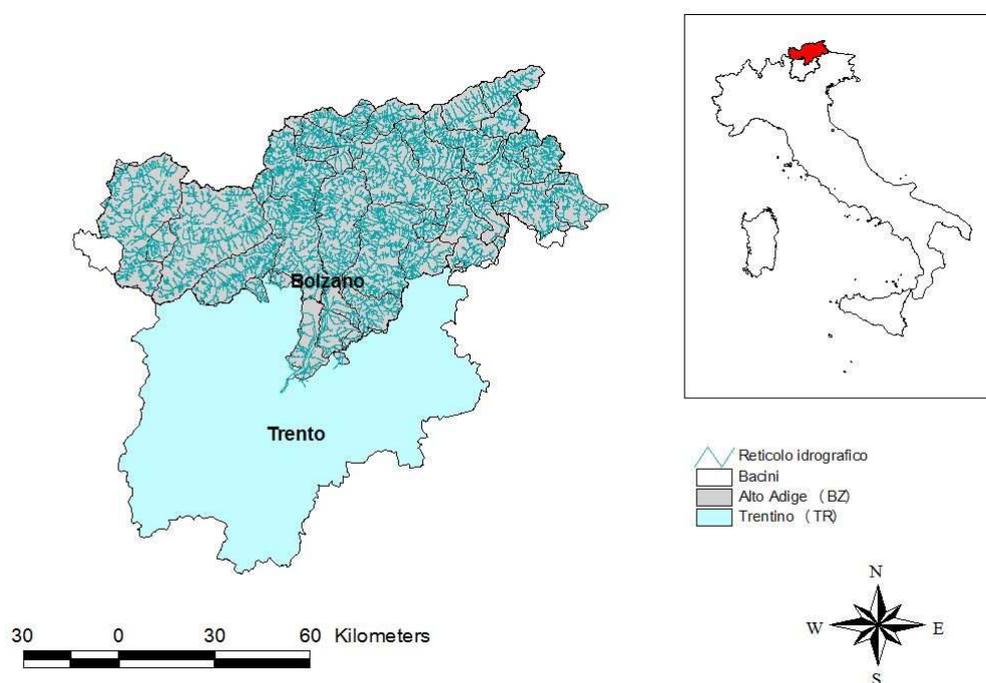


Fig. 2.1. Area di studio

La maggior parte di questi bacini è caratterizzata da un reticolo idrografico rappresentato da solchi vallivi unitari ramificati con pendenze di fondo che variano da oltre il 50 a quasi l'1 per mille.

Sono presenti inoltre molti laghi caratterizzati da una superficie molto ridotta, inferiore ad 1 ettaro, di cui la maggior parte sono di origine glaciale. L'estensione complessiva delle superfici glaciali, con riferimento al bacino dell'Adige che è il massimo bacino della regione, è pari a 127.72 km² e in particolare, nel territorio provinciale altoatesino ricoprono un'estensione pari a 108.19 km².

Le caratteristiche fisiografiche sono quelle tipiche dei bacini in area alpina i quali presentano notevoli differenze di quota tra il fondo delle valli e le vette che dominano i gruppi montuosi.

L'alto bacino, che è la zona interesse di questa Tesi, è suddiviso in quattro zone distinte dalle valli dell'Adige e dell'Isarco-Rienza:

- la parte settentrionale delle valli è limitata verso Nord dalla linea spartiacque fra l'Adige, l'Isarco e la Drava, linea che raggiunge la sua massima quota a 3736 m s.l.m. in corrispondenza della Pala Bianca nelle Alpi Venoste;
- il settore occidentale culmina nella cima della Pala Bianca, situata nelle Alpi Venoste ed alimenta, in parte, l'Adige, il Passirio, e qualche affluente di destra dell'Isarco;
- quello orientale, costituito dalle Alpi Noriche, trova la sua massima quota nel Gran Pilastro ed alimenta in massima parte l'Isarco ed il suo maggiore affluente, la Rienza;
- la parte centrale della zona alpina è occupata dal gruppo dei monti Sarentini, circondato a levante dal corso dell'Isarco, a ponente dall'Adige e dal Passirio, la cui cresta montuosa, disposta a semicerchio, raggiunge la massima altezza sul suo orlo occidentale a 2785 m s.l.m sulla Punta Cervina.

Le condizioni climatiche generali sono caratterizzate da clima continentale, con inverni rigidi e massimi di precipitazioni che hanno generalmente luogo nel periodo estivo.

Alle quote più elevate si accumulano durante la stagione invernale, sotto forma di precipitazioni nevose, notevoli risorse idriche, che vengono mobilitate a partire dalla primavera. Tale situazione determina il regime idrologico del territorio, prevalentemente di carattere "nivale", caratterizzato da una elevata disponibilità di acqua nella stagione calda e da un periodo di magra invernale. La piovosità media annua è notevole, mentre la sua distribuzione varia secondo la quota, l'orientamento delle valli e la distanza rispetto ai limiti esterni della catena alpina (da un minimo di 400-500 mm all'anno in val Venosta ad un massimo di 1600 mm alle quote più elevate o nelle valli più aperte verso la pianura). Come valore medio si può indicare in 900 mm all'anno l'afflusso medio rilevabile.

Rispetto alle precipitazioni nel corso dell'anno si possono individuare: un clima continentale caratterizzato da un massimo di piovosità in estate e da un minimo in inverno, e un clima prealpino con due massimi di pioggia in primavera ed in autunno e due minimi in estate e inverno.

Le piene più importanti si hanno in primavera, a causa del sovrapporsi degli eventi pluviometrici con gli apporti derivanti dalla fusione della neve. Anche nei mesi autunnali di ottobre e novembre possono verificarsi piene ugualmente importanti.

La conformazione delle valli, un tempo occupate dai bacini di alimentazione dei ghiacciai, ha facilitato l'individuazione di numerosi siti per la costruzione di sbarramenti per la formazione di bacini di ritenuta sfruttati dall'ENEL ma anche da terzi.

I bacini considerati si sviluppano principalmente sul territorio della Provincia di Bolzano il cui territorio è prevalentemente montuoso con quote molto elevate per cui l'attività maggiormente sviluppata è quella agricola con la coltivazione di alberi da frutta e di vigneti; nelle parti di bacino a quote più elevate gli utilizzi principali riguardano le colture foraggere, soprattutto a prato, il pascolo ed il bosco.

Una parte rilevante dei bacini in esame è occupato dalla vegetazione pioniera che si insedia nelle fasce altimetriche più alte, dal limite della vegetazione arborea fino agli affioramenti rocciosi e nei versanti dove gli eventi franosi o i dissesti idrogeologici possono essere maggiormente diffusi. Anche gli affioramenti rocciosi hanno importanza rilevante, sia dal punto di vista spaziale sia con riferimento alla determinazione dei tempi di corrivazione delle acque, presentandosi come superfici più o meno impermeabili, a seconda della matrice litologica.

2.1 Bacini considerati

Si è partiti dall'analisi di 42 bacini idrografici (bacini e sottobacini) ricoprenti complessivamente un'estensione di circa 7000 km², la maggior parte sottobacini del fiume Adige, maggior bacino della regione Trentino-Alto Adige e che si sviluppa principalmente nel territorio dell'Alto Adige per poi sfociare in Veneto nel mar

Adriatico. Di questi bacini solo 23 sono stati presi in considerazione (fig. 2.2) ovvero quelli di cui si disponeva di un minimo di 5 anni di osservazione nel periodo compreso tra 1990-2009.

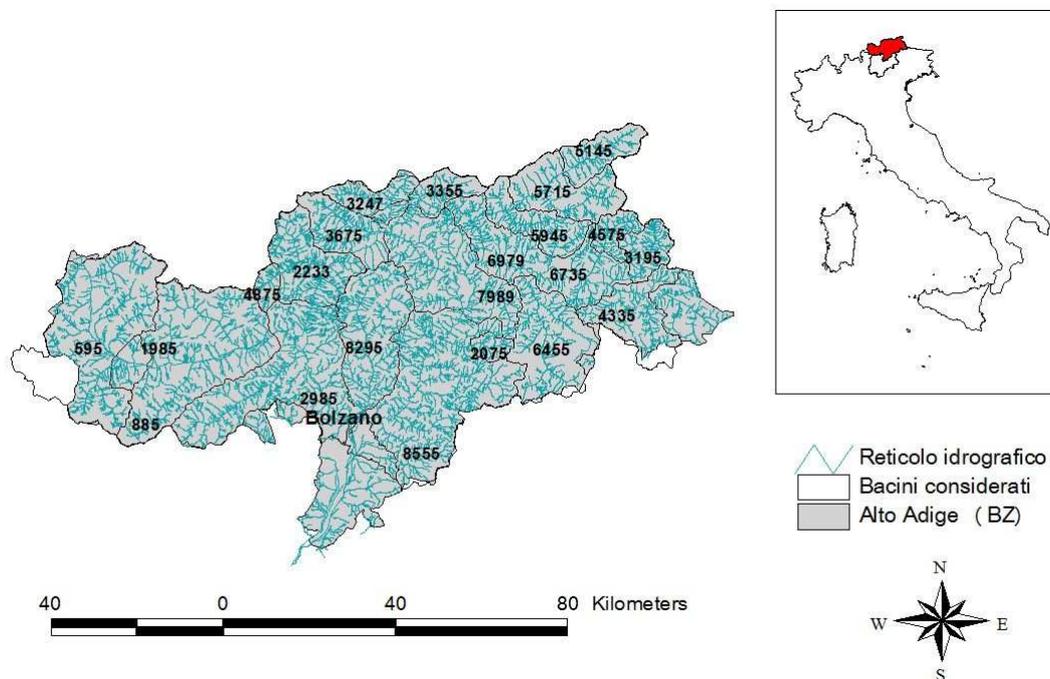


Fig. 2.2. Bacini considerati

La tabella 1 contiene l'elenco dei suddetti bacini disposti in ordine alfabetico, con numero progressivo, rispettivo codice identificativo della propria stazione idrometrica, coordinate UTM della stazione riferite al fuso 32 e numero di anni di osservazione:

N	BACINO	CODICE	X UTM (m)	Y UTM (m)	ANNI DI OSSERV.
1	Adige a Bronzolo	8555	677940	5142627	20
2	Adige a Lasa	0885	629729	5164018	18
3	Adige a Ponte Adige	2985	676882	5150246	20
4	Adige a Spondigna	0595	622732	5166017	20
5	Adige a Tel	1985	659073	5170832	20
6	Aurino a Cadipietra	5145	726593	5208875	20
7	Aurino a Caminata	5715	725134	5198678	20
8	Aurino a S.Giorgio	5945	723868	5189015	20
9	Gadera a Mantana	6455	719836	5184311	20
10	Isarco a Bressanone	6979	703089	5176053	11

11	Isarco a Vipiteno	3247	685524	5196649	5
12	Isarco sud	7989	676827	5147598	6
13	Passirio a Saltusio	2233	668075	5178059	14
14	Rienza a Monguelfo	4335	737906	5182252	20
15	Rienza a Vandoies	6735	706592	5188228	20
16	Rio Anterselva a Bagni Salomone	4875	735132	5190077	20
17	Rio Casies a Colle	4575	742055	5184156	20
18	Rio Fleres a Colle Isarco	3195	685584	5201188	20
19	Rio Funes a S.Pietro	7155	704991	5168677	14
20	Rio Plan	2075	660449	5185237	17
21	Rio Ridanna a Vipiteno	3675	685247	5195138	20
22	Rio Vizze a Novale	3355	692269	5200902	19
23	Talvera a Bolzano	8295	680052	5152301	12

Tabella 2.1. Elenco dei bacini considerati

2.2 Dati idrometrici

Per ognuno dei bacini considerati si è potuto contare sulla disponibilità di una serie di dati di portate giornaliere compresi nel ventennio interessato e forniti dall'Ufficio Idrografico di Bolzano, essendo le stazioni idrometriche ricadenti nell'area di studio, di competenza del suddetto ufficio.

Un'analisi accurata di tali dati ha portato alla scoperta di lunghi periodi di osservazione mancanti, a causa dei quali è stato necessario scartare i bacini affetti da queste mancanze, con il risultato, già menzionato, di un insieme di 23 bacini totali considerati.

Un'ulteriore analisi sui bacini considerati ha evidenziato la presenza di brevi periodi di osservazione mancanti per il quale si è deciso di agire secondo due direzioni:

1. dove l'analisi di ogni anno di osservazione ha evidenziato la mancanza di più di una settimana di osservazioni è stato scartato l'intero anno;
2. dove l'analisi di ogni anno di osservazione ha evidenziato la mancanza di periodi di osservazione inferiori alla settimana o giornalieri è stata effettuata un'interpolazione lineare dei dati, approssimando la serie di osservazioni reali.

Di seguito è riportato un esempio dell'operazione di interpolazione relativa alla serie di portate giornaliere registrate nella stazione 8295 (Talvera a Bolzano) e al periodo compreso tra il 15 ed il 19 di febbraio 2004:

giorni – portate giornaliere (m ³ /s)											
codice	anno	mese	01	02	...	15	16	17	18	19	...
8295	2003	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
8295	2004	01	5.22	4.82	...	4.01	4.98	2.88	3.85	4.29	...
8295	2004	02	2.58	4.12	...	2.78	-	-	-	4.24	...
8295	2004	03	3.19	3.15	...	3.96	3.60	4.81	4.41	5.69	...
...

$$f(x) = \frac{x - x_a}{x_a - x_b} y_a - \frac{x - x_a}{x_a - x_b} y_b$$

Noti i valori di portata nei giorni immediatamente precedente e successivo al periodo di dati mancanti si è potuto procedere nell'interpolazione lineare:

<u>Giorni</u>	15	16	17	18	19
<u>Portate giornaliere</u>	2.78	3.15	3.51	3.88	4.24

I bacini per i quali sono stati ricostruiti i dati sono:

- Adige a Lasa (855) in cui sono stati eliminati gli anni di osservazione relativi al 1990 e 1996;
- Rio Plan ad Eschbaum (2075) in cui sono stati eliminati gli anni di osservazione relativi al 1992 e 1993;
- Passirio a Saltusio (2233) in cui è stato interpolato linearmente il dato del 31 dicembre 2004, sono stati eliminati gli anni di osservazione relativi al 2005 e 2007, sono stati interpolati linearmente i dati relativi alla settimana dal 18 al 25 marzo 2008 ed i dati relativi alla settimana dal 17 al 22 settembre 2009;
- Isarco a Vipiteno (3247), è stato eliminato l'anno di osservazione relativo al 2004;

- Rio Vizze a Novale (3355), è stato interpolato linearmente il dato del 19 novembre 2009;
- Rio Anterselva a Bagni a Salomone (4875), è stato interpolato linearmente il dato del 19 gennaio 2009;
- Isarco a Bolzano sud (7989), è stato eliminato l'anno di osservazione relativo al 2003;
- Talvera a Bolzano (8295), sono stati eliminati gli anni 1998, 2000, 2001 e 2008, sono stati interpolati linearmente i dati del 10 ed 11 agosto 1999, è stato interpolato linearmente il dato del 16 novembre 2002, sono stati interpolati linearmente i dati dell'11 gennaio, 16-17-18 febbraio le settimane dal 6 al 13 e dal 23 al 29 marzo, i dati dell'10-11-14-17 aprile, del 12 e 13 maggio, del 21 agosto e del 16 settembre dell'anno 2004.

Capitolo 3

SISTEMA INFORMATIVO TERRITORIALE

3.1 Dati reperiti

Oltre ai dati di portata media giornaliera di cui si è discusso nel capitolo precedente, ai fini dello svolgimento del presente studio si sono reperiti i seguenti dati relativi alla regione geografica di interesse:

1. Precipitazioni totali annue osservate nelle stazioni pluviometriche di pertinenza dell'Ufficio Idrografico di Bolzano;
2. Caratteristiche geomorfologiche, climatiche ed idrologiche dei bacini sottesi dalle sezioni fluviali strumentate considerate alle quali si sono stimate le curve di durata delle portate.

In riferimento alle stazioni pluviometriche gestite dall'Ufficio Idrografico di Bolzano e situate nell'area di studio, sono state acquisite le precipitazioni totali annuali (*mm*).

Sempre dall'Ufficio Idrografico di Bolzano ci sono stati forniti alcuni dati da elaborare in ambiente GIS in particolare alcuni *file grid* (immagini raster) molto importanti tra i quali il DEM, *Digital Elevation Model* (fig. 3.1) con una risoluzione di 10 *m*.

Il DEM è la rappresentazione della distribuzione delle quote di un territorio in formato digitale. Il modello digitale di elevazione viene in genere prodotto in formato raster associando a ciascun pixel di un'immagine l'attributo relativo alla quota assoluta.

Oltre al DEM ci è stato fornito il grid relativo alle aree forestate (fig. 3.3) mentre un grid relativo alla copertura nivale, la *Snow Cover Duration* (fig. 3.2) dell'intera area di studio, ci è stato fornito dall'*Institute for Applied Remote Sensing* dell'EURAC di Bolzano.

Mediante questi dati è stato possibile ricavare rispettivamente le pendenze medie dei singoli bacini, il valore medio dei giorni in cui i bacini sono stati coperti da neve e la percentuale di area forestata ricadente nei bacini considerati.

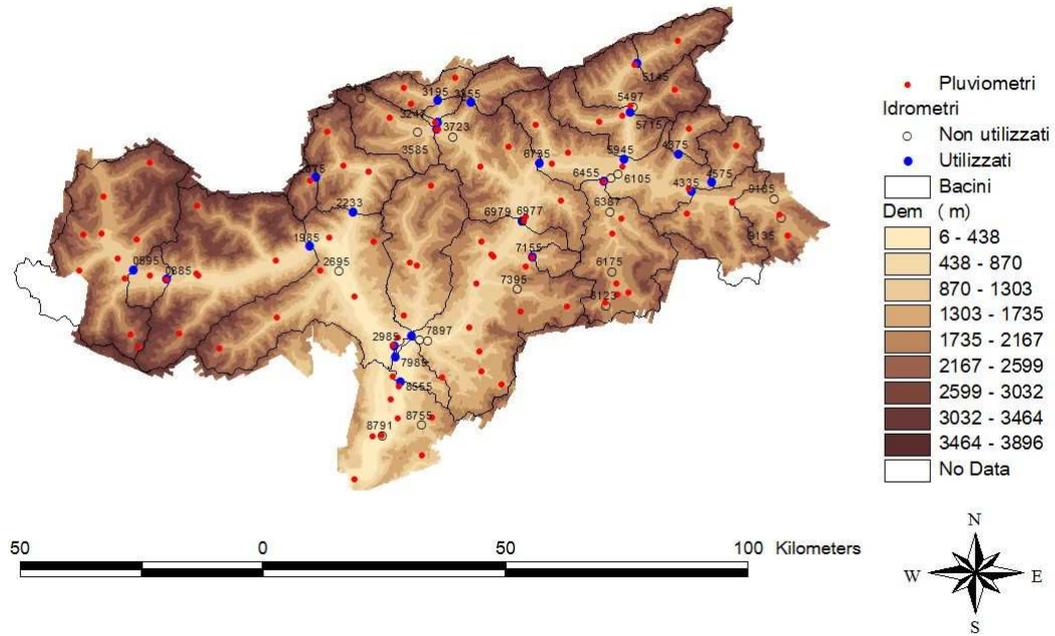


Fig. 3.1. Modello Digitale di Elevazione (DEM)

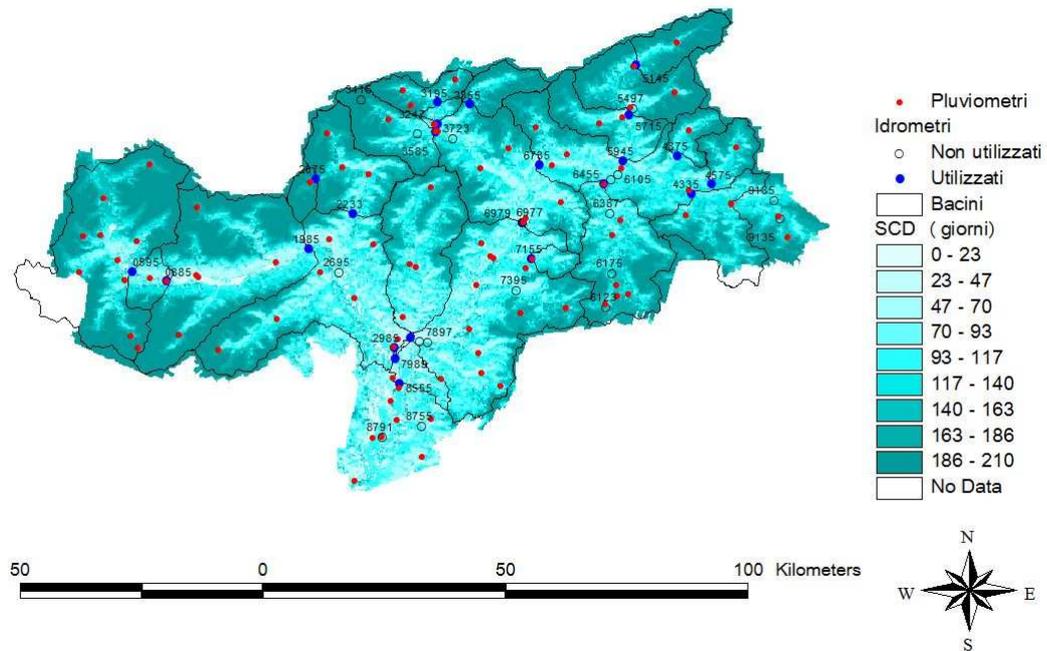


Fig. 3.2. Snow Cover Duration (SCD)

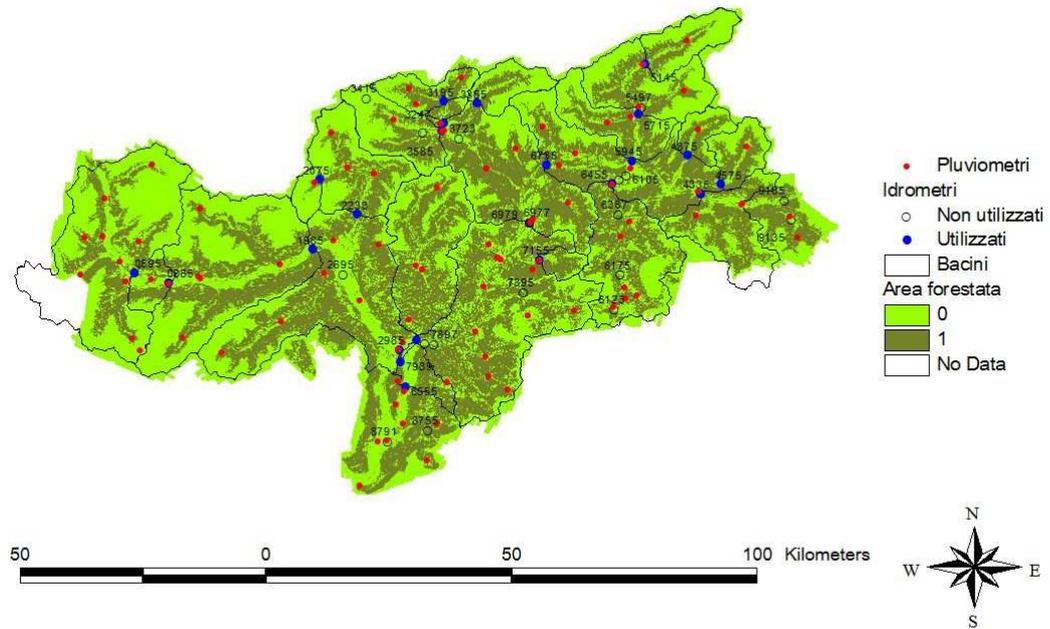


Fig. 3.3. Aree ricoperte da foreste

Dall'Ufficio Idrografico di Bolzano derivano anche degli *shapefile* (file in formato vettoriale) sempre da elaborare in GIS dai quali si sono potute ricavare alcune informazioni morfologiche utili ai fini delle analisi dei bacini considerati quali area dei bacini, lunghezza dell'asta principale e quote massime, minime e medie dei bacini.

3.2 Descrittori geomorfologici e climatici di bacino

Partendo dai valori di precipitazione totale annua e lavorando in ambiente GIS, in particolare mediante il software ArcView GIS 3.2, si sono ricavate le precipitazioni annuali a scala di bacino relative ad ogni anno del periodo considerato e nell'intero periodo di osservazione (*MAP, Mean Annual Precipitation*), come descritto in maniera più dettagliata nel capitolo 4.

Dai mensili idrologici forniti dall'Ufficio Idrografico di Bolzano e reperibili online attraverso il sito <http://www.provincia.bz.it/meteo/hydroreport.asp>, si sono acquisiti i seguenti dati morfologici:

- area dei bacini, A (km^2);
- lunghezze delle aste principali, L (km);
- quote medie, minime e massime, H_m , H_{\min} , H_{\max} (km);
- percentuale delle aree ricoperte da ghiacciai.

Alcuni dei seguenti dati sono stati poi verificati mediante le elaborazioni effettuate in GIS sugli *shapefile* dei bacini considerati, con risultati molto prossimi, anche se ai fini delle analisi si sono ritenuti più accurati i dati forniti dai mensili idrologici.

Sempre utilizzando ArcView GIS 3.2 mediante una opportuna applicazione denominata *derive slope* applicata alle superfici dei DEM, sono state ricavate le pendenze medie dei bacini basate sul calcolo del modulo del gradiente della superficie in ogni punto. Il software permette di effettuare diverse operazioni tra le quali sovrapposizioni di grid, che ci hanno permesso di determinare il DEM relativo ad ogni bacino e da questo ricavarne la pendenza media come appena descritto. In figura 3.4 è riportato un esempio di tali pendenze relativo al bacino dell'Adige a Bronzolo (codice: 8555).

La stessa operazione di sovrapposizione è stata adottata analogamente per determinare la percentuale di area forestata e la durata media in giorni della copertura nivale per ogni bacino considerato come mostrato nell'esempio di figura 3.5.

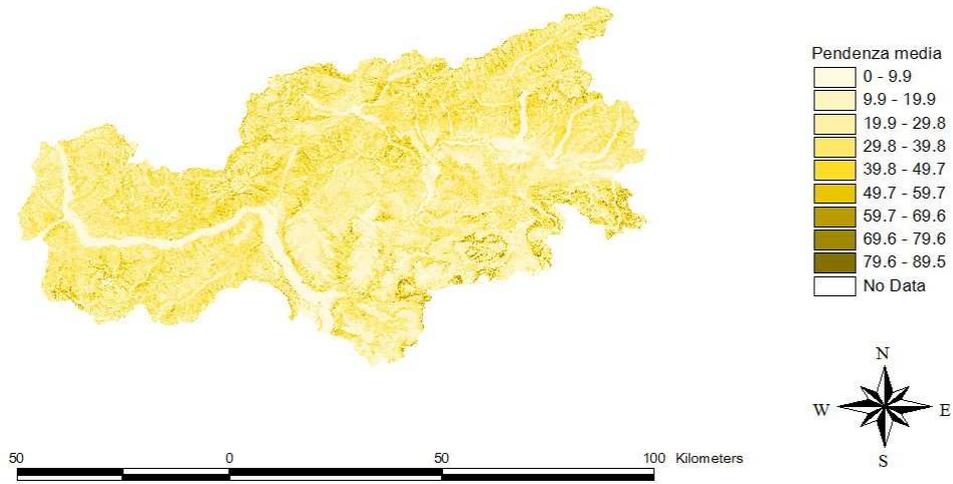


Fig. 3.4. Pendenza media del bacino dell'Adige a Bronzolo determinata dal modulo del gradiente della superficie in ogni punto

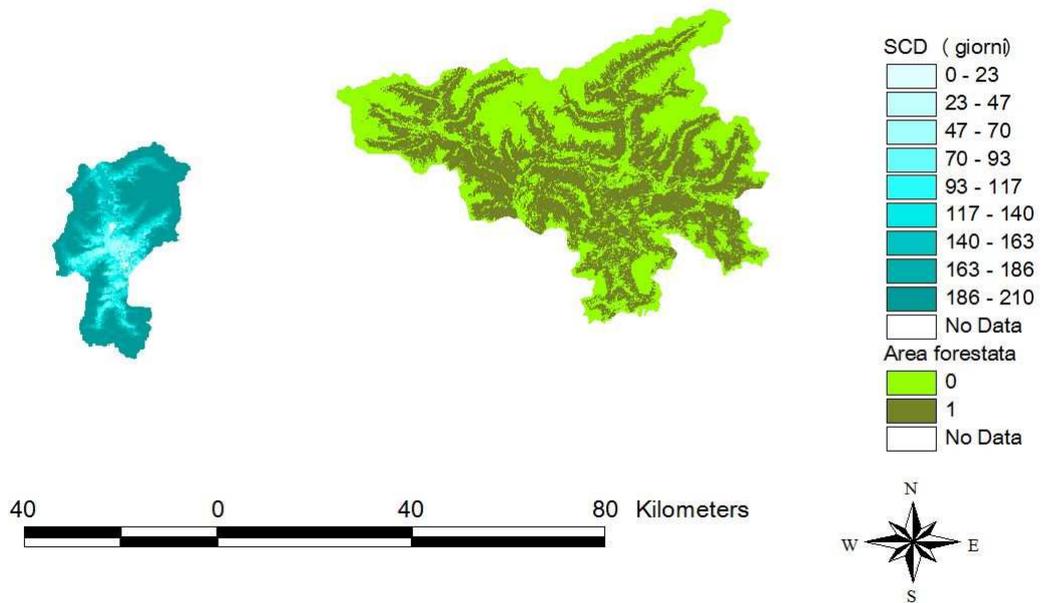


Fig. 3.5. Snow Cover Duration relativa al bacino dell'Adige a Spondigna (595) e Area forestata relativa al bacino dell'Isarco a Bressanone (6979)

Tutte queste informazioni sono state sfruttate per determinare i descrittori geomorfologici e climatici di bacino necessari per costruire un modello regionale di stima delle curve di durata annuali in bacini non strumentati.

In tabella 3.1 sono riportati, per ogni bacino idrografico, i suddetti descrittori geomorfologici e climatici.

N	Codice	A km ²	H_m m s.l.m.	H_{min} m s.l.m.	H_{max} m s.l.m.	L km	SCD giorni	Pen. Med. °	Area Foresta %	MAP mm	Area ghiacciai %
1	8555	6923.0	1804.0	228.0	3893.0	107.1	140.5	27.4	47.4	818.8	1.58
2	885	908.3	2156.0	857.0	3889.0	56.0	163.2	27.3	30.6	632.0	4.06
3	2985	2705.0	1907.0	240.0	3893.0	97.3	146.5	27.9	39.2	740.5	2.88
4	595	671.0	2167.0	893.0	3725.0	36.6	167.7	27.6	28.9	638.1	2.56
5	1985	1675.6	2111.0	510.0	3893.0	66.2	157.5	28.5	34.4	642.8	3.86
6	5145	148.6	2167.0	1047.0	3479.0	22.3	183.9	30.7	25.1	915.6	3.73
7	5715	419.9	2115.0	845.0	3485.0	35.9	174.9	30.5	32.4	915.9	4.52
8	5945	613.0	2038.0	819.0	3470.0	52.7	165.9	30.3	37.7	902.0	4.13
9	6455	389.0	1856.0	813.0	3120.0	33.8	146.8	26.4	52.4	857.5	0.00
10	6979	2891.0	1833.0	557.0	3499.0	54.6	147.0	28.2	49.5	878.4	1.37
11	3247	140.0	1850.0	947.0	3245.0	17.5	160.9	30.2	45.8	869.7	1.28
12	7989	4190.0	1747.0	239.0	3499.0	103.3	138.0	27.2	52.3	1057.1	0.93
13	2233	342.0	1950.0	480.0	3478.0	26.8	163.4	31.8	33.3	1041.9	0.86
14	4335	264.1	1872.0	1096.0	3217.0	28.0	147.1	29.1	55.6	848.9	0.00
15	6735	1920.0	1861.0	735.0	3479.0	78.1	148.7	27.8	48.7	866.4	1.33
16	4875	82.6	2036.0	1091.0	3425.0	17.7	156.2	31.1	45.7	974.6	0.00
17	4575	117.3	1960.0	1198.0	2825.0	19.2	154.6	27.8	47.0	893.9	0.00
18	3195	74.0	1966.0	1068.0	3245.0	15.6	167.0	31.1	42.7	878.7	2.42
19	7155	45.0	1833.0	1062.0	3023.0	11.4	130.6	26.8	63.9	1093.8	0.00
20	2075	49.3	2390.0	1569.0	3478.0	12.2	193.4	31.4	5.8	839.6	1.56
21	3675	207.0	1927.0	939.0	3456.0	15.3	163.4	28.5	37.8	1013.6	4.61
22	3355	108.3	2186.0	1375.0	3500.0	18.3	175.5	30.6	29.0	918.0	4.20
23	8295	426.0	1674.0	268.0	2776.0	46.0	129.0	25.8	56.8	890.8	0.00

Tabella 3.1. Descrittori geo-morfo-climatici calcolati a scala di bacino

Capitolo 4

MODIFICHE DELLE CURVE DI DURATA ANNUALI SPERIMENTALI NEL PERIODO: 1990-2009

Come già si è avuto modo di sottolineare all'interno del presente elaborato, è importante rendersi conto, soprattutto quando si costruiscono curve di durata in bacini non strumentati, del fatto che il regime di frequenza dei deflussi idrici può subire modifiche nel tempo a causa di molteplici fattori, quali ad esempio cambiamenti dell'uso del suolo, cambiamenti climatici, derivazioni di corsi d'acqua, ecc.

Tra gli scopi di questo lavoro di Tesi vi è la verifica di possibili trend idrologici avvenuti nell'ultimo ventennio (1990-2009), rimandando ad indagini successive l'identificazione delle cause di questi eventuali modifiche.

4.1 Calcolo della precipitazione media annuale a scala di bacino

Dai dati pluviometrici forniti dall' Ufficio Idrografico di Bolzano è stato possibile risalire a quanto è piovuto annualmente a scala di bacino per ogni bacino idrografico considerato nel periodo di interesse (dal 1990 al 2009).

Innanzitutto, dai valori forniti da ogni pluviometro si è determinata la precipitazione media annuale (*MAP, Mean Annual Precipitation*) semplicemente calcolando una media dei valori di pioggia caduti in ogni anno, dal 1990 al 2009, per ogni stazione pluviometrica.

La spazializzazione della precipitazione annuale ed il calcolo della precipitazione a scala di bacino è stata condotta attraverso alcuni algoritmi di interpolazione in ambiente GIS. In particolare si è utilizzato ArcView Gis 3.2 operando su una griglia

di celle quadrate di lato pari a 250 metri. Il valore associato a ciascuna cella si determina pesando i dati relativi alle stazioni più vicine, con pesi inversamente proporzionali al quadrato della distanza.

Utilizzando una estensione del software, la *Zonal Stats for Polygons*, che permette di effettuare una semplice interpolazione tra *grid* (immagini raster), attraverso il metodo della distanza inversa, è stato possibile interpolare il grid relativo ai pluviometri presenti nell'intera area di studio con i grid dei singoli bacini e ricavare quindi per ogni bacino i valori di pioggia cumulata annuale ed il *MAP* ovvero, quanto è piovuto ogni anno e quanto è piovuto mediamente nell'intero periodo di osservazione considerato. In figura 4.1 è riportato un esempio del risultato fornito dall'applicazione appena descritta.

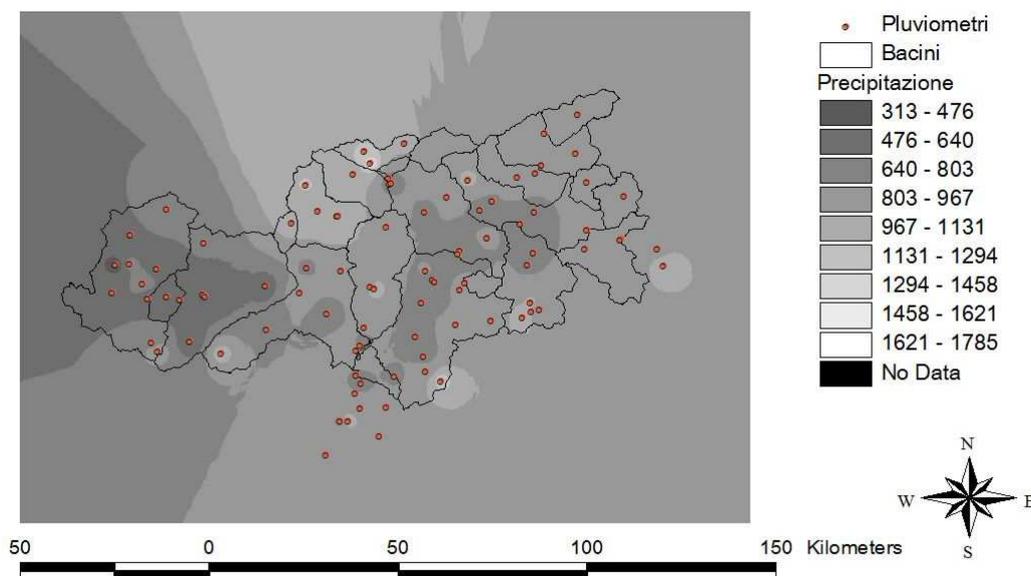


Fig. 4.1. spazializzazione della precipitazione media annuale calcolata attraverso il metodo della distanza inversa

4.2 Curva di Durata Adimensionale

Ai fini della verifica della variazione dell'assetto idrologico dei bacini considerati è stato necessario costruire la curva di durata dei deflussi adimensionale (*DAFDC*, *Dimensionless Annual Flow Duration Curve*), analizzando separatamente eventuali modifiche del segnale climatico, rappresentato in questo studio dalla precipitazione annuale.

Conoscendo l'area e la portata media giornaliera relativa ad ogni bacino è stato possibile quindi stimare il deflusso annuo in mm (*D*):

$$D[\text{mm}/\text{anno}] = \frac{QMG[\text{m}^3/\text{s}]}{A[\text{m}^2]} \cdot 1000 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600$$

in cui

$$QMG = \text{portata media giornaliera } [\text{m}^3/\text{s}]$$

In questo modo si è potuto effettuare un confronto con la precipitazione media annua (*PA*) anche essa in mm, ovvero, è stato possibile ottenere valori adimensionali dividendo i deflussi per le precipitazioni e costruire quindi le curve di durata tramite le procedure descritte nel primo capitolo.

Sono state costruite le curve di durata adimensionali relativamente a 15 bacini di cui si disponeva di almeno 19 anni di osservazioni tra i 23 bacini di partenza, in modo da poter avere risultati sicuramente più accurati.

Nella figura 4.2 è riportato un esempio di tale curva costruita per il bacino dell'Adige a Spondigna identificato dal codice 595 è relativa all'anno 2007. In realtà in figura sono rappresentate le curve di durata relative ad ogni anno del periodo di osservazione in esame (1990-2009).

Tra tutti i deflussi sono stati estrapolati ai fini dell'analisi, alcuni valori caratterizzanti soprattutto i deflussi relativi alle durate medio-alte, durate che sono quelle caratteristiche di periodi di morbida e magra.

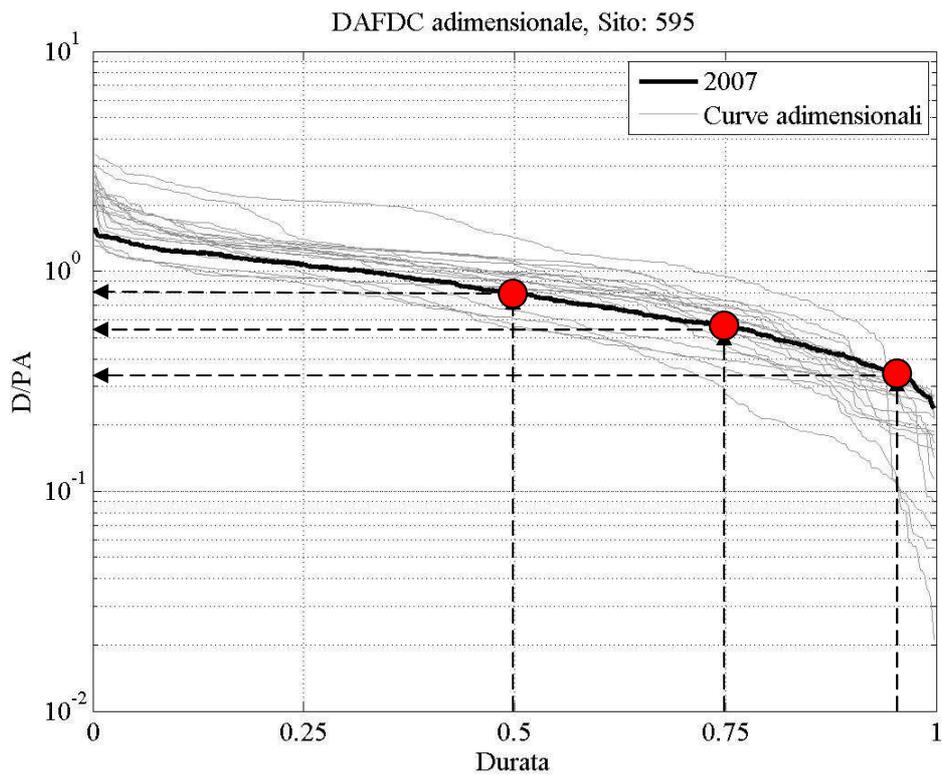


Fig. 4.2. Curve di Durata dei Deflussi adimensionale relativa al bacino dell'Adige a Spondigna (codice 595)

In particolare sono stati considerati i deflussi D_{50} , D_{75} e D_{95} corrispondenti ai deflussi superati rispettivamente per il 50%, 75% e 95% dei giorni in un anno, caratterizzanti in quest'ordine un valore centrale (prossimo dunque ad un valore medio), un valore nel campo dei deflussi di morbida ed uno in quelli di magra.

4.3 Analisi delle variazioni geometriche della DAFDC

L'analisi dei trend è stata svolta secondo il test di *Mann-Kendall* basato sul metodo di *Sen* (*Sen*, 1968) molto utilizzato nelle analisi di serie storiche ambientali. Si tratta di un test statistico non parametrico e pertanto non assume alcuna distribuzione a priori per i dati, il che porta di solito ad una maggiore robustezza rispetto a metodi parametrici.

È un test per l'ipotesi di trend monotono e può tenere conto di diverse problematiche dei dati quali la presenza di dati mancanti o la stagionalità.

Il test si basa sulla costruzione di rette di regressione non parametriche e per la quantificazione del trend si è utilizzata la pendenza di *Sen* definita come la pendenza della retta mediana di tutte le rette ottenute combinando i dati a coppie in tutti i modi possibili. La figura 4.3 mostra come per il bacino in esame, l'Adige a Spondigna (595), si nota un andamento decrescente della piovosità mentre in figura 4.4 sono rappresentati due andamenti decrescenti relativi rispettivamente ai deflussi medi e di morbida e un andamento crescente per i deflussi di magra.

Per meglio chiarire quanto queste tendenze fossero significative è stato applicato il test di *Sen*, che in questo caso indica con il livello di significatività assegnato che la tendenza al calo pluviometrico nel bacino, nel periodo considerato, non è significativa (fig.4.5). Per quanto riguarda i deflussi il test indica che la tendenza al decremento delle portate medie adimensionali (D_{50}) e delle portate di morbida (D_{75}) non è significativa (fig. 4.6 e 4.7) mentre risulta significativo l'incremento delle portate di magra adimensionali (D_{95}) come mostrato in figura 4.8.

Generalmente per le varie analisi ingegneristiche la significatività del test viene fissata al 5%, ma in questo lavoro si è fissato un valore del 10% in quanto alcuni autori (*Nicholls*, 2001) suggeriscono di tener conto di una significatività meno forte a causa della difficoltà di rilevare trend reali in serie non sufficientemente lunghe.

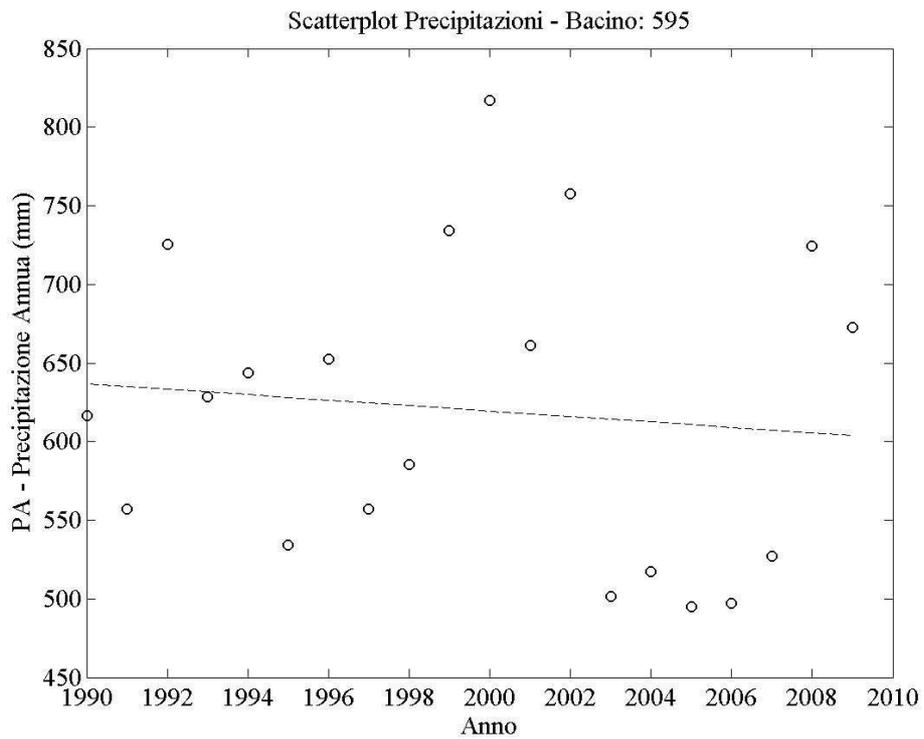


Fig. 4.3. Retta di regressione non parametrica relativa agli afflussi meteorici

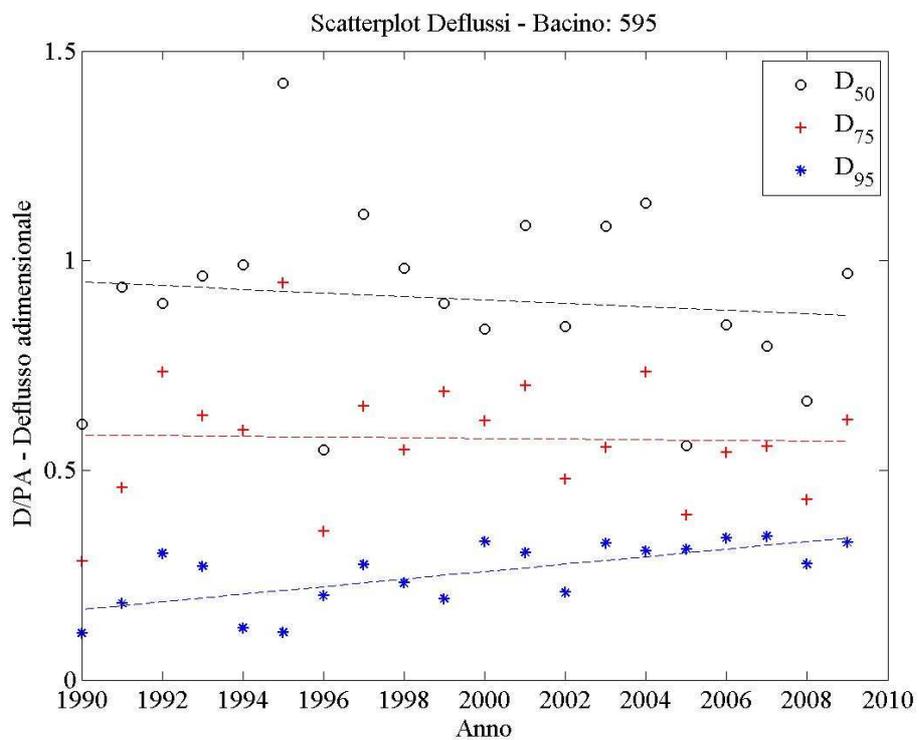


Fig. 4.4. Retta di regressione non parametrica relativa ai deflussi superati per il 50%, 75% e 95% dei giorni in un anno

Le figure seguenti mostrano graficamente i risultati del test di Sen il quale risulta significativo al livello di confidenza considerato quando i limiti di confidenza risultano avere lo stesso segno del valore della pendenza di Sen calcolata.

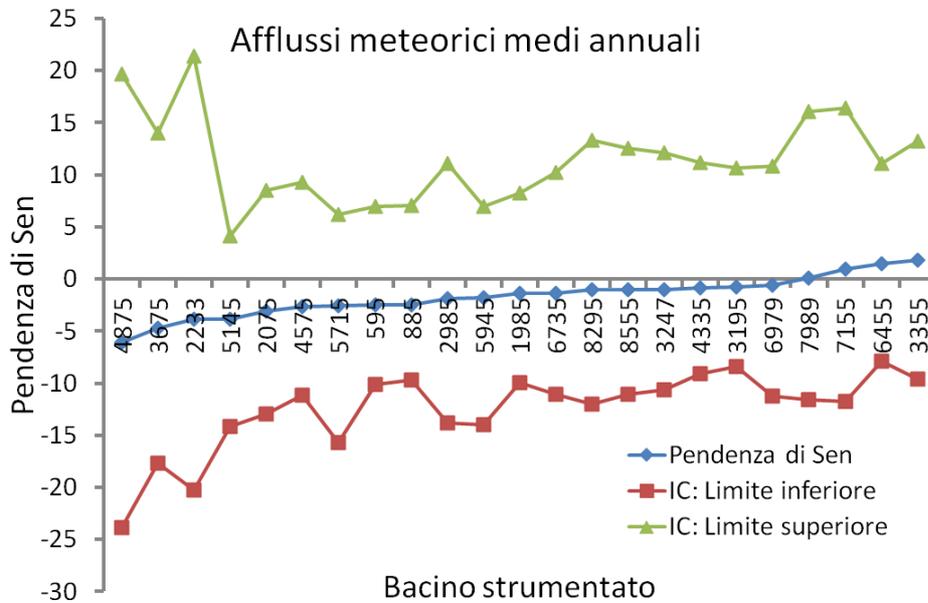


Fig. 4.5. Test di significatività basato sulla pendenza di Sen relativo agli afflussi meteorici

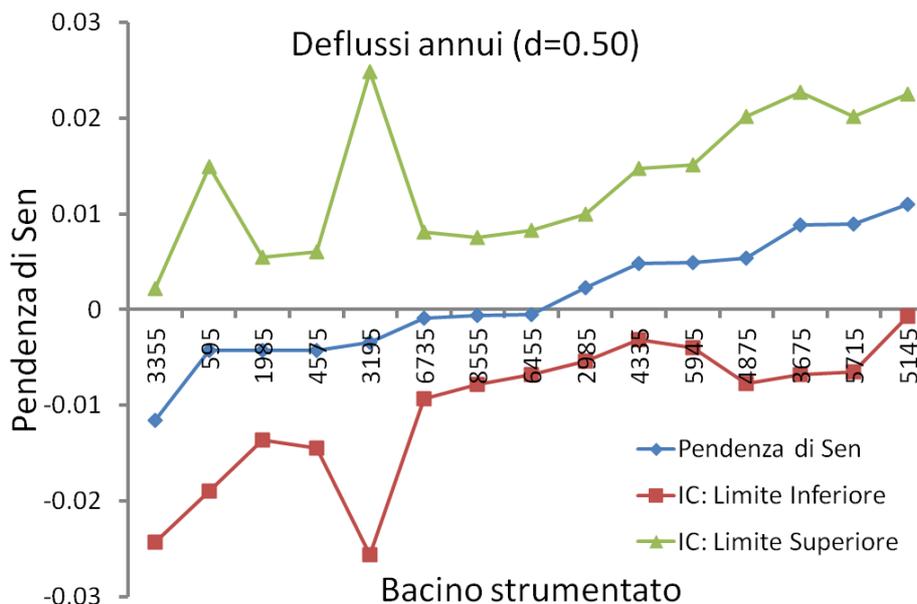


Fig. 4.6. Test di significatività basato sulla pendenza di Sen relativo al deflusso superato per il 50% dei giorni in un anno

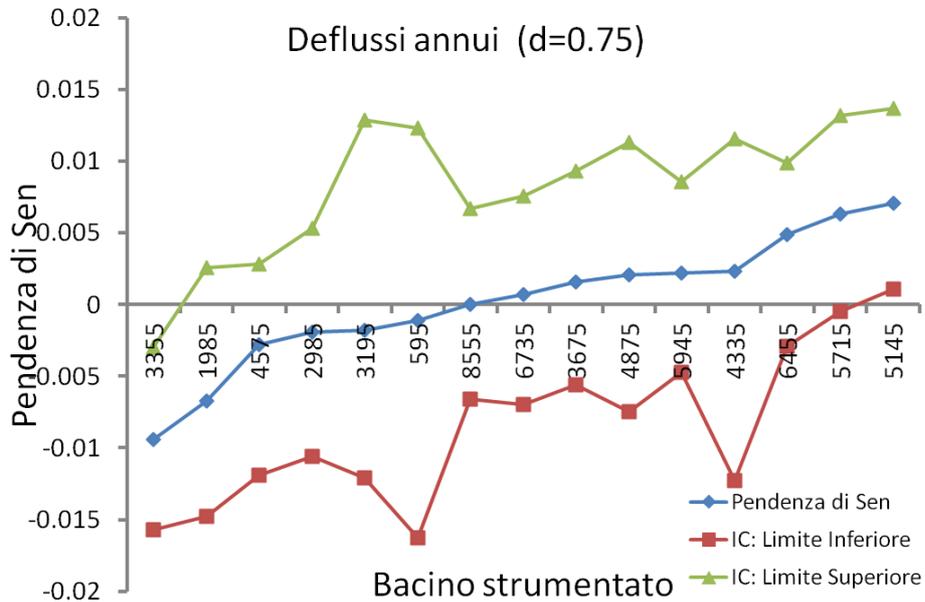


Fig. 4.7. Test di significatività basato sulla pendenza di Sen relativo al deflusso superato per il 75% dei giorni in un anno

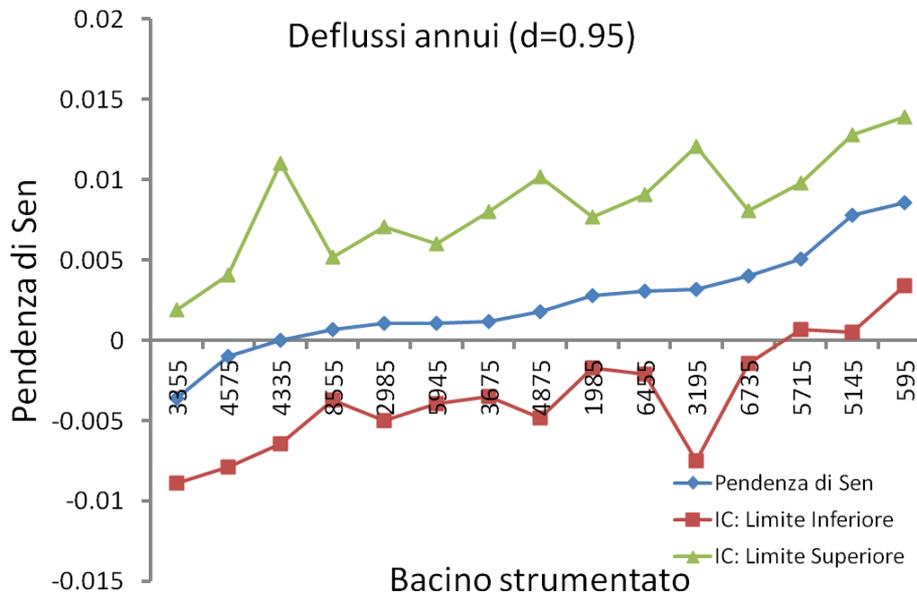


Fig. 4.8. Test di significatività basato sulla pendenza di Sen relativo al deflusso superato per il 95% dei giorni in un anno

4.4 Discussione dei risultati

Nel paragrafo precedente si è osservato come la pendenza delle rette di regressione non parametriche costruite per le precipitazioni annue sono indicative delle tendenze di piovosità annua di ogni serie osservata.

Sono state costruite 23 rette di regressione relative a tutti i bacini considerati in questo studio che ricordiamo sono quelli di cui disponiamo di almeno 5 anni di osservazione (v. cap. 2, tabella 2.1).

Su 23 bacini, 17 hanno mostrato pendenze negative, ovvero tendenza al calo pluviometrico mentre i restanti 6, al contrario, hanno mostrato una pendenza positiva. In complessivo sembrerebbe che nell'area di studio negli ultimi venti anni si è avuto un trend negativo di piovosità, ma in realtà il test di significatività al 10% mostra come non vi siano stati trend statisticamente significativi (fig. 4.5). Infatti la pendenza di Sen è sempre compresa tra un limite inferiore negativo ed uno superiore positivo (tabella 4.1).

Bacino	Pendenza di Sen	IC: limite inferiore	IC: limite superiore	Bacino	Pendenza di Sen	IC: limite inferiore	IC: limite superiore
8555	-1.053	-11.0775	12.568	2233	-3.8709	-20.2808	21.3591
885	-2.4436	-9.6615	7.0595	4335	-0.8808	-9.0875	11.1664
2985	-1.8663	-13.8562	11.1142	6735	-1.355	-11.0923	10.266
595	-2.4439	-10.0896	6.9982	4875	-6.0712	-23.8477	19.6745
1985	-1.3606	-9.924	8.2723	4575	-2.6228	-11.1791	9.2856
5145	-3.8254	-14.1698	4.1563	3195	-0.7969	-8.444	10.6301
5715	-2.56	-15.7487	6.1566	7155	0.975	-11.773	16.4166
5945	-1.7669	-14.0318	6.9816	2075	-3.0671	-12.9466	8.5331
6455	1.4625	-7.9135	11.0778	3675	-4.7479	-17.6724	13.9798
6979	-0.5848	-11.2448	10.8615	3355	1.8503	-9.5916	13.1985
3247	-1.0151	-10.6354	12.0995	8295	-1.0613	-12.0374	13.3128
7989	0.0873	-11.5737	16.0413				

Tabella 4.1. Pendenze di Sen ed intervalli di confidenza relativi alle precipitazioni

Per quanto riguarda i deflussi sono stati invece considerati, come già osservato precedentemente, solamente i 15 bacini per i quali si disponeva di almeno 5 anni di osservazione.

L'analisi è stata effettuata su tre deflussi caratteristici ovvero D_{50} , D_{75} e D_{95} rispettivamente corrispondenti ai deflussi superati per il 50%, 75% e 95% dei giorni in un anno.

Nel caso dei deflussi medi e di morbida, ovvero D_{50} e D_{75} si può osservare un equilibrio tra trend positivi e negativi (tabelle 4.2 e 4.3), ma nessuna tendenza nelle portate medie adimensionali risulta essere significativa per il test al livello di significatività assegnato (fig.4.6).

Bacino	Pendenze di Sen	IC: limite inferiore	IC: limite superiore
595	-0.0043	-0.019	0.0149
1985	-0.0043	-0.0136	0.0055
2985	0.0023	-0.0054	0.01
3195	-0.0034	-0.0256	0.0249
3355	-0.0116	-0.0243	0.0022
3675	0.0088	-0.0068	0.0227
4335	0.0048	-0.0032	0.0147
4575	-0.0043	-0.0145	0.006
4875	0.0054	-0.0077	0.0202
5145	0.011	-0.0007	0.0225
5715	0.0089	-0.0065	0.0202
5945	0.0049	-0.004	0.0151
6455	-0.0005	-0.0068	0.0083
6735	-0.0009	-0.0093	0.0081
8555	-0.0006	-0.0078	0.0075

Tabella 4.2. Pendenze di Sen ed intervalli di confidenza relativi ai deflussi superati per il 50% dei giorni in un anno

Bacino	Pendenze di Sen	IC: limite inferiore	IC: limite superiore
595	-0.0011	-0.0163	0.0123
1985	-0.0067	-0.0148	0.0026
2985	-0.0019	-0.0106	0.0053
3195	-0.0018	-0.0121	0.0129
3355	-0.0094	-0.0157	-0.003
3675	0.0016	-0.0056	0.0093
4335	0.0023	-0.0123	0.0116
4575	-0.0028	-0.0119	0.0028
4875	0.0021	-0.0075	0.0113

5145	0.0071	0.0011	0.0137
5715	0.0063	-0.0005	0.0132
5945	0.0022	-0.0047	0.0086
6455	0.0049	-0.0029	0.0099
6735	0.0007	-0.007	0.0076
8555	0	-0.0066	0.0067

Tabella 4.3. Pendenze di Sen ed intervalli di confidenza relativi ai deflussi superati per il 75% dei giorni in un anno

Risultano invece significative due tendenze nei deflussi di morbida (fig. 4.7) ed in particolare una tendenza al decremento delle portate nel bacino del Rio Vizze a Novale (3355) ed una tendenza all'incremento delle portate nel bacino dell'Aurino a Cadipietra (5145).

In fine, nei deflussi di magra si osserva una maggioranza di trend positivi, come si può osservare nella tabella 4.4, che sta a significare un incremento delle portate di magra adimensionali, ma che sono significativi solo in tre casi (fig. 4.8) ovvero nei bacini dell'Aurino a Caminata (5715), dell'Aurino a Cadipietra (5145) e dell'Adige a Spondigna (595).

Bacino	Pendenze di Sen	IC: limite inferiore	IC: limite superiore
595	0.0086	0.0034	0.0139
1985	0.0028	-0.0017	0.0077
2985	0.0011	-0.005	0.0071
3195	0.0032	-0.0075	0.0121
3355	-0.0036	-0.0089	0.0019
3675	0.0012	-0.0035	0.008
4335	0	-0.0064	0.011
4575	-0.001	-0.0079	0.0041
4875	0.0018	-0.0048	0.0102
5145	0.0078	0.0005	0.0128
5715	0.0051	0.0007	0.0098
5945	0.0011	-0.0039	0.006
6455	0.0031	-0.0021	0.0091
6735	0.004	-0.0014	0.0081
8555	0.0007	-0.0037	0.0052

Tabella 4.4. Pendenze di Sen ed intervalli di confidenza relativi ai deflussi superati per il 95% dei giorni in un anno

Da un'analisi più accurata di questi tre bacini possiamo osservare come i primi due, l'Aurino a Caminata e l'Aurino a Cadipietra appartengono alla stessa regione omogenea, come si vedrà dalla cluster analysis effettuata nel capitolo successivo (v. capitolo 5) e in particolare appartengono al cluster n°3, che caratterizza bacini aventi curve di durata più ripide, segno di una minore permeabilità. L'appartenenza allo stesso cluster sembra anche logica essendo questi due bacini, sottobacini dello stesso corso d'acqua, l'Aurino. Questi bacini sono sottesi da due stazioni idrometriche successive.

Il terzo bacino, l'Adige a Spondigna, appartiene invece al cluster n°1, caratterizzante bacini aventi curve di durata più appiattite e quindi più permeabili. Si può notare come anche geograficamente, quest'ultimo è collocato nel versante opposto ai primi due (fig. 4.9).

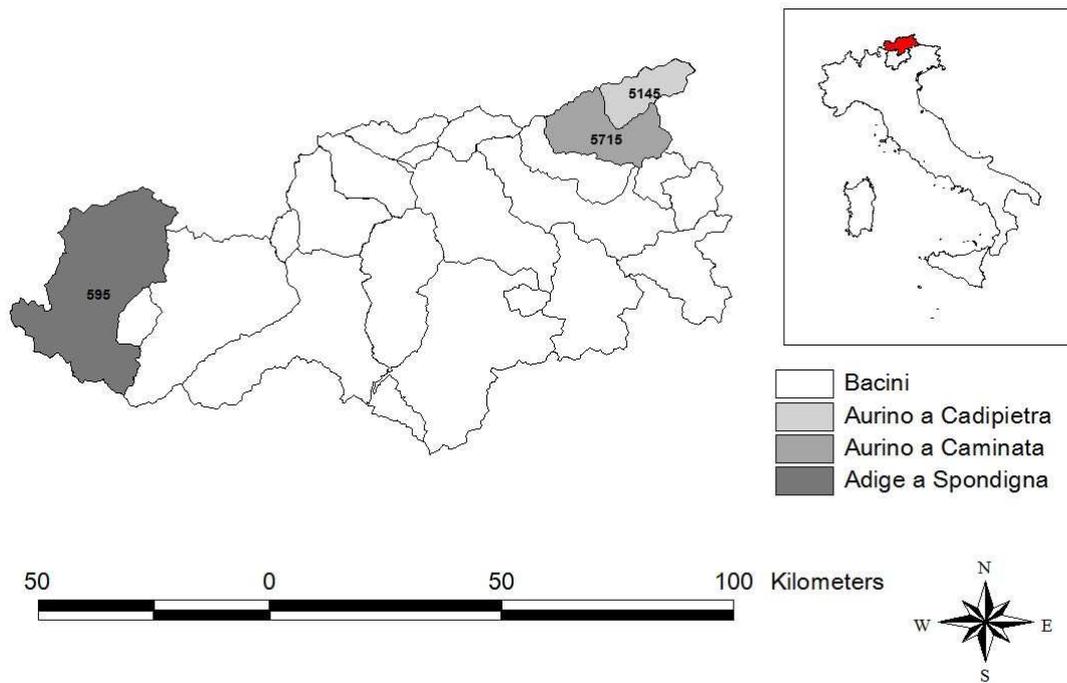


Fig. 4.9. Bacini con tendenza significativa all'incremento dei deflussi di magra (D_{95})

Questi trend possono essere giustificati in base all'adozione di recenti normative relative al rilascio minimo (DMV), che recepiscono direttive comunitarie dirette a tutelare la qualità dei corpi idrici superficiali (ad es. "Water Framework Directive" 2000/60/CE).

L'esercizio di molte derivazioni idriche ha dato luogo, nei decenni passati, a prelievi di entità eccessiva provocando addirittura, in alcuni casi, il prosciugamento di corsi d'acqua. Tale fatto, comune a molti Paesi europei, ha innescato una discussione tra l'opinione pubblica riguardo alla necessità di garantire un adeguato DMV nei tratti di corsi d'acqua oggetto di derivazioni. In ambito internazionale sono stati eseguiti numerosi studi volti alla determinazione delle quantità di acqua residua necessarie per i diversi tipi di ambiente acquatico.

L'attuale normativa di riferimento a livello nazionale, per quanto riguarda il DMV, è costituita dal Decreto del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio del 28 luglio 2004.

Il rilascio di un adeguato DMV rappresenta uno dei principali strumenti per il raggiungimento degli obiettivi di qualità e per la salvaguardia del principio di un uso equo e sostenibile della risorsa idrica. Questo è uno degli aspetti centrali trattati nella bozza per il rinnovo del Piano generale per l'utilizzazione delle acque pubbliche attualmente in vigore, risalente al 1986, elaborato dalla Provincia autonoma di Bolzano.

Capitolo 5

MODELLO REGIONALE PER LA STIMA DELLE CURVE DI DURATA DELLE PORTATE

Le curve di durata delle portate possono essere ricavate nelle sezioni fluviali per le quali risultino disponibili serie storiche sufficientemente estese (almeno 5 anni) di misure di portata media giornaliera.

Le procedure di regionalizzazione consentono di trovare una funzione analitica ed i relativi parametri, validi per zone omogenee del territorio dette “regioni”. Tali funzioni regionalizzate vengono ricercate per aree geomorfologiche e climatiche omogenee in modo da riprodurre al meglio le curve sperimentali disponibili mediante l’applicazione di diverse procedure di analisi.

La disponibilità di tali procedure di regionalizzazione consente quindi di poter ricavare una stima della curva di durata delle portate medie giornaliere in una qualunque sezione fluviale non strumentata in una determinata regione.

La letteratura scientifica internazionale ha recentemente proposto numerosi contributi in tema di regionalizzazione delle curve di durata delle portate, la maggior parte dei quali si riferisce a curve di durata delle portate ricavate a partire dai dati di portata media giornaliera. Tuttavia è bene sottolineare che possono in generale essere impiegati dati osservati a qualsivoglia passo di discretizzazione temporale.

Nella presente Tesi si fa riferimento alle curve di durata annuali mediane, che rappresentano la condizione idrologica tipica per il generico bacino (anno idrologico tipico), calcolate utilizzando dati di portata media giornaliera.

Fra le ricerche proposte dalla letteratura scientifica nazionale ed internazionale per la regionalizzazione della curva di durata delle portate consentono di individuare due tecniche principali di approccio al problema: la prima, che può essere considerata di tipo parametrico, si applica innanzitutto interpolando la curva di durata delle portate,

osservata in alcune sezioni strumentate, con opportune funzioni analitiche, i cui parametri caratteristici sono successivamente regionalizzati in funzione di alcune grandezze geomorfologiche e climatiche proprie del bacino imbrifero sotteso. Taluni autori suggeriscono di regionalizzare le curve di durata delle portate adimensionalizzate rispetto ad un valore caratteristico del deflusso, tipicamente la media sul lungo periodo delle portate giornaliere osservate.

La seconda tecnica di approccio, che può essere considerata di tipo statistico, si basa invece sulla analogia fra la curva di durata delle portate e la funzione di distribuzione di probabilità dei deflussi medi giornalieri nella sezione fluviale di interesse.

Vi è in realtà un'ulteriore procedura di carattere diverso dalle precedenti, che presenta quindi motivi di originalità, che può essere considerata di tipo grafico (*Smakthin et al.*, 1997).

La procedura in questo caso prende in esame le curve di durata annuali mediane nella forma adimensionale ottenute dividendo per la portata media annua (μ_Q) a sua volta ottenuta come la media della curva di durata delle portate totale (*POR-FDC*).

L'applicazione di questo metodo richiede innanzitutto la suddivisione dell'area di studio in regioni omogenee in ognuna delle quali la suddetta curva può essere assunta invariante e posta uguale alla media delle curve di durata mediane adimensionali osservate nei bacini all'interno della regione medesima.

Attraverso opportune tecniche di inferenza statistica vengono identificate per l'area di studio delle relazioni empiriche che consentano di stimare il valore μ_Q della portata media annua per sezioni non strumentate in funzione di indici geomorfologici e climatici significativi. La costruzione della curva di durata delle portate mediana annuale per una qualsiasi sezione fluviale interna all'area di studio si ottiene quindi moltiplicando l'*AFDC* mediana adimensionale regionale per la μ_Q stimata.

Gli stessi autori propongono infine un approccio per la stima indiretta di μ_Q che consiste in una formulazione analitica empirica, identificata mediante tecniche multiregressive, in funzione dei più rappresentativi parametri geomorfologici e climatici. In questo studio si è optato per quest'ultima procedura e nei paragrafi seguenti sono descritte le varie tecniche adottate per costruire il modello regionale.

5.1 Cluster Analysis

La determinazione delle regioni omogenee è stata effettuata tramite “*cluster analysis*”, detta anche analisi di raggruppamento (Viglione *et al.*, 2006). Il raggruppamento dei dati disponibili deve essere effettuato in maniera tale da rendere il più possibile simili le curve di durata delle portate relative a serie di dati appartenenti allo stesso cluster.

Per far ciò si è usato un metodo che si basa sul confronto tra le “matrici delle distanze” dove in questo caso le distanze sono tra curve di durata mediana adimensionali.

Si parte dalla matrice dei dati, di dimensione 23x365 (le portate mediane adimensionali relative a ciascun bacino), e la si trasforma in una matrice delle distanze (matrice quadrata) di dimensione 23x23.

Il punto di partenza fondamentale è la definizione di una misura di similarità o di distanza tra gli “oggetti”, ovvero tra le righe della matrice dei dati. In questo caso si è definita la distanza tra due oggetti, i ed h , utilizzando la metrica euclidea:

$$d(i, h) = \sqrt{\sum_1^j (Q_{i,j} - Q_{h,j})^2}$$

Di seguito è riportato un esempio per i bacini numero 10 e 20 (fig.5.1) corrispondenti rispettivamente ai bacini dell’Isarco a Bressanone (codice: 6979) e del Rio Plan ad Eschbaum (codice: 2075):

$$d(10,20) = \sqrt{\sum_1^j (Q_{10,j} - Q_{20,j})^2}$$

con $j=1, 2, \dots, 365$.

A questo punto diviene fondamentale scegliere un algoritmo che definisca le regole su come raggruppare questi oggetti sulla base della loro similarità. La tecnica utilizzata per il raggruppamento dei bacini omogenei è costituita da una suddivisione dei bacini con l’algoritmo gerarchico di *Ward*.

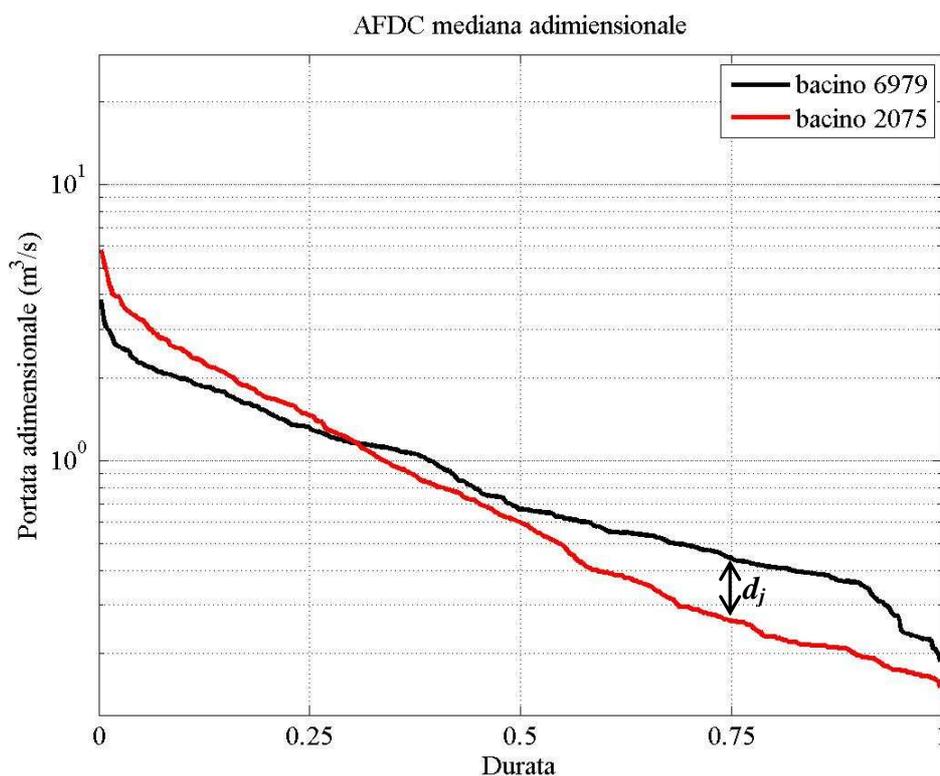


Fig. 5.1. Distanza tra curve di durata mediane adimensionali relative ai bacini 6979 e 2075

L'algoritmo di Ward è di tipo agglomerativo, ovvero parte da una situazione in cui ogni bacino costituisce un cluster. Ad ogni passo dell'analisi si considera l'unione di ogni possibile coppia di cluster e si uniscono quelli la cui fusione determina la minima perdita di informazione, che può essere misurata come la somma delle deviazioni quadratiche di ogni punto dal baricentro del cluster a cui appartiene.

L'algoritmo di Ward è stato utilizzato perché è costruito in modo da generare gruppi compatti e con un numero di elementi confrontabile.

La procedura viene inizializzata con una suddivisione di partenza in k cluster ottenuta con Ward. Per questa configurazione può essere calcolata la statistica:

$$W = \sum_{i=1}^k \left(\sum_{j=1}^{n_i} d_{ij}^2 \right)$$

dove d_{ij} è la distanza euclidea tra l'elemento j -esimo dell' i -esimo cluster e il baricentro dell' i -esimo cluster ed n_i è il numero di elementi dello stesso. A passi successivi si valuta se lo spostamento di un elemento tra due gruppi comporta una

diminuzione di W , nel qual caso viene applicata la correzione. Ciò avviene finché non si giunge ad una configurazione in cui non esistono modifiche in grado di diminuire ulteriormente la dispersione all'interno dei gruppi. Mediante un "dendrogramma" è possibile visualizzare graficamente, secondo ordinate crescenti, il livello di agglomerazione dei cluster (fig. 5.2). In pratica visualizza una gerarchia di partizioni e si può ottenere una singola partizione tagliando il grafico ad un dato livello di distanza della gerarchia.

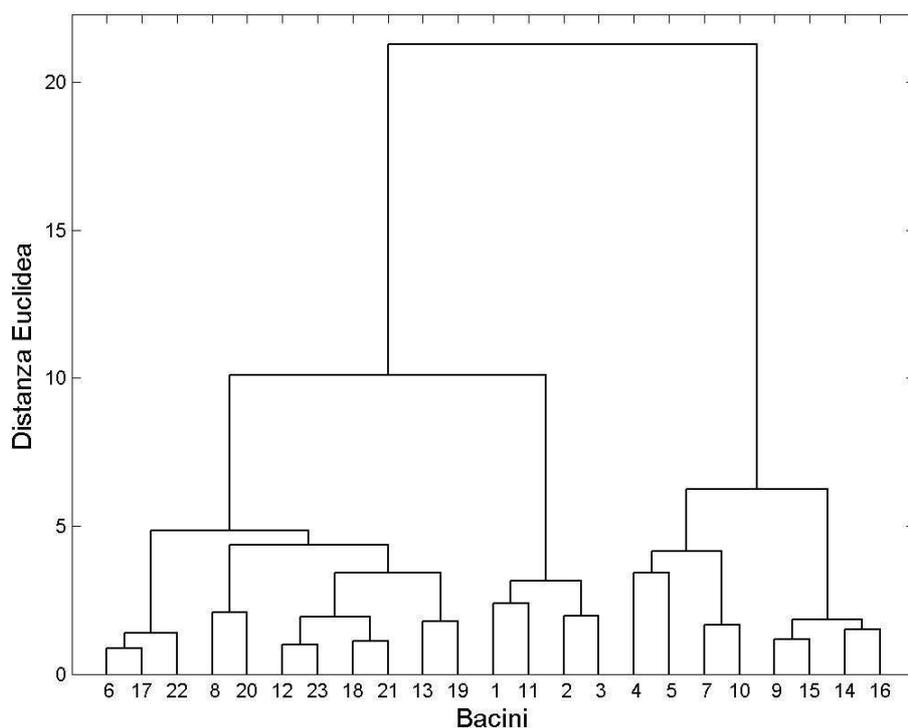


Fig. 5.2. Dendrogramma che visualizza le agglomerazioni dei cluster. I bacini sono identificati con il numero progressivo

Le tecniche di cluster analysis consentono di raggruppare i dati, ma il numero di gruppi che si formano va scelto in maniera indipendente. Nel nostro caso si è cercato di suddividere i bacini nel minor numero possibile di gruppi con massima omogeneità, cercando di tagliare il dendrogramma alle radici dell'insieme dei rami più lunghi. In questo modo si sono individuati 3 cluster (fig. 5.3) e quindi 3 gruppi di curve di durate medie adimensionali aventi caratteristiche simili. Ognuno di questi gruppi è stato caratterizzato attraverso una media delle curve di durata medie annuali adimensionali, invariabili quindi all'interno del medesimo cluster.

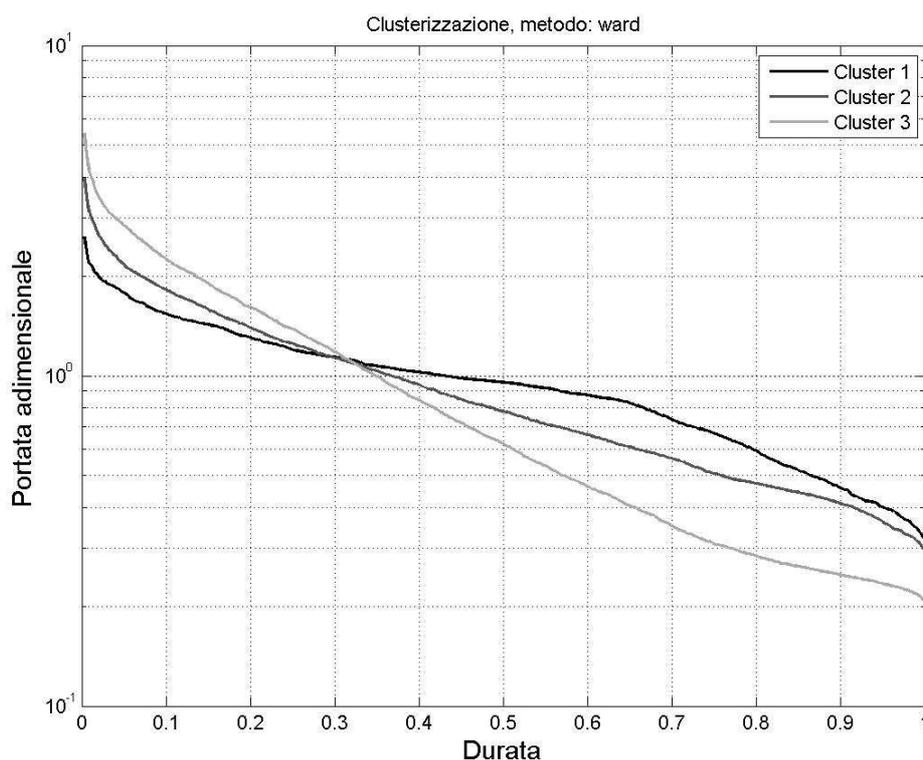


Fig. 5.3. Cluster ottenuti dalla "cluster analysis" mediante il metodo di raggruppamento di Ward

Operando in questo modo si sono identificati i cluster sulla base delle curve di durata adimensionali sperimentali. È necessario quindi prevedere una procedura che permetta di identificare un cluster nei bacini in cui non si dispone di informazioni.

Bisogna innanzitutto decidere come caratterizzare le curve di durata. Anche in questo caso si è utilizzato un metodo legato alla valutazione della distanza euclidea tra i bacini, in funzione dei parametri geomorfologici e climatici di bacino.

Non si possono tuttavia considerare, ai fini della formazione dei gruppi, tutti i parametri geomorfologici e climatici determinati, dal momento che alcuni di questi potrebbero risultare tra di loro molto correlati. Bisogna invece considerare le variabili di bacino più significative e maggiormente scorrelate. La scelta iniziale delle variabili da considerare nell'analisi è di fondamentale importanza, in quanto la successiva suddivisione terrà conto solo di esse.

Ai fini della correlazione tra le variabili si è determinato un valore significativo del coefficiente di correlazione pari a 0.412 ottenuto mediante un test statistico al 5% di significatività. Sono stati quindi presi in considerazione sicuramente tutti i parametri

che presentano un coefficiente di correlazione in valore assoluto inferiore al valore significativo. Dove la correlazione è maggiore si è deciso di scartare solo quei parametri in cui la correlazione è molto alta, prossima a 0.9, e che sono di maggiore incertezza nella loro determinazione mentre si è deciso di tenere gli altri parametri più facilmente determinabili.

In definitiva si sono considerate le seguenti grandezze ai fini dell'identificazione del cluster più appropriato nel caso di bacini non strumentati:

- area bacini (km²);
- quota media (m s.l.m.);
- quota minima (m s.l.m.);
- percentuale di area coperta da ghiacciai (%);
- pendenza media (°);
- *MAP* (mm);

mentre sono state scartate la snow cover duration e la percentuale di area forestata, in ragione dei criteri prima descritti. La distanza euclidea è stata determinata mediante la seguente relazione generale:

$$d = \sqrt{\sum \frac{(X_i - \bar{X}_j)^2}{\sigma_{X_j}^2}}$$

in cui X rappresenta il generico parametro geo-morfo-climatico, il pedice i indica il valore del parametro dell' i -esimo bacino mentre il pedice j il valore del parametro medio del j -esimo cluster, con $i=1, 2, \dots, 23$ e $j=1,2,3$.

Al denominatore vi è la deviazione standard del j -esimo cluster necessaria a rendere adimensionale la distanza euclidea, in modo da rendere confrontabili tra di loro le grandezze in gioco che altrimenti sono caratterizzate da diversa unità di misura. Si sono determinate quindi 3 distanze euclidee d_1, d_2, d_3 , relativamente ad ogni cluster e l'appartenenza è stata identificata dalla distanza minore delle tre.

Naturalmente, prima di adottare definitivamente questa procedura, è stata effettuata una verifica mediante i parametri geomorfologici e climatici determinati per i bacini conosciuti.

5.2 Stepwise Regression Analysis

L'applicazione del metodo grafico ad un generico bacino non strumentato richiede, come già osservato, la definizione di una procedura per la stima della portata media annua μ_Q .

Smakthin et al. (1997), ricordiamo, hanno proposto un approccio per la stima indiretta di μ_Q che consiste in una formulazione analitica empirica, identificata mediante tecniche multiregressive, in funzione dei più rappresentativi descrittori geomorfologici e climatici.

Mediante la procedura di analisi multiregressiva “*stepwise regression analysis*” si sono individuate le caratteristiche geo-morfo-climatiche di bacino statisticamente significative quali variabili esplicative della portata media annua, giungendo all'identificazione di un modello valido per l'intera area di studio, la cui relazione generale è:

$$\hat{\mu}_Q = C_0 \cdot X_1^{C_1} \cdot X_2^{C_2} \cdot \dots \cdot X_n^{C_n}$$

In cui le X rappresentano le variabili esplicative del modello e le C i parametri del modello stimabili mediante una procedura ai minimi quadrati.

L'analisi multiregressiva adottata consiste in un'analisi preliminare delle correlazioni tra la portata media annua e i vari descrittori geomorfologici e climatici in modo da identificare il descrittore maggiormente rappresentativo che nel caso in esame consiste nell'area dei bacini:

CORRELAZIONE	μ_Q	A	H _m	H _{min}	L	SCDm	PENm	% Foresta	MAP
μ_Q	1	0.9965	-0.3852	-0.6917	0.8702	-0.4082	-0.3464	0.2019	-0.1114

Tabella 5.1. Coefficienti di correlazione tra i vari descrittori e la portata media annua

Quindi, a rotazione, si sono aggiunte una alla volta tutte le altre variabili verificando l'attendibilità del modello mediante l'indice di efficienza di Nash e Sutcliffe (*NSE*).

Considerando tutti i bacini nell'analisi, si va a guardare la prestazione su tutti i bacini per cui è necessario tener conto del numero di parametri e dei gradi di libertà correggendo l'indice di efficienza (NSE_{cor})

$$NSE = 1 - \frac{\sum (\mu_{Q,emp} - \mu_{Q,reg})^2}{\sum (\mu_{Q,emp} - \bar{\mu}_{Q,emp})^2}$$

$$NSE_{cor} = 1 - \frac{(N-1)}{(N-p+1)} \cdot (1 - NSE)$$

in cui N è il numero di bacini e p il numero di coefficienti del modello.

Aggiungendo di volta in volta una variabile si è notato che l'indice NSE_{cor} tendeva a crescere fino a quando ad un certo punto si è raggiunto un valore, $NSE_{cor} = 0.9963$, per cui aggiungendo ulteriori variabili l'indice non cresceva più, giungendo in definitiva ad un modello a 3 parametri, ovvero, area del bacino, A (km²), pendenza media, $PENm$ (°) e precipitazione media annua, MAP (mm) definito dalla seguente relazione in scala logaritmica:

$$\ln(\mu_{Q,reg}) = -18.0840 + \ln(A) \cdot 0.9819 + \ln(PENm) \cdot 3.6958 + \ln(MAP) \cdot 0.3107$$

dove ricordiamo che i coefficienti sono stati stimati mediante una procedura ai minimi quadrati.

Dal grafico a dispersione di fig. 5.4 è possibile visualizzare il confronto diretto fra i valori della portata media annua empirici e quelli stimati da cui è possibile osservare una prestazione del modello soddisfacente. La figura mostra i risultati in scala aritmetica la quale presenta però un problema di concentrazione dei valori nel tratto iniziale del grafico. Per ovviare a tale problema si è deciso di riportare i risultati in scala doppio-logaritmica che fornisce una migliore distribuzione dei valori (fig. 5.5).

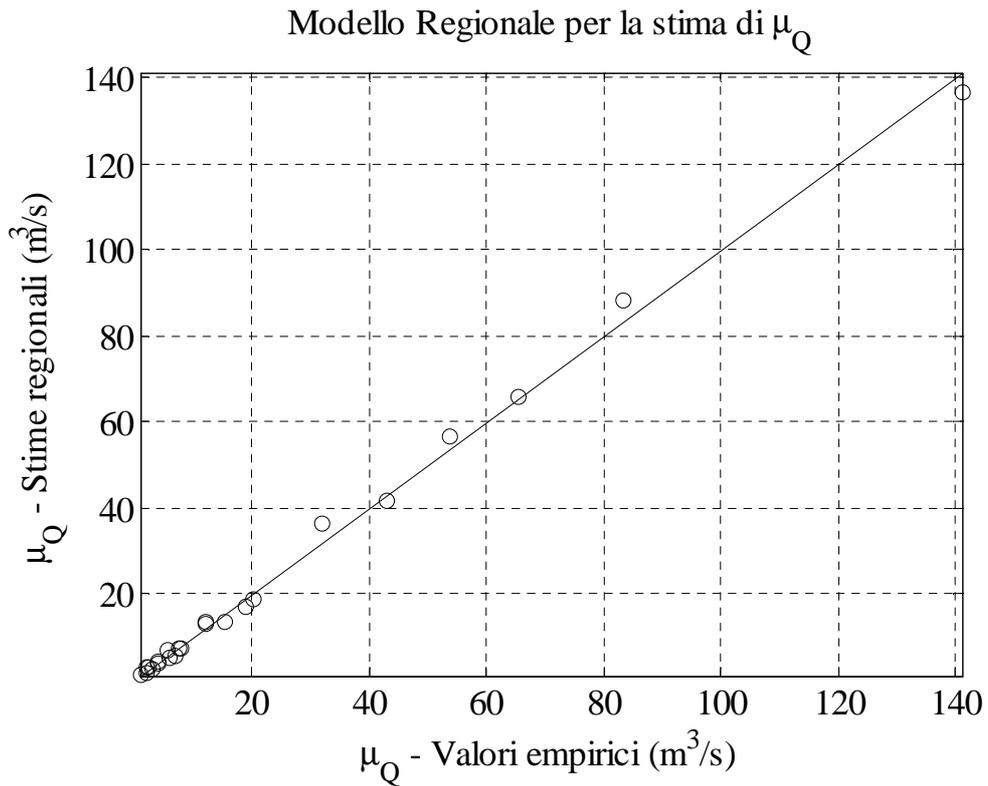


Fig. 5.4. Grafico a dispersione in scala aritmetica rappresentante la prestazione del modello regionale

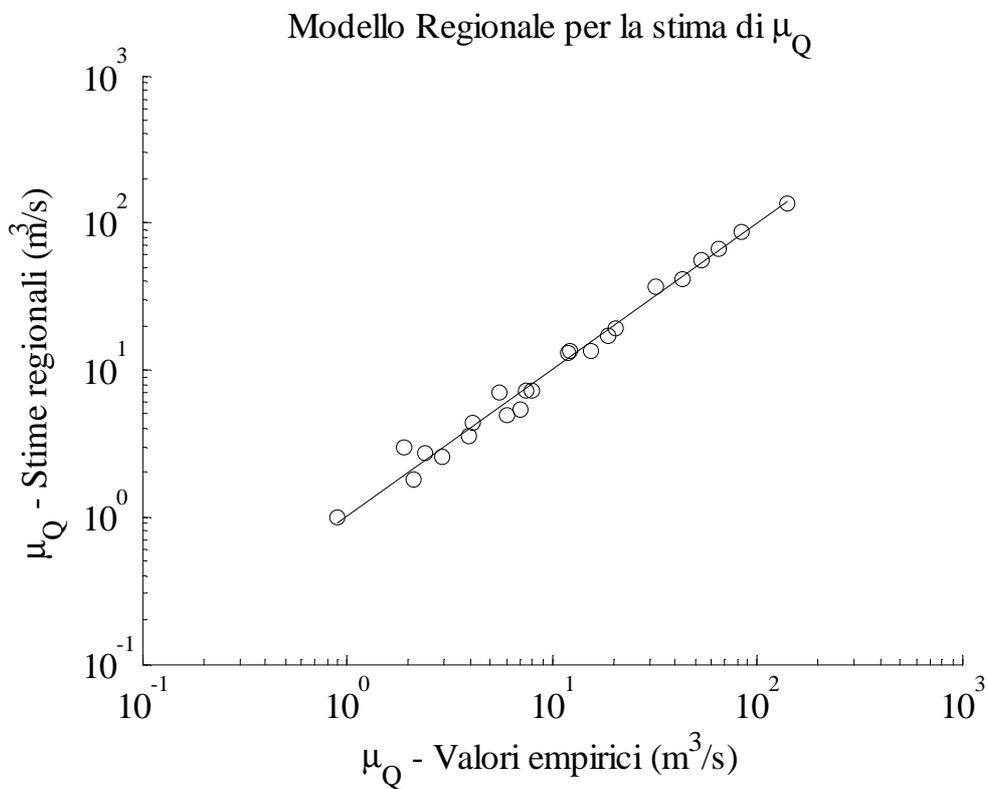


Fig. 5.5. Grafico a dispersione in scala doppio-logaritmica rappresentante la prestazione del modello regionale

5.3 Validazione jack-knife

Per poter valutare la prestazione della tecnica di regionalizzazione adottata in riferimento a bacini non strumentati, si è adottata una tecnica di tipo *jack-knife* (Castellarin et al., 2004) la quale altro non è che una procedura di ricampionamento utilizzata per stimare l'errore standard di una grandezza.

Tale procedura si realizza escludendo un bacino dall'insieme di quelli strumentati utilizzati per l'analisi. Si stimano nuovamente i parametri del modello multiregressivo in precedenza descritto, i quali assumono valori diversi a seguito della variazione introdotta nella base dati e si calcola la curva di durata relativa alla sezione che è stata ipotizzata non strumentata, procedendo quindi al confronto con la curva desunta dai dati osservati. Poiché questi ultimi non vengono in alcun modo utilizzati per l'implementazione delle procedure di stima regionale, si ottiene in tal modo un'indicazione realistica delle prestazioni ritraibili nei confronti di bacini non strumentati. Ripetendo più volte l'operazione, escludendo a turno ciascuna dei bacini strumentati, si ottengono stime statisticamente significative dell'affidabilità del metodo.

Questa volta però l'attendibilità del modello in cross-validazione è stata verificata utilizzando l'indice di efficienza *NSE* originale, calcolato di volta in volta per ogni bacino, come se applicassimo il modello multiregressivo in assenza di osservazioni.

L'applicazione della tecnica jack-knife ha fornito ottimi risultati e anche in questo caso i grafici a dispersione mostrati nelle figure 5.6 e 5.7 permettono di visualizzare il confronto diretto fra i dati empirici e quelli stimati in questo caso in cross-validazione rispettivamente in scala aritmetica e in scala doppio-logaritmica, molto più chiara.

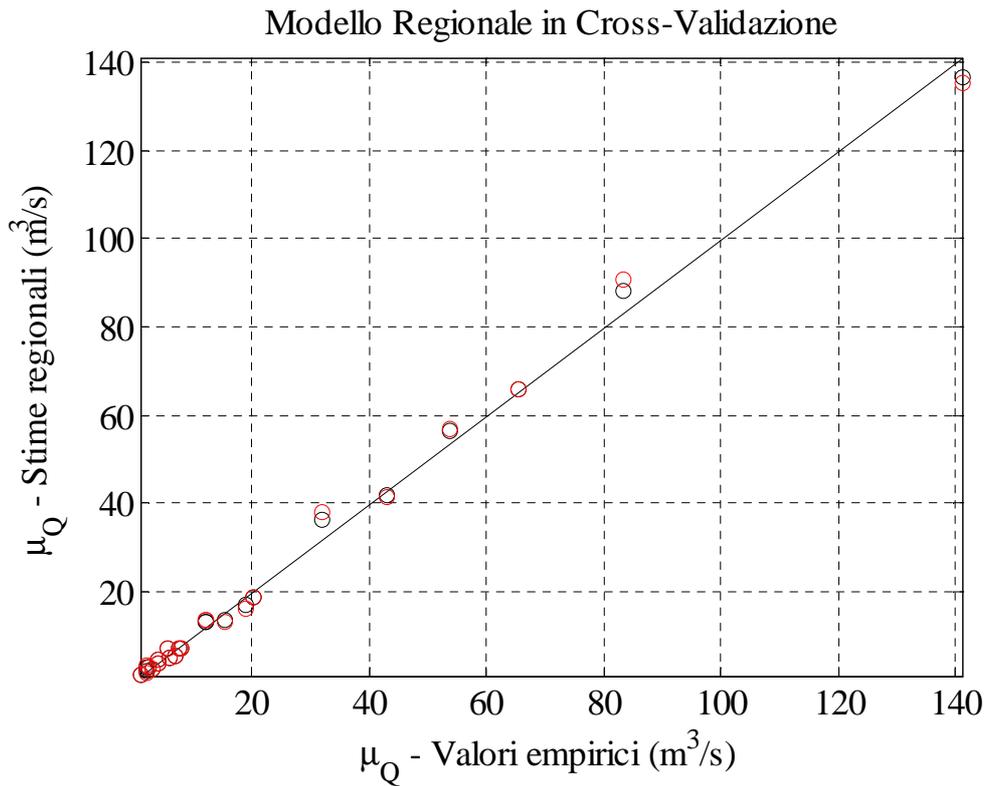


Fig. 5.6. Grafico a dispersione in scala aritmetica rappresentante la prestazione del modello regionale in cross-validazione (in rosso) mediante tecnica jack-knife

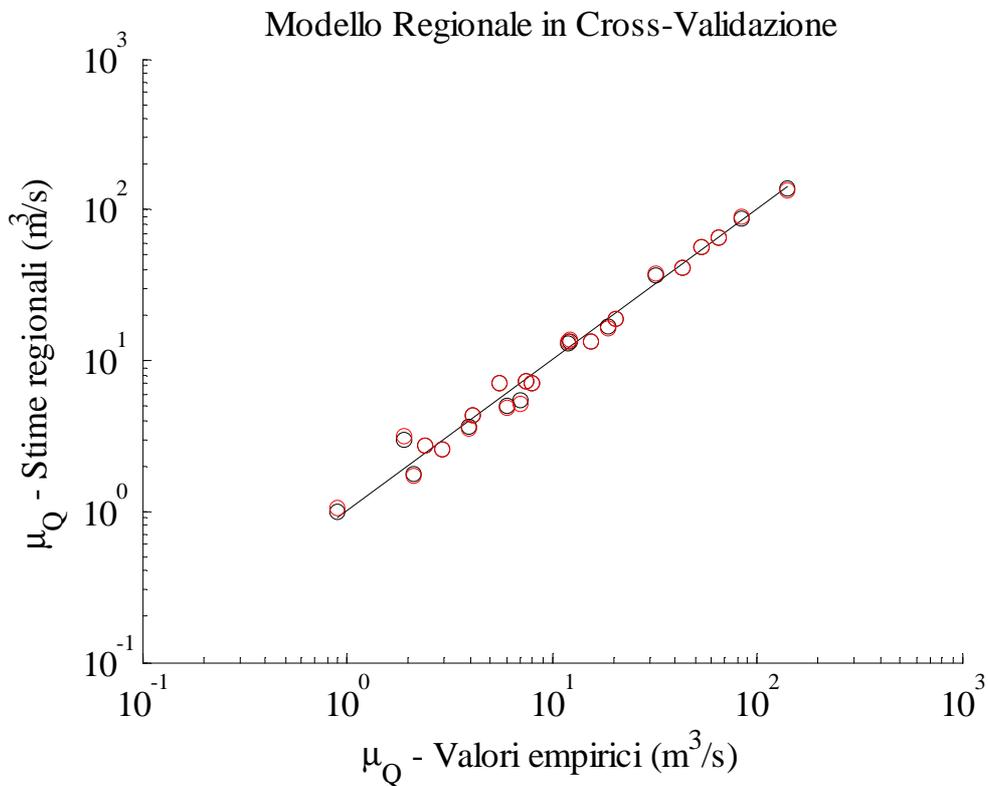


Fig. 5.7. Grafico a dispersione in scala doppio-logaritmica rappresentante la prestazione del modello regionale in cross-validazione (in rosso) mediante tecnica jack-knife

5.4 Discussione dei risultati

Come abbiamo già avuto modo di osservare nei paragrafi precedenti, la suddivisione in cluster ovvero in regioni omogenee è stata effettuata sulla base delle curve di durata mediane adimensionali mentre si è adottato un criterio basato sulla misura della distanza euclidea tra bacini, in funzione dei parametri geomorfologici e climatici di bacino maggiormente scorrelati tra loro e più facilmente determinabili, per quanto riguarda i bacini di cui non si dispone di informazioni.

Il criterio è stato oggetto di verifica prima di poter essere confermato, per cui sulla base dei parametri determinati e considerati utili ai fini della clusterizzazione, previa analisi della correlazione, sono stati identificati i cluster di appartenenza di ogni bacino. Questi sono stati confrontati con i cluster determinati tramite *AFDC* mediane adimensionali dal quale ne è risultata una corrispondenza per il 91% dei casi, per cui abbastanza accettabile. Il restante 9% è rappresentato da un insieme di 2 bacini su 23, il Rienza a Monguelfo (4335) e il Rio Anterselva a Bagni a Salomone (4875). Il primo è risultato appartenere al cluster 2 mentre in realtà appartiene al cluster 1 mentre il secondo è risultato appartenere al cluster 3 quando in realtà appartiene al cluster 2. In entrambi i casi comunque l'appartenenza al cluster corretto risulta essere la seconda scelta ovvero la distanza immediatamente successiva.

C'è da notare però che per un caso del tutto fortuito, in questi due bacini, il fatto di scegliere il cluster sulla base degli indicatori geomorfologici e climatici e quindi il fatto di attribuire un'appartenenza errata al cluster, migliora le prestazioni idrologiche dei bacini in quanto gli errori si combinano in maniera favorevole (fig. 5.8 e 5.9).

Per quanto riguarda l'analisi multiregressiva effettuata mediante la procedura *stepwise regression analysis*, da quanto già osservato nel relativo paragrafo, è stata effettuata un'analisi preliminare di correlazione che ha identificato nell'area del bacino A (km^2) il parametro maggiormente correlato alla portata media annua μ_Q , quindi si è proceduto nell'aggiungere a rotazione un parametro alla volta e verificare il miglioramento o meno delle prestazioni del modello.

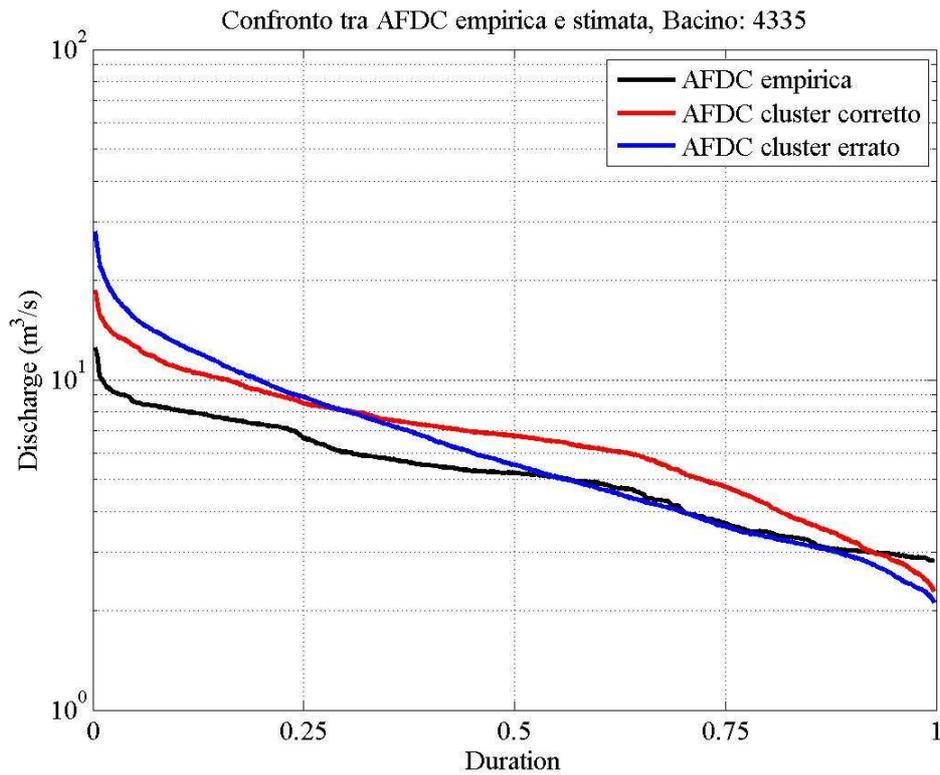


Fig. 5.8. Confronto tra AFDC empirica e AFDC stimata per il bacino 4335

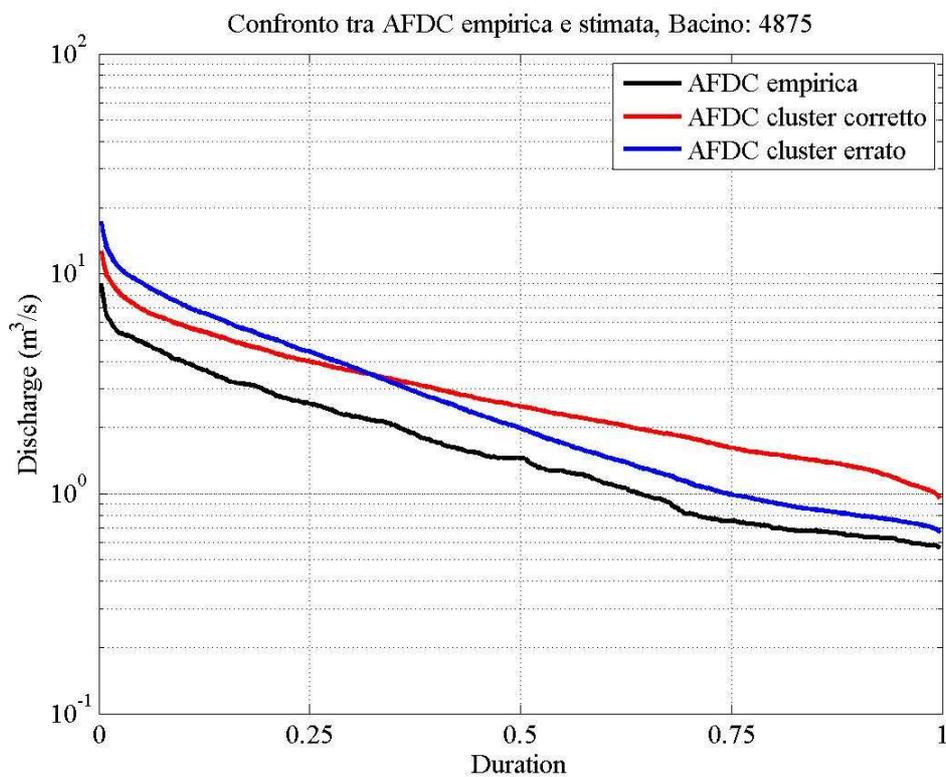


Fig. 5.9. Confronto tra AFDC empirica e AFDC stimata per il bacino 4875

In un primo step si è considerata quindi solo l'area; nel secondo step si è aggiunta la pendenza media che ha migliorato la performance del modello, quindi si è proceduti con un terzo step in cui si è trovato che il *MAP* ha portato ulteriori miglioramenti. Nel quarto step l'aggiunta della lunghezza dell'asta principale ha migliorato ulteriormente il modello ma in maniera impercettibile; da questo momento in poi l'aggiunta di ogni altro parametro non ha portato ulteriori miglioramenti. Nella seguente tabella sono riportate le performance del modello in funzione dei parametri.

STEP	1	2	3	4
<i>NSE_{cor}</i>	0.9904	0.9941	0.9963	0.9965

Tabella 5.2. Efficienza di Nash e Sutcliffe corretta

Data la minima differenza di efficienza tra un modello a 3 parametri ed un modello a 4 parametri si è optato per l'adozione di un modello a 3 parametri in quanto sicuramente più snello e più semplice da applicare.

Un discorso analogo può essere effettuato per la cross-validazione jack-knife in cui per ogni step di regionalizzazione si è cercato di vedere se l'efficienza del modello cross-validato, che questa volta ricordiamo essere in termini di efficienza di Nash e Sutcliffe originale, fosse migliore fin dall'inizio o comunque con un numero di parametri minore, quindi più snello.

Alla fine il risultato è stato identico a quello ottenuto per la costruzione del modello regionale, nel senso che la cross-validazione ha fornito la migliore performance con un modello a 3 e/o 4 parametri.

Le figure 5.10 e 5.11 mostrano l'evoluzione della performance del modello regionale costruito e del modello regionale in cross-validazione.

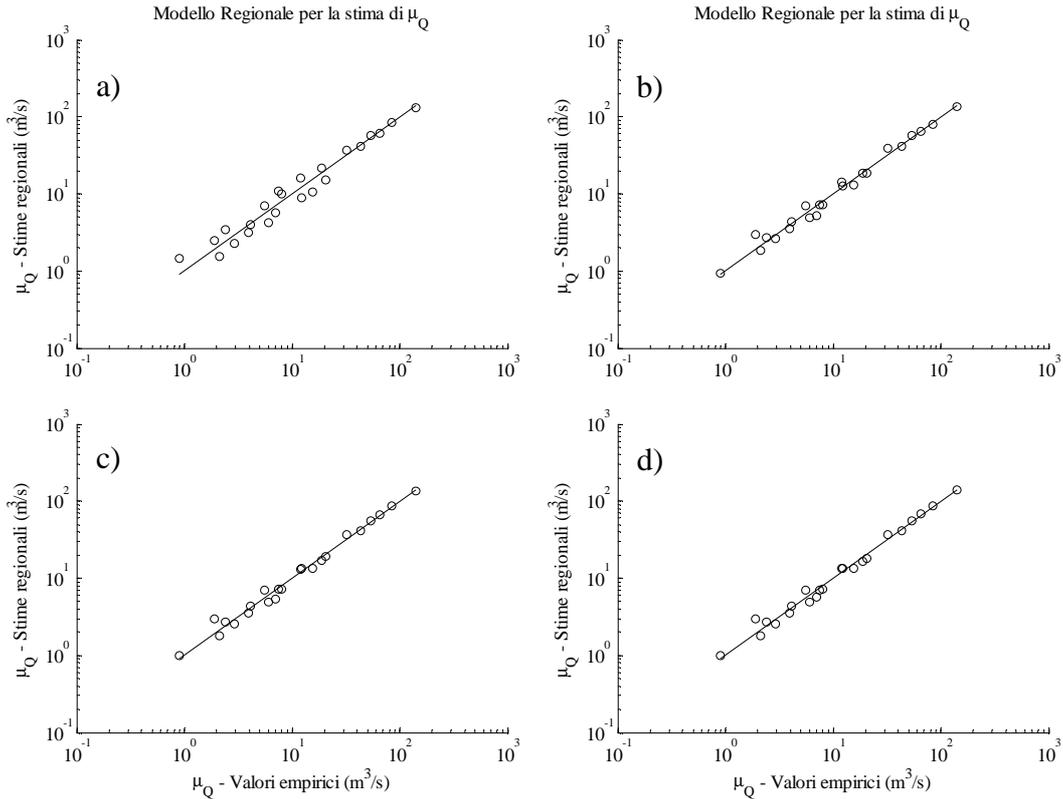


Fig. 5.10. Grafico a dispersione. Performance del modello regionale: a) modello iniziale, b) modello a due parametri, c) modello a tre parametri, d) modello a quattro parametri

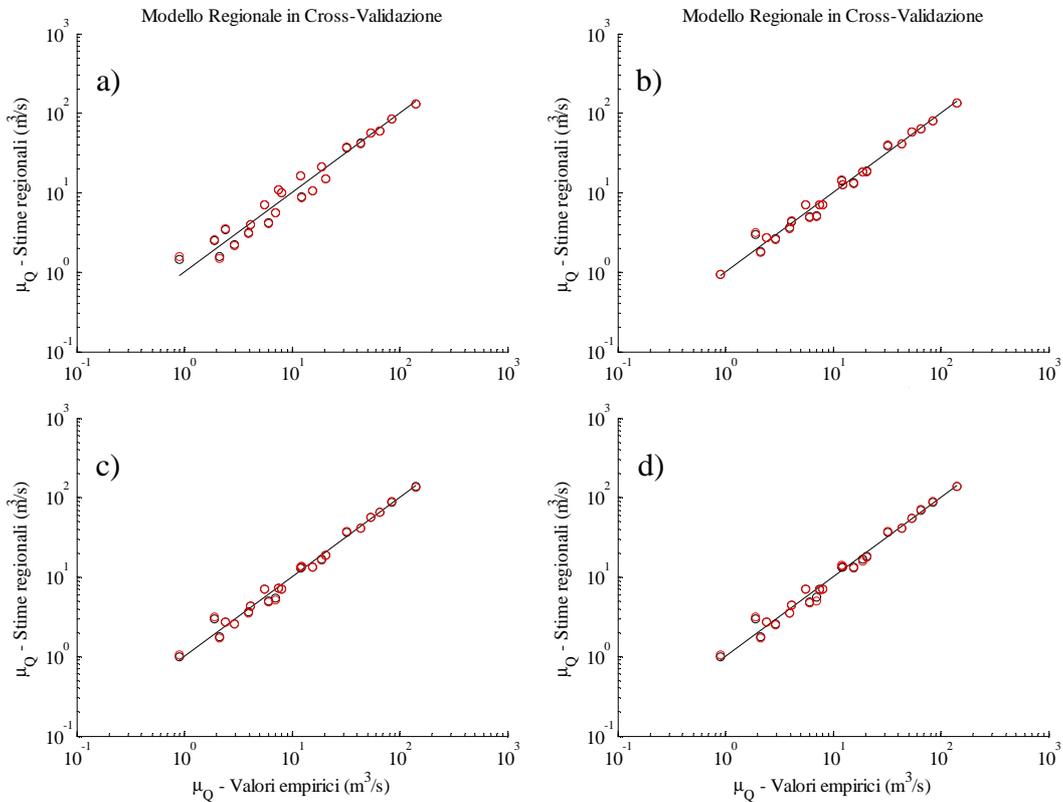


Fig. 5.11. Grafico a dispersione. Performance del modello regionale in cross-validazione: a) modello iniziale, b) modello a due parametri, c) modello a tre parametri, d) modello a quattro parametri

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di Tesi sono state fornite una serie di informazioni tecnico-pratiche e teoriche circa le curve di durata delle portate: definizione, costruzione, interpretazione, principali impieghi ingegneristici.

Queste curve forniscono, per una specifica sezione fluviale, una stima della percentuale di tempo nella quale una data portata viene eguagliata o superata durante l'intero periodo di osservazione preso in considerazione. Ai fini di questa analisi si è fatto riferimento alle curve di durata annuali mediane (*AFDC* mediane), che rappresentano la condizione idrologica tipica per il generico bacino (anno idrologico tipico), ottenute a partire da dati di portata medi giornalieri.

Scopi fondamentali di questa Tesi sono stati quelli di analizzare una serie di bacini idrografici altoatesini, 23 in particolare, con lo scopo di verificare possibili variazioni dell'assetto idrologico, descritto in termini di curva di durata delle portate per un anno ideologicamente tipico (né particolarmente secco, né particolarmente umido), avvenuti nell'ultimo ventennio, dal 1990 al 2009, in seguito a vari fattori quali potrebbero essere cambiamenti climatici, o fattori antropici, e successivamente realizzare un modello regionale che permetta di costruire la curva di durata delle portate per quei bacini di cui non si dispongono informazioni (non strumentati).

Il primo obiettivo del lavoro di Tesi è stato quindi quello di verificare eventuali modifiche subite dal regime di frequenza dei deflussi idrici nel ventennio tra il 1990 ed il 2009, e cioè alterazioni delle curve di durata annuali sperimentali nel periodo di interesse.

A tal fine si sono considerate tutte le curve di durata annuale sperimentali per i bacini di interesse e sul periodo di osservazione e, per poter svincolare l'analisi della variabilità delle curve dalla variabilità del segnale climatico, le curve annuali così costruite sono state adimensionalizzate per il corrispondente valore di precipitazione cumulata annuale a scala di bacino. È stato necessario quindi stimare quanto è piovuto mediamente ogni anno in ogni bacino e a questo scopo si è lavorato in

ambiente GIS attraverso alcuni algoritmi di interpolazione. Questi valori di precipitazione annua sono stati utilizzati per costruire le curve di durata dei deflussi adimensionali (*DAFDC*) per cui è stato anche necessario trasformare le portate medie giornaliere (m^3/s) in deflussi (mm).

Sono state costruite le curve di durata adimensionali relativamente a 15 bacini di cui si disponeva di almeno 19 anni di osservazioni tra i 23 bacini di partenza, in modo da poter avere risultati più accurati. Dette curve *DAFDC* sono utilizzate per estrarre tre valori di deflusso adimensionale relativi alle durate medio-alte, che sono quelle caratteristiche di periodi di morbida e magra. In particolare sono stati considerati i deflussi adimensionali D_{50} , D_{75} e D_{95} , superati rispettivamente per il 50%, 75% e 95% dei giorni in un anno. Detti valori caratterizzano in quest'ordine un valore centrale, un valore nel campo dei deflussi di morbida ed uno in quelli di magra.

L'analisi di ricerca di possibili trend è stata svolta secondo il test di *Sen*, un test statistico non parametrico per il quale si è scelto un livello di significatività del 10%. L'analisi è stata condotta relativamente alle serie di precipitazioni annue a scala di bacino ed alle serie dei tre valori di deflusso adimensionale precedentemente menzionati.

Con riferimento alle precipitazioni, i risultati del test hanno mostrato una generale tendenza decrescente (17 bacini su 23 hanno mostrato un calo nel tempo della precipitazione annuale), rivelatasi però non significativa sulla base del test di *Sen*.

Per quanto riguarda i deflussi, nel caso dei deflussi medi e di morbida, ovvero D_{50} e D_{75} si è osservato un equilibrio tra trend positivi e negativi, e nessuno di questi trend è risultato essere statisticamente significativo ad eccezione di una tendenza al decremento del D_{75} nel tempo significativa al 10% per il Rio Vize a Novale (3355) ed una tendenza all'incremento sempre del D_{75} nel bacino dell'Aurino a Cadipetra (5145). Infine, per i deflussi di magra D_{95} è preponderante il caso di trend positivi che risultano però significativi solo in tre casi ovvero nei bacini dell'Aurino a Caminata (5715), dell'Aurino a Cadipetra (5145) e dell'Adige a Spondigna (595).

Questi trend possono essere giustificati in base all'adozione di recenti normative relative al rilascio minimo (DMV), che recepiscono direttive comunitarie dirette a tutelare la qualità dei corpi idrici superficiali (ad es. "Water Framework Directive" 2000/60/CE).

Constatata la sostanziale invarianza nel tempo delle curve di durata annuali per l'area in esame, il secondo ed ultimo obiettivo di questa Tesi è stato quello di predisporre un modello regionale che permettesse di stimare dette curve (cioè *AFDC* mediane) in bacini sprovvisti di osservazioni idrometriche. Per questo motivo è stato necessario innanzitutto effettuare una suddivisione dell'area di studio in "regioni omogenee", aventi cioè caratteristiche simili. Questa operazione è stata effettuata mediante una tecnica di "cluster analysis", detta anche analisi di raggruppamento, basata su una misura della distanza tra le curve di durata annuali mediane adimensionali sperimentali dei diversi bacini.

La tecnica di raggruppamento utilizzata è costituita dall'algoritmo gerarchico di Ward che è un algoritmo di tipo agglomerativo. In pratica si è partiti da una situazione in cui ogni bacino costituiva un cluster. Ad ogni passo dell'analisi l'algoritmo ha considerato l'unione di ogni possibile coppia di cluster e ha unito quelli caratterizzati da distanze minime tra le curve sperimentali, ovvero la cui fusione determinava la minima perdita di informazione finché non è giunto ad una configurazione in cui non esistevano modifiche in grado di diminuire ulteriormente la dispersione all'interno dei gruppi. Il risultato della cluster analysis è stato una suddivisione dell'area di studio in 3 cluster o gruppi omogenei ognuno dei quali caratterizzato da una serie di curve di durata annuali mediane adimensionali e rappresentato dalla media di queste curve.

Si è adottato quindi un criterio che permettesse di attribuire l'appartenenza di un qualsiasi bacino di cui non si dispongono informazioni ad un cluster. Questo criterio è basato sull'applicazione della formula della distanza euclidea ai parametri geomorfologici e climatici di bacino. Si sono scelti come parametri utili quelli meno intercorrelati ovvero: area del bacino (km^2), quota media (m s.l.m.), quota minima (m s.l.m.), percentuale di area coperta da ghiacciai (%), pendenza media ($^\circ$), *MAP* (mm). La formula permette il confronto tra le grandezze del generico bacino e quelle dei vari cluster, determinando 3 valori di distanza euclidea, uno per ogni cluster, di cui quello minimo indica il cluster di appartenenza.

Individuati i cluster si è predisposto un modello regionale di tipo "grafico" che si appoggia sulle curve adimensionali valide per ciascun cluster. Per applicare il modello è stata adottata una analisi multiregressiva che permettesse di stimare la

portata media annua μ_Q . In particolare mediante la stepwise regression analysis sono stati determinati i parametri geomorfologici e climatici di bacino più rappresentativi, giungendo all'identificazione di un modello a 3 parametri caratterizzato dalla seguente espressione logaritmica:

$$\ln(\mu_{Q,reg}) = -18.0840 + \ln(A) \cdot 0.9819 + \ln(PENm) \cdot 3.6958 + \ln(MAP) \cdot 0.3107$$

dove si possono ben riconoscere i parametri scelti mediante l'analisi che sono l'area del bacino A (km²), la pendenza media $PENm$ (°) e la precipitazione media annua MAP (mm), mentre i coefficienti sono stati stimati mediante una procedura ai minimi quadrati.

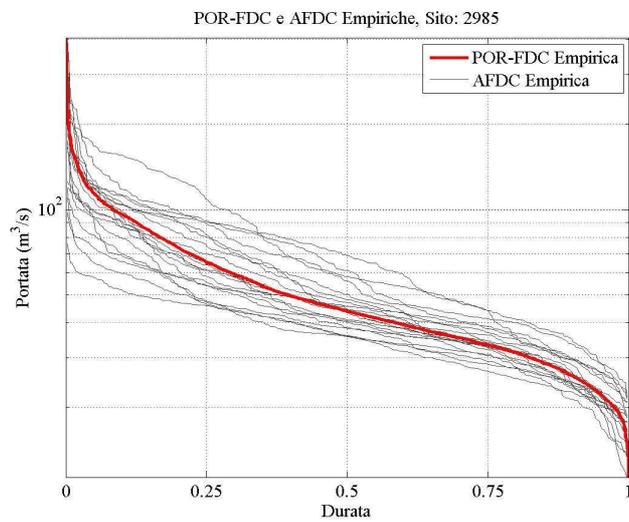
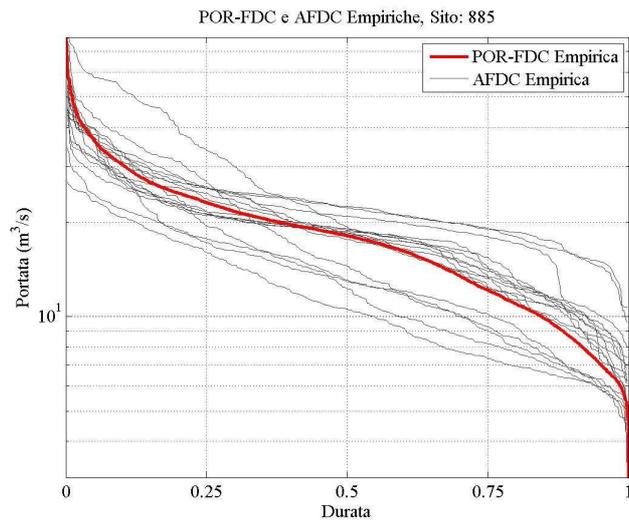
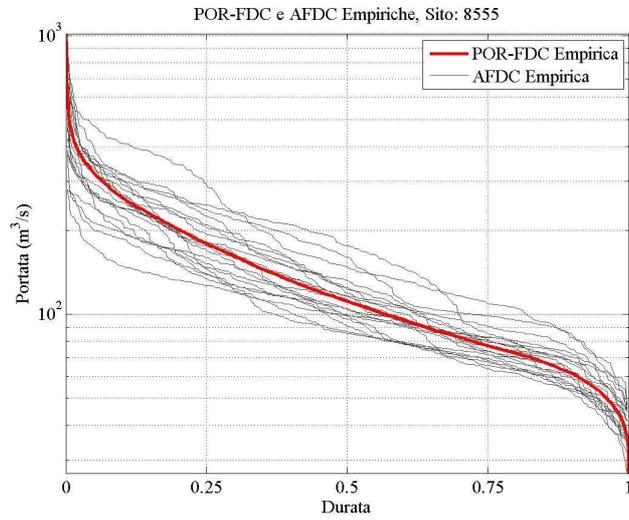
La prestazione del modello regionale è stata valutata mediante una tecnica di cross-validazione di tipo jack-knife la quale ha fornito infine risultati molto soddisfacenti con valori di portata regionali e stime di portata cross-validata molto prossimi.

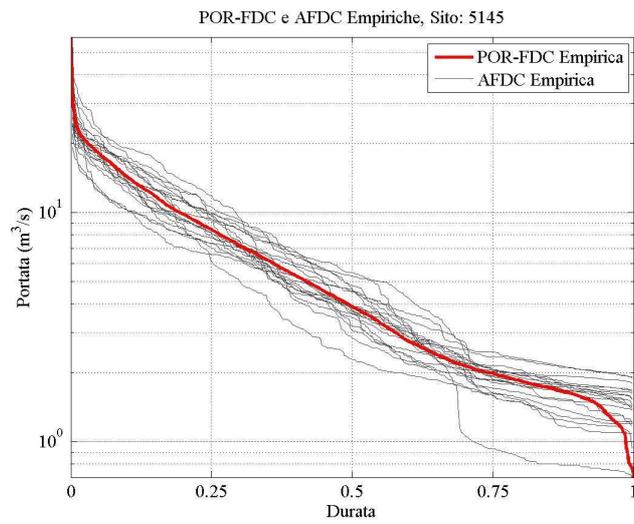
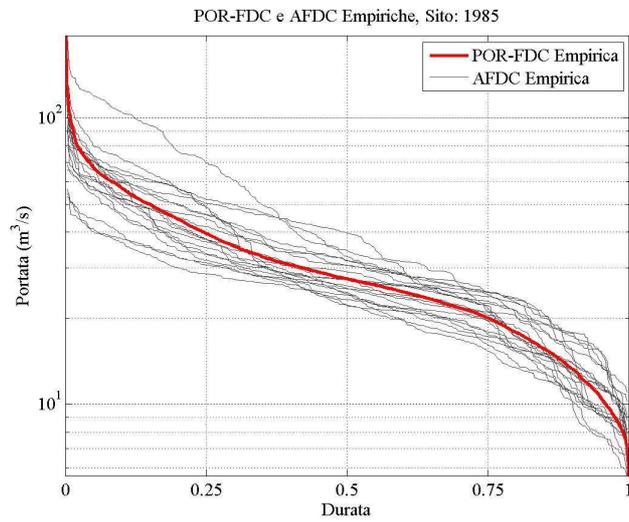
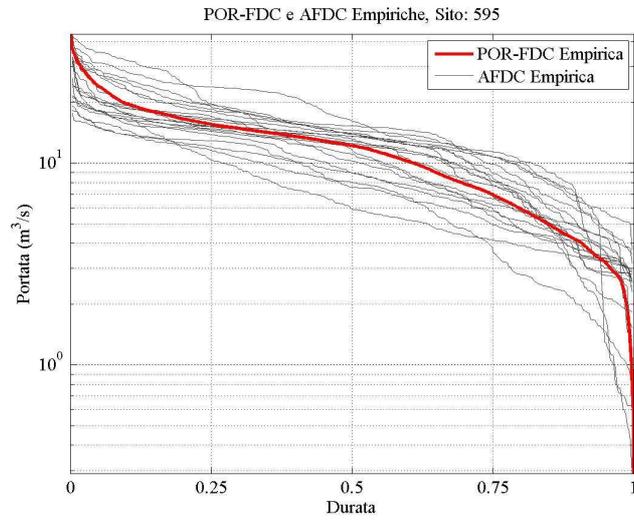
APPENDICE

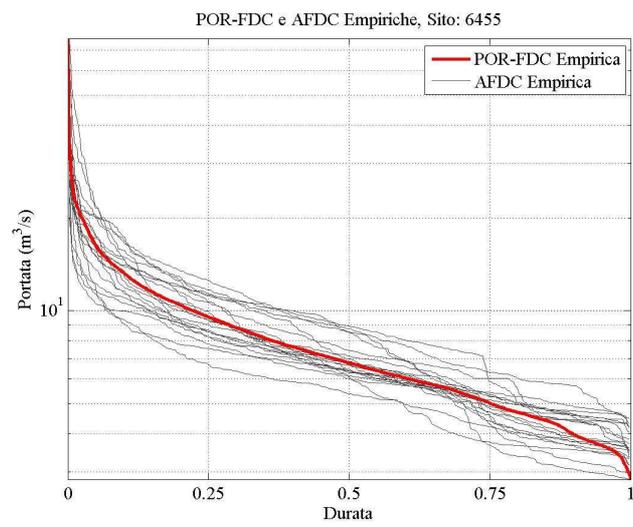
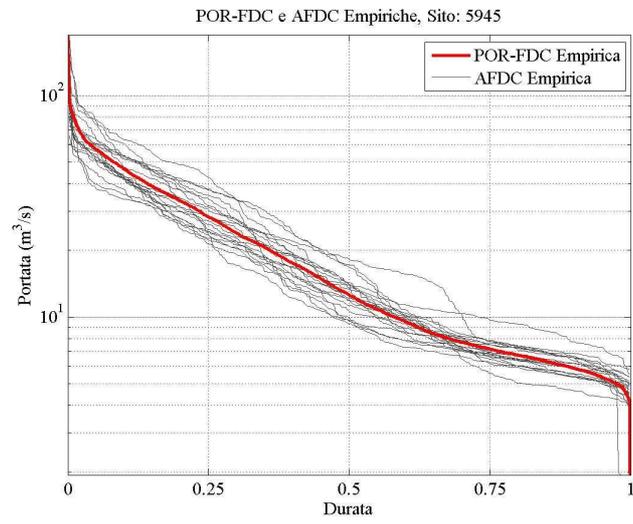
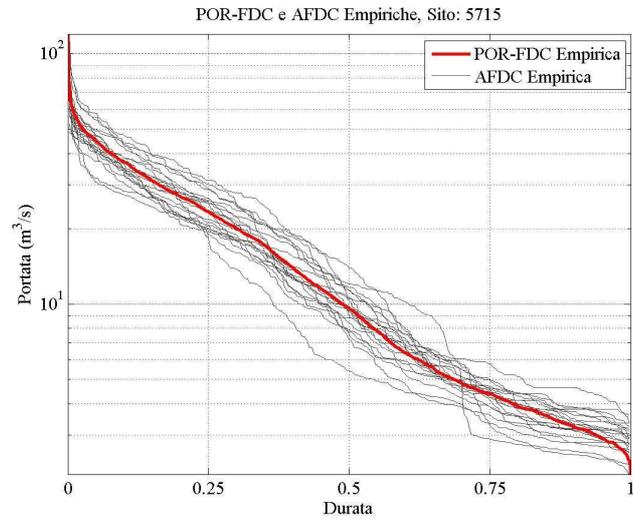
In appendice sono riportati tutti i grafici costruiti durante lo svolgimento del presente lavoro di Tesi relativamente ai bacini considerati ed al periodo di riferimento che ricordiamo essere il ventennio dal 1990 al 2009. In particolare si possono osservare in ordine:

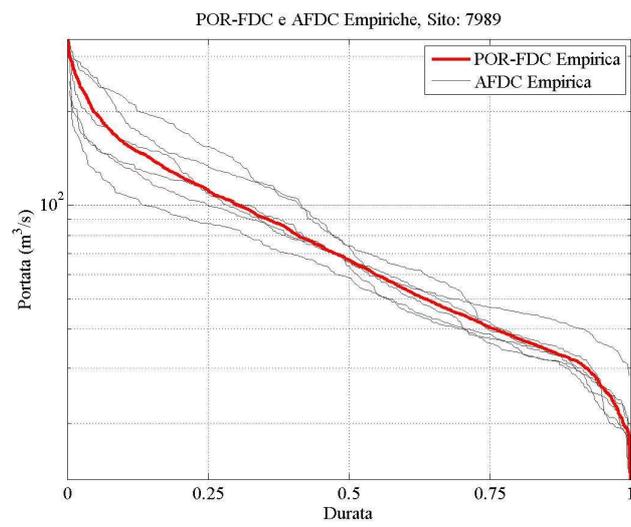
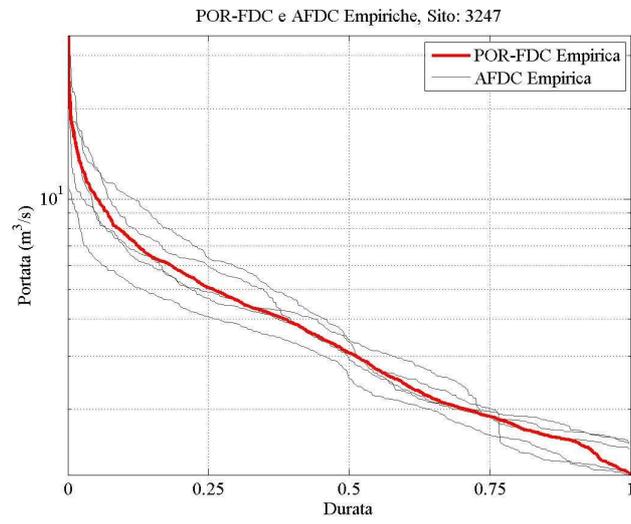
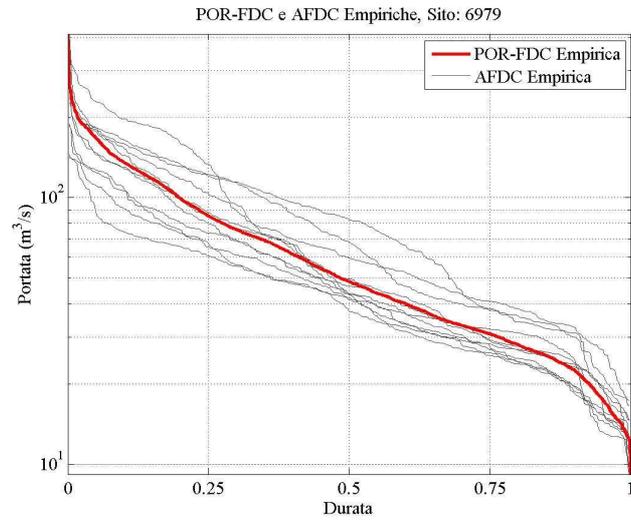
- Curve di durata totali (*POR-FDC*) ed annuali (*AFDC*);
- Curve di durata annuali mediane e percentili;
- Curve di durata dei deflussi adimensionali (*DAFDC*);
- Rette di regressione per gli afflussi meteorici;
- Rette di regressione per i deflussi D_{50} , D_{75} e D_{95} .

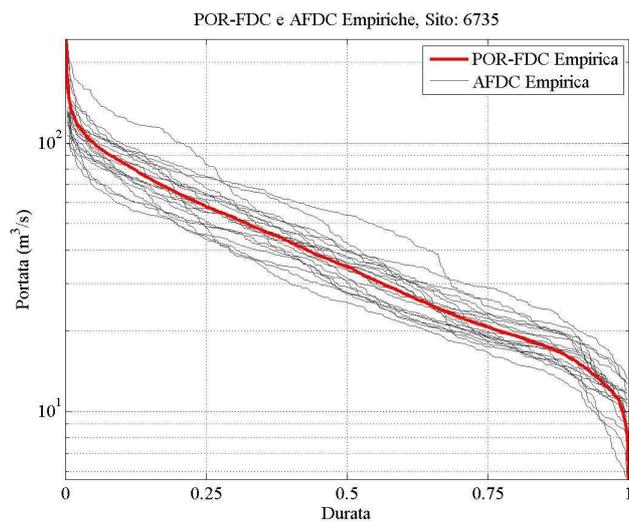
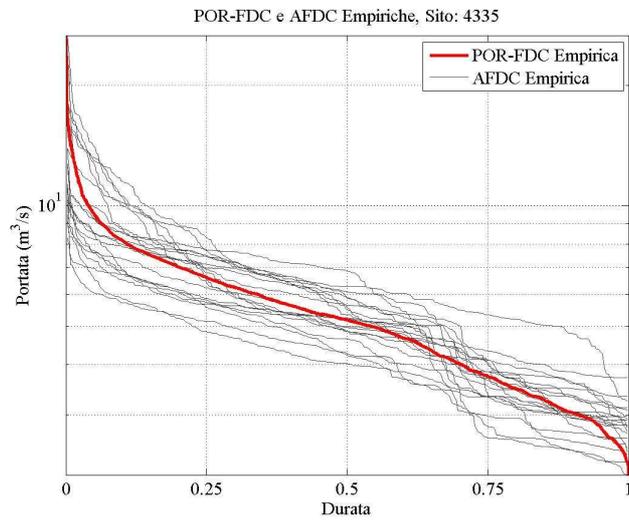
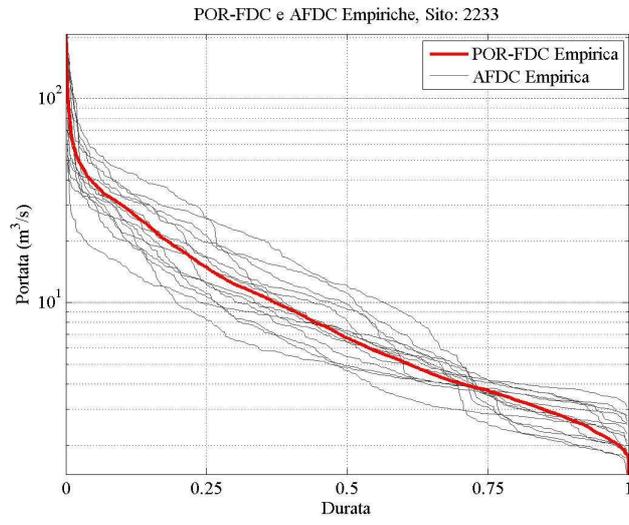
Curve di Durata Totali (POR-FDC) e Curve di Durata Annuali (AFDC) costruite per ogni bacino

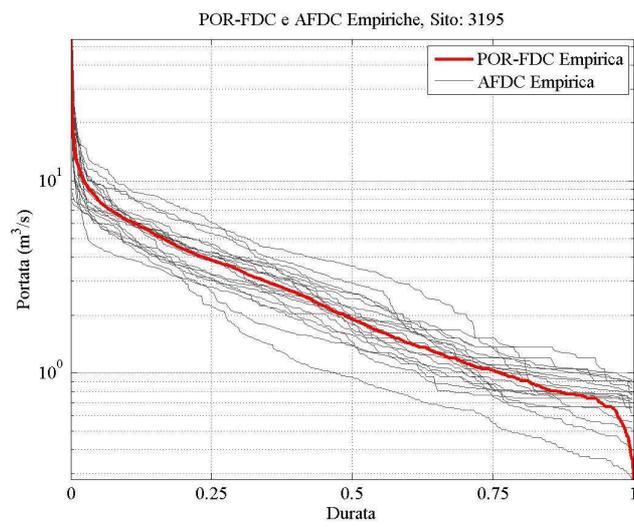
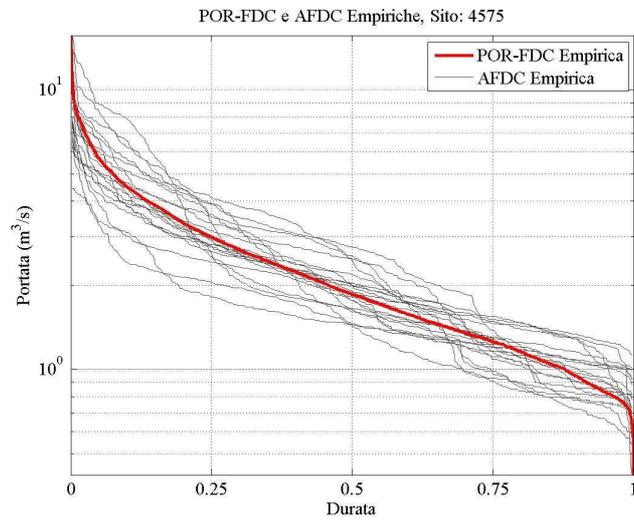
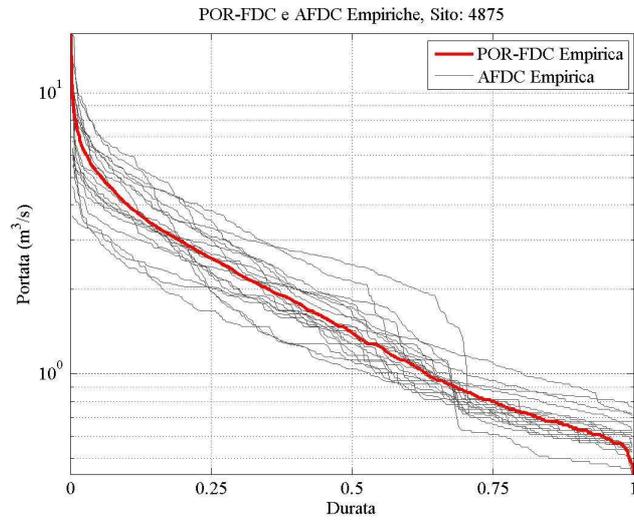


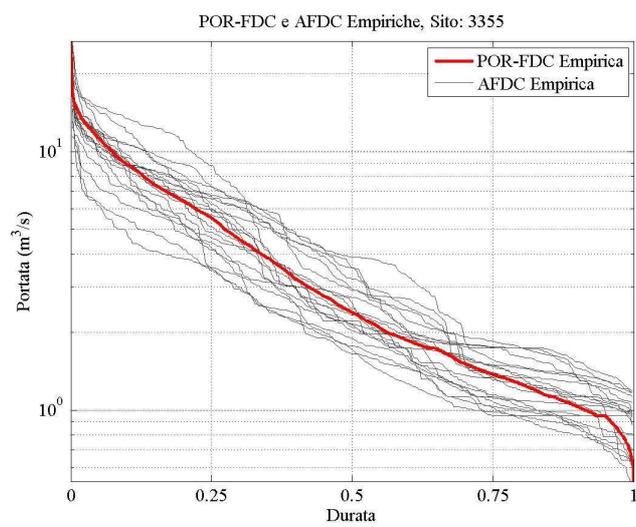
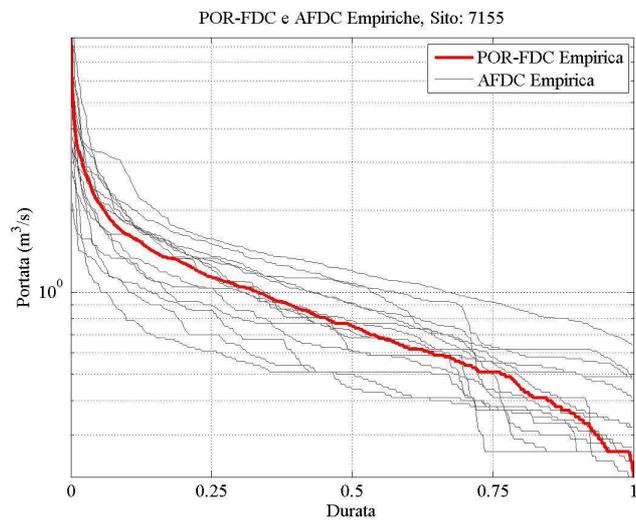
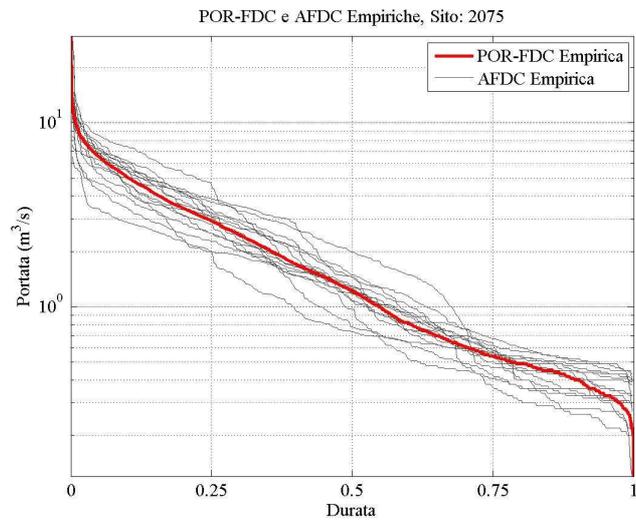


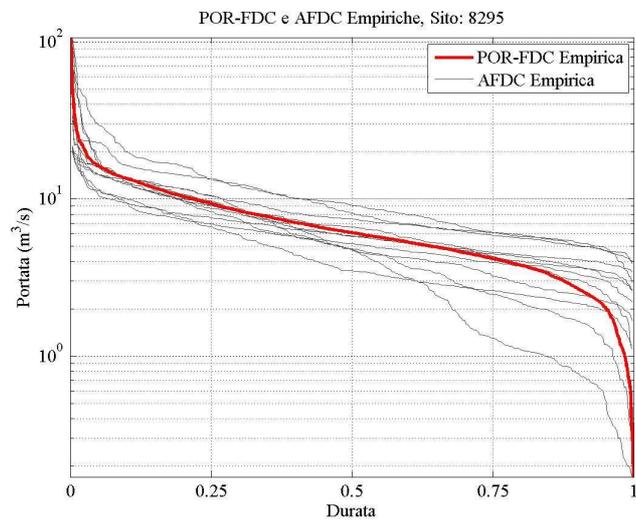
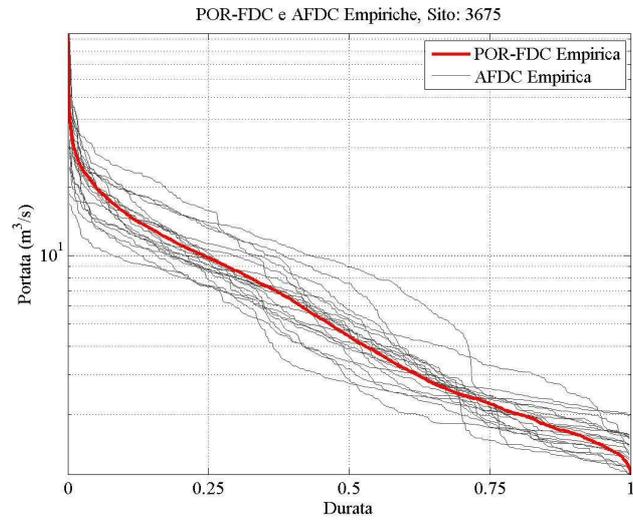




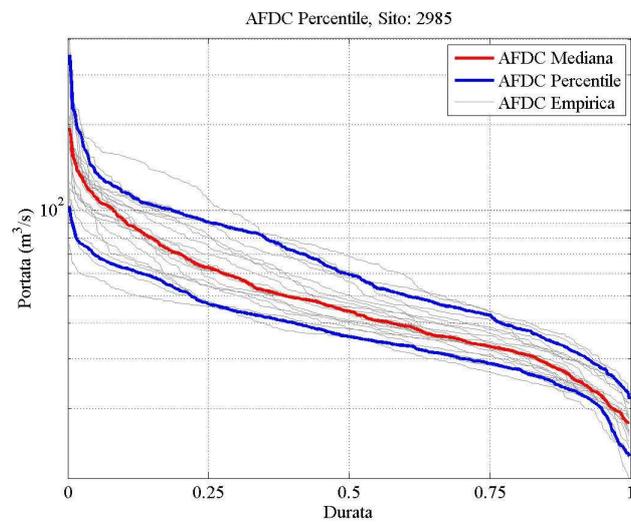
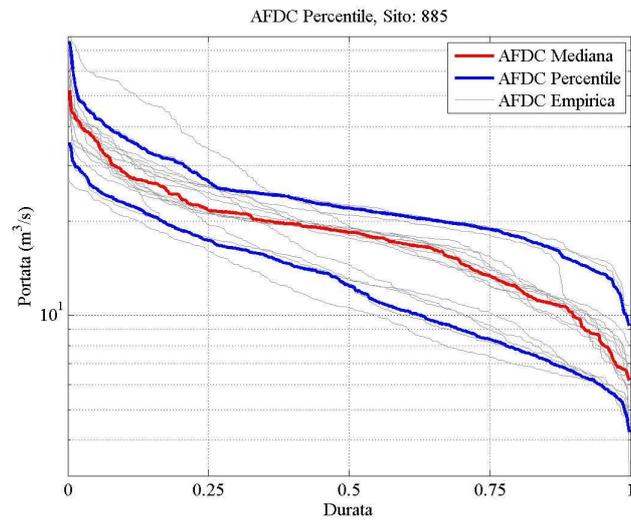
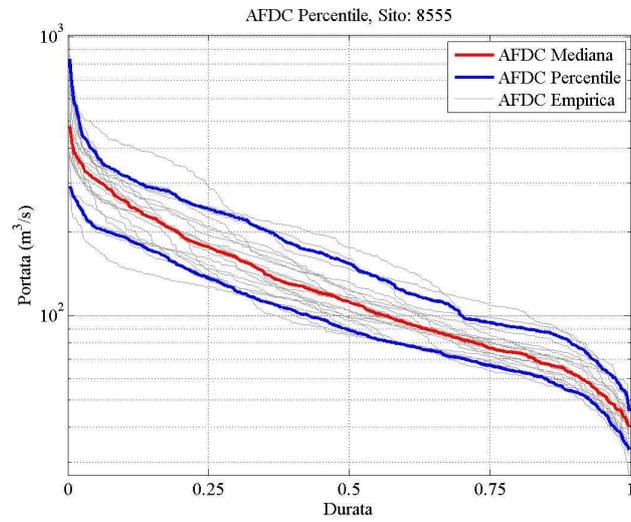


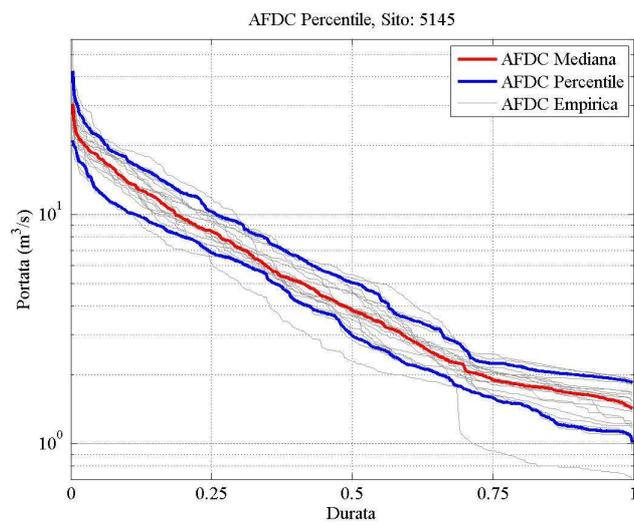
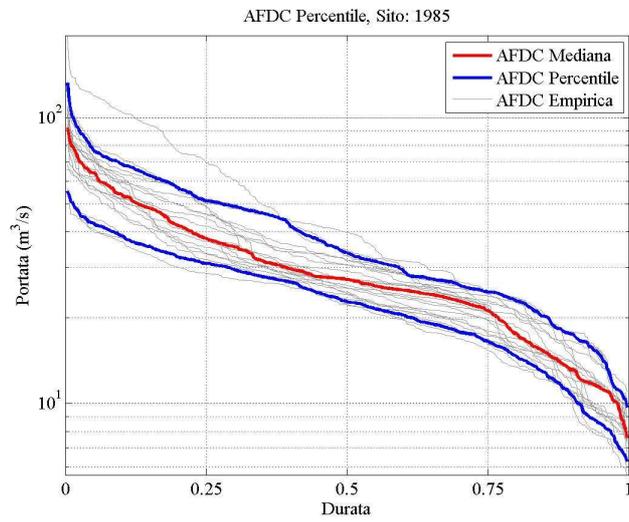
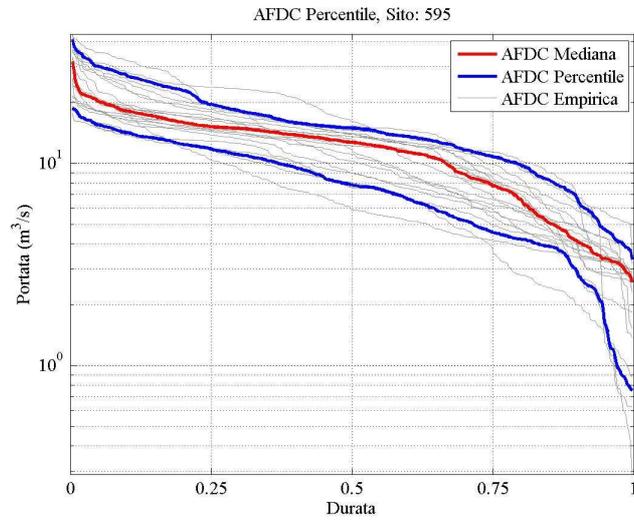


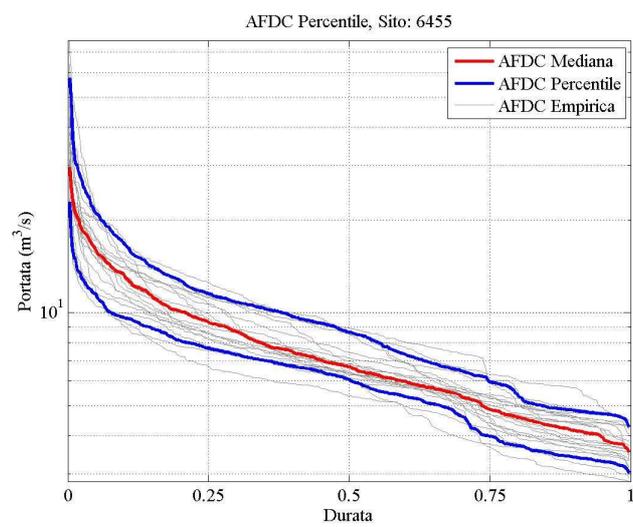
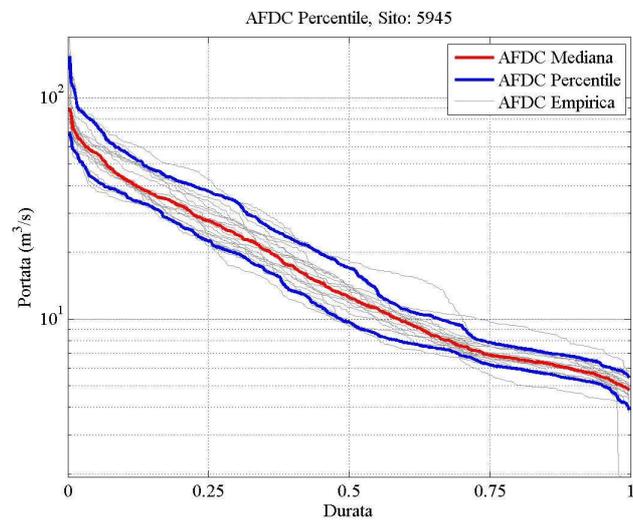
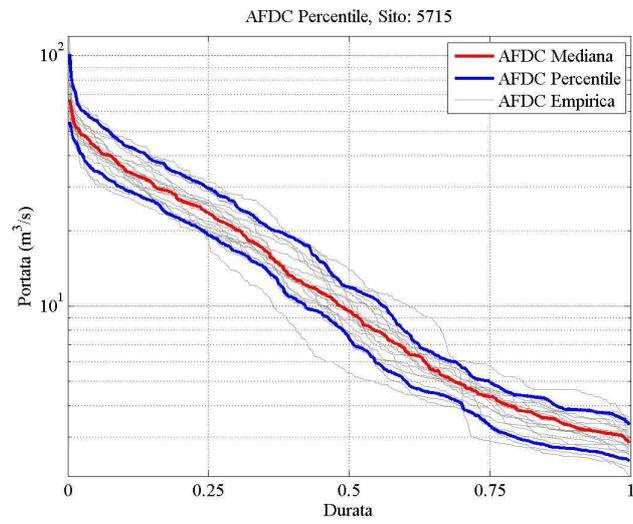


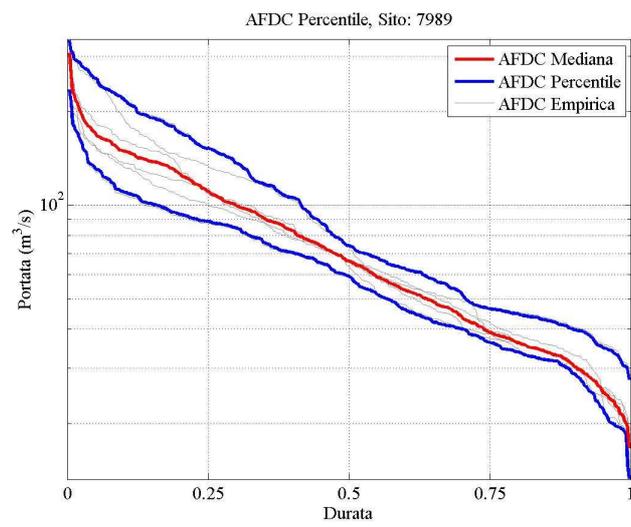
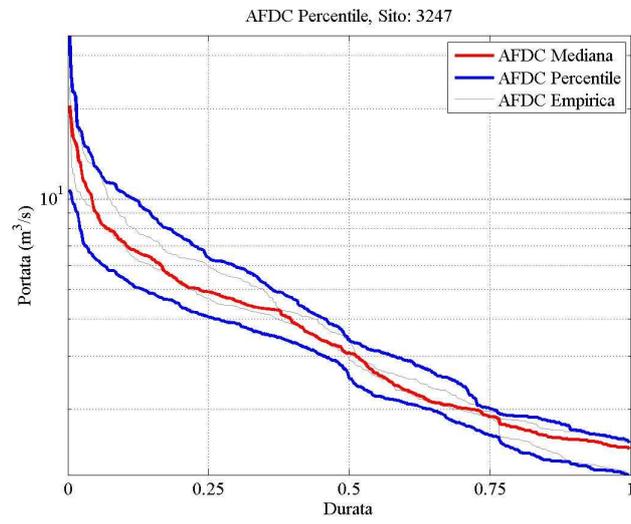
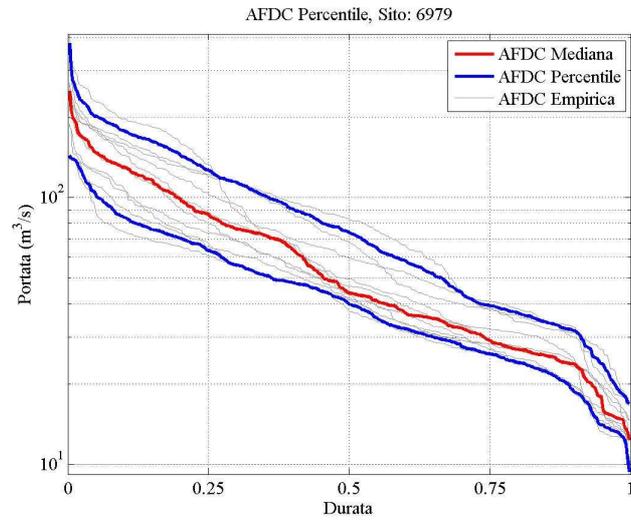


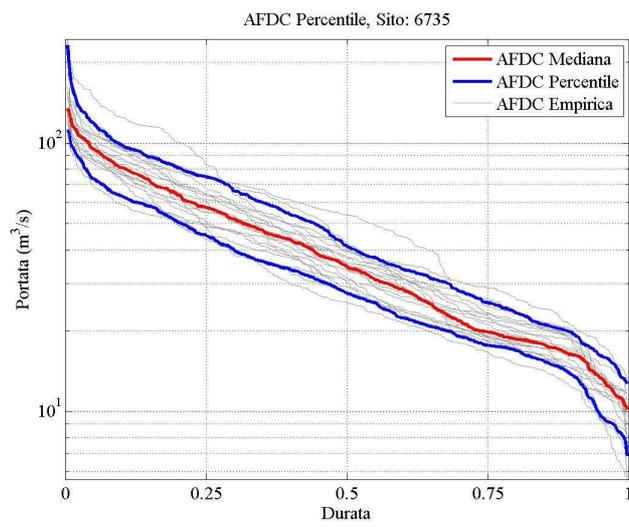
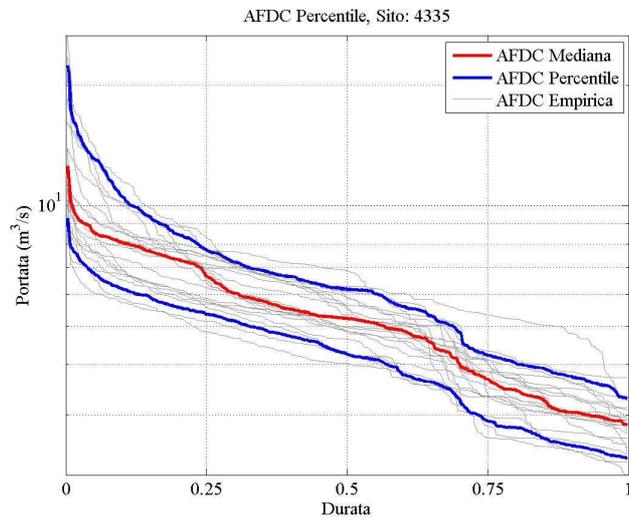
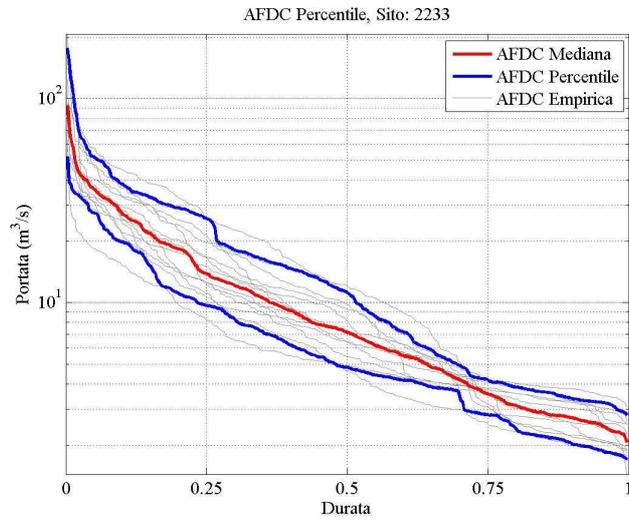
Curve di Durata Annuali, Mediane e Percentili (5% e 95%) costruite per ogni bacino

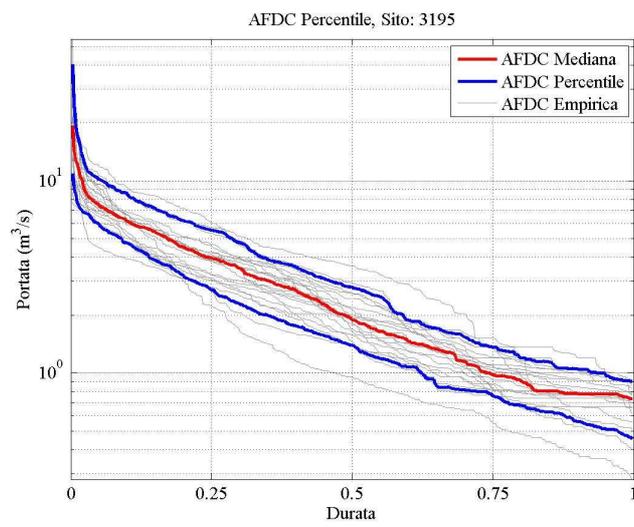
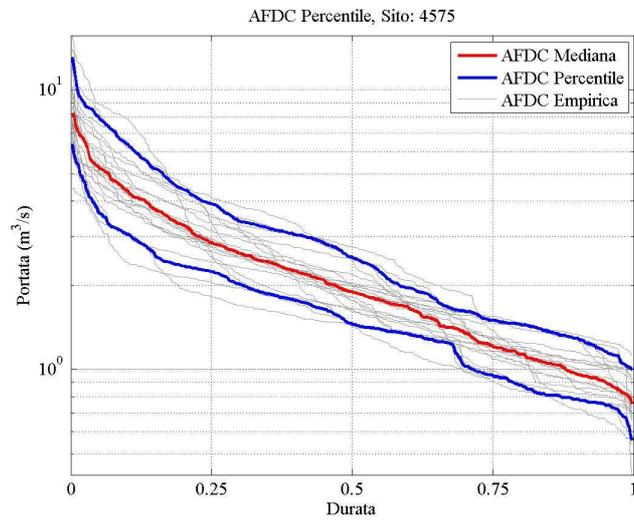
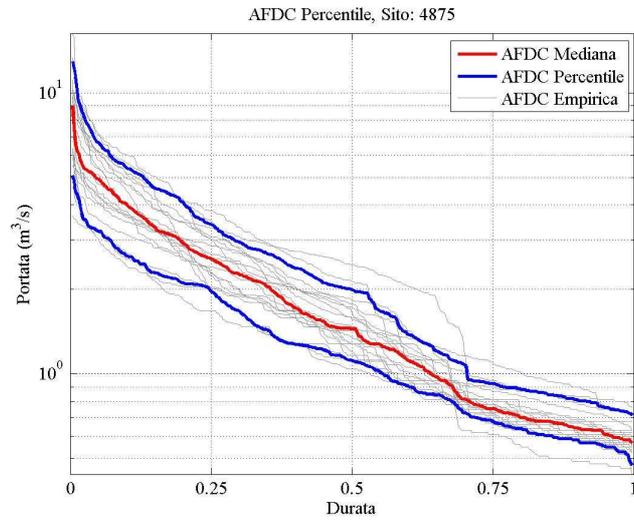


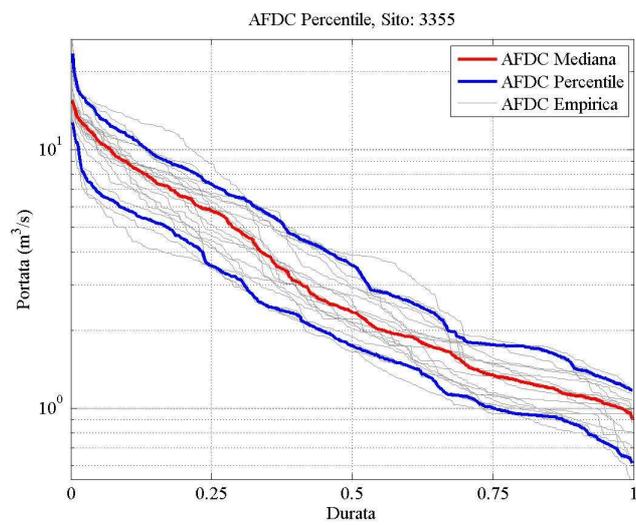
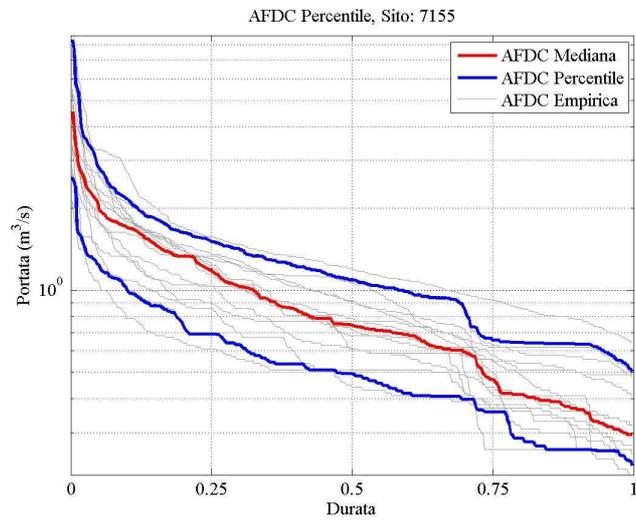
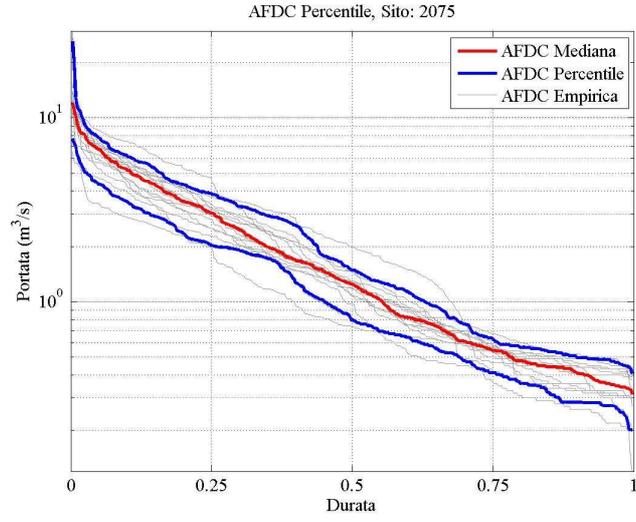


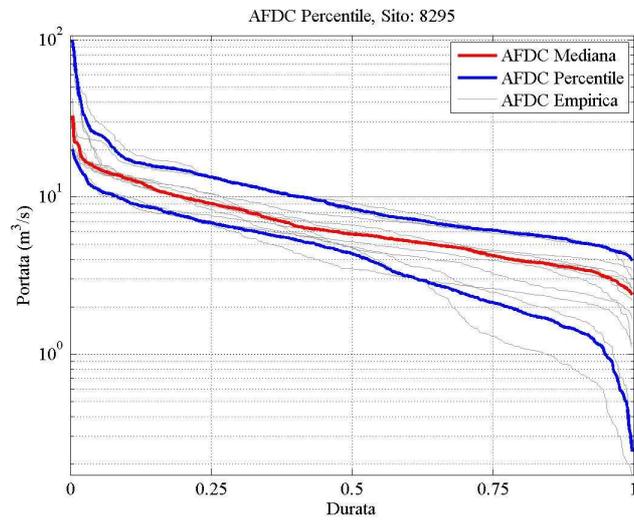
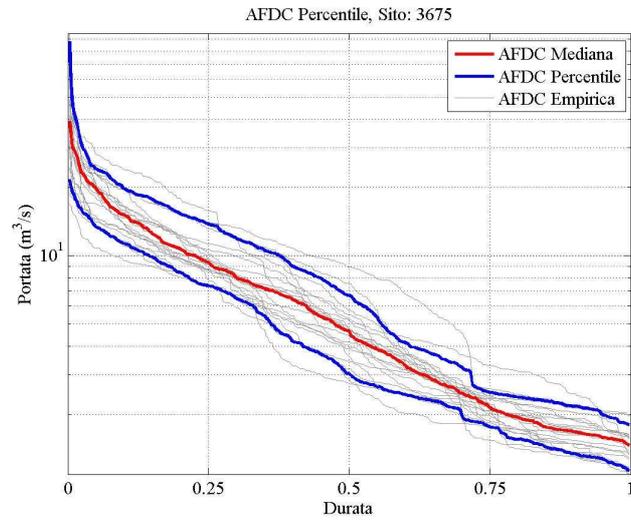




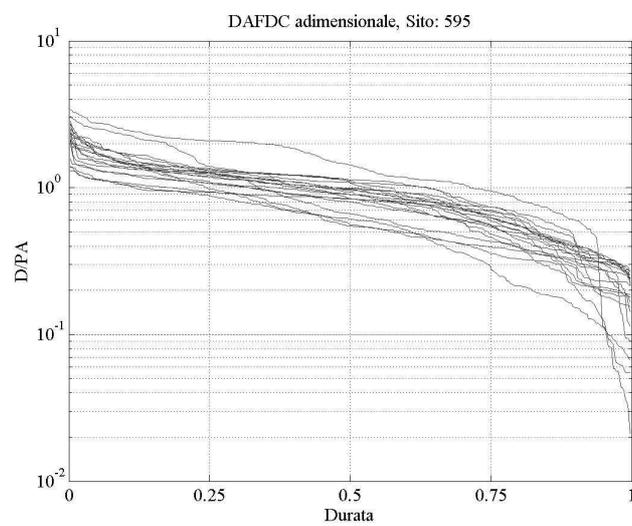
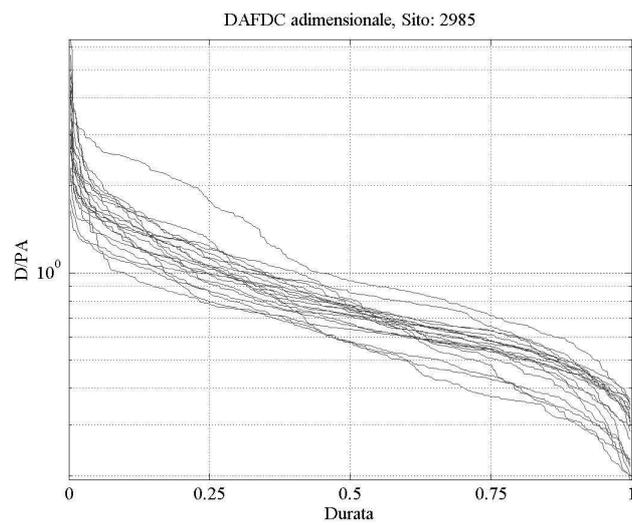
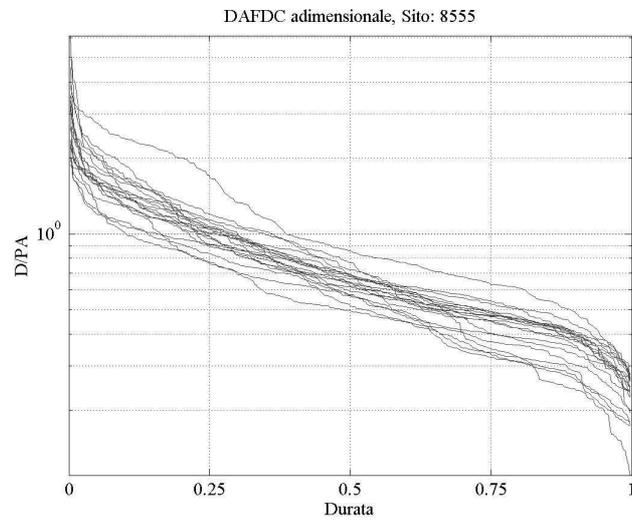




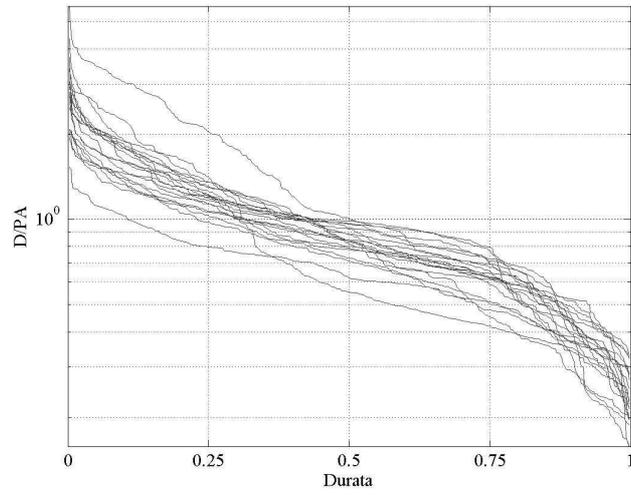




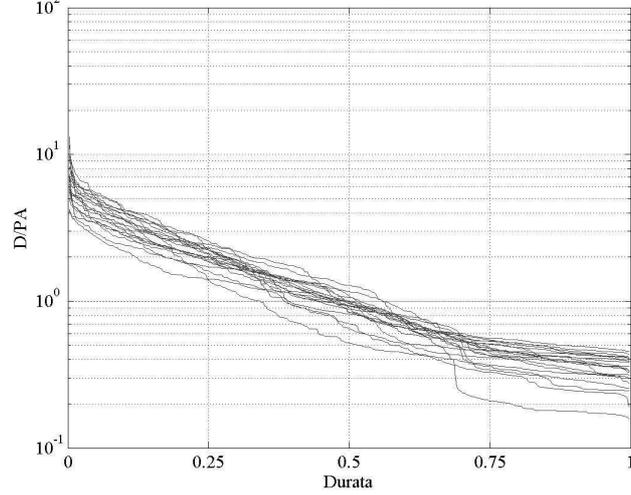
Curve di Durata dei deflussi adimensionali (*DAFDC*) costruite per ogni bacino e per ogni anno di osservazione



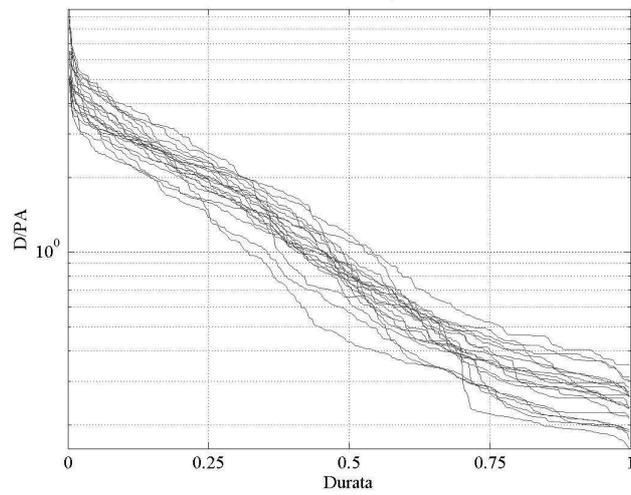
DAFDC adimensionale, Sito: 1985

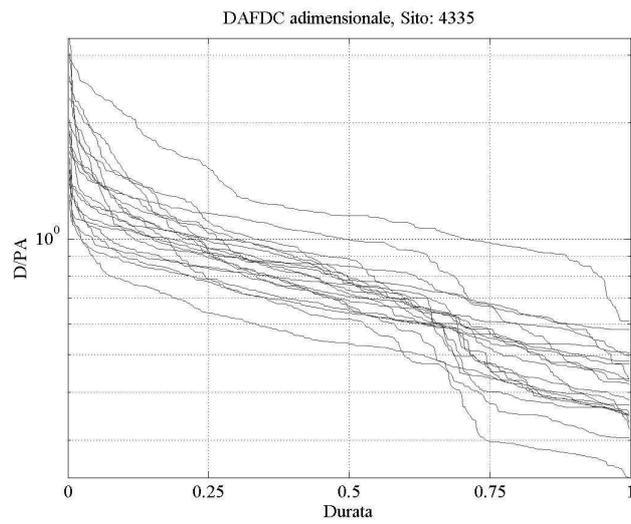
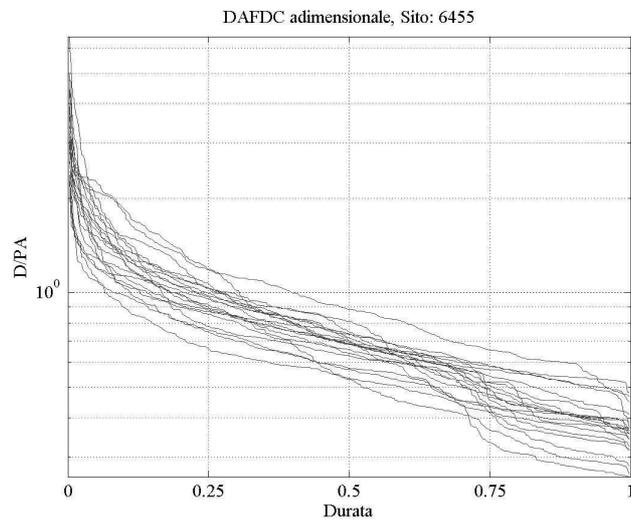
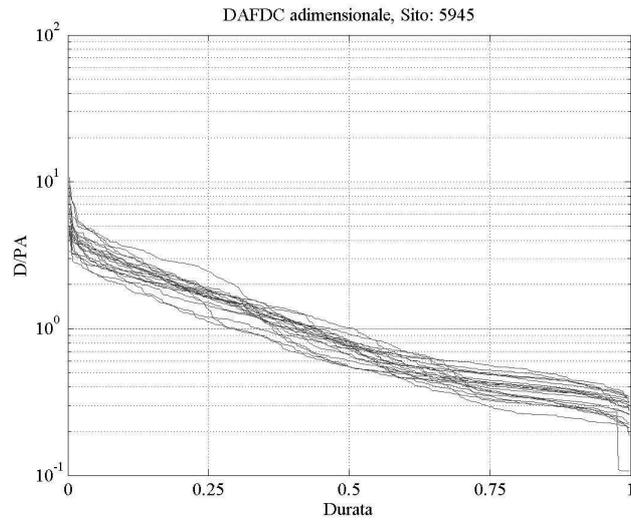


DAFDC adimensionale, Sito: 5145

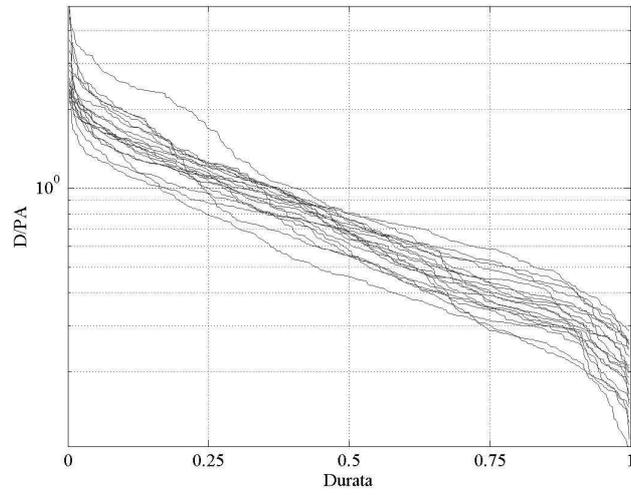


DAFDC adimensionale, Sito: 5715

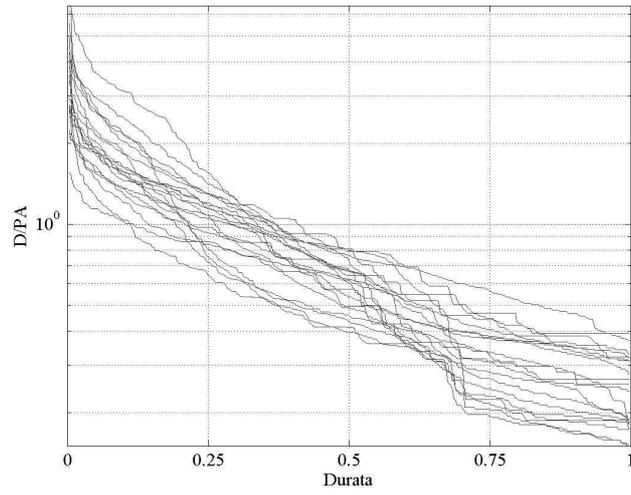




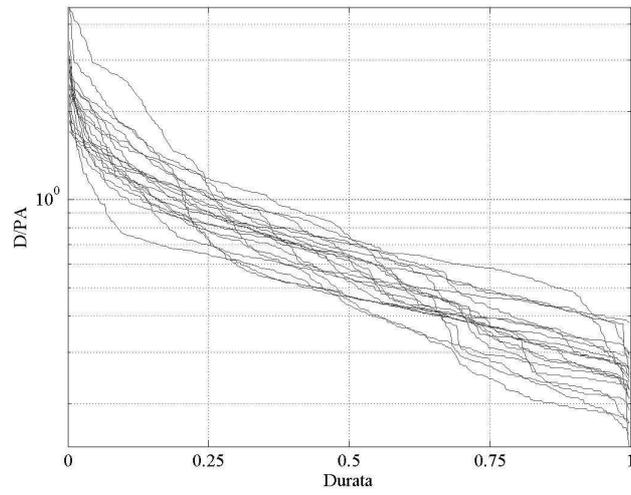
DAFDC adimensionale, Sito: 6735

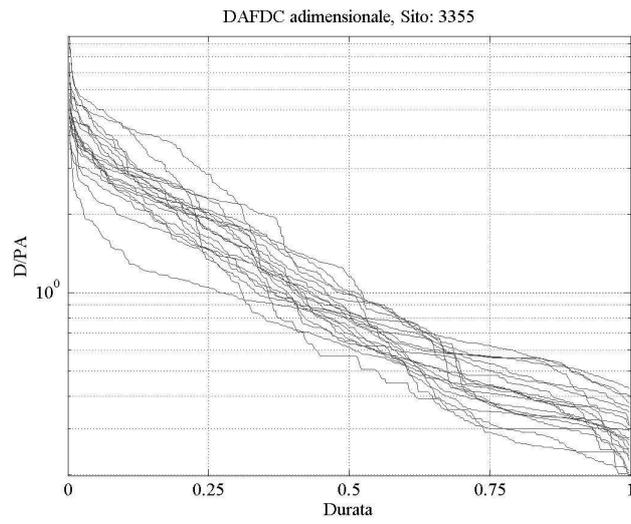
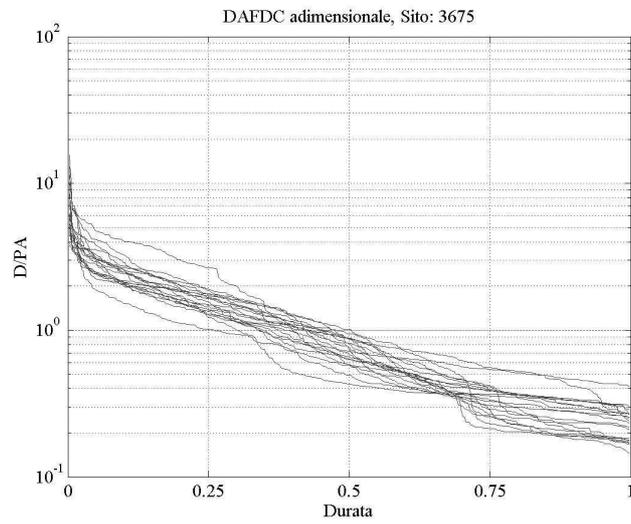
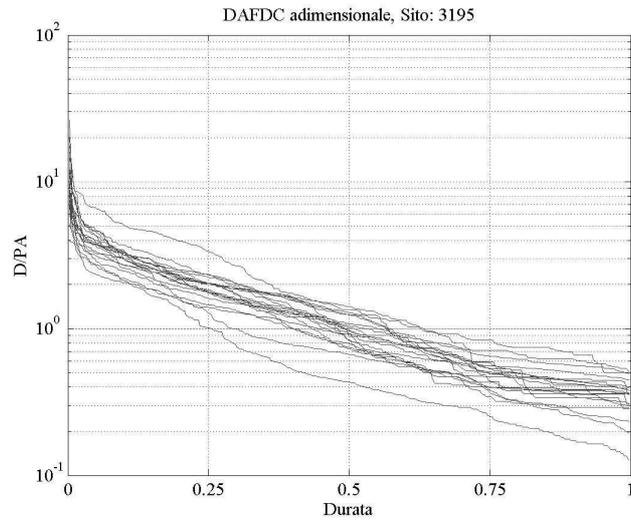


DAFDC adimensionale, Sito: 4875

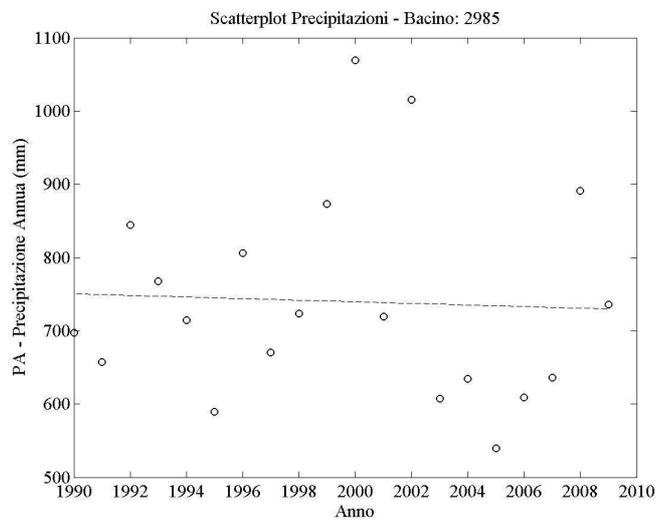
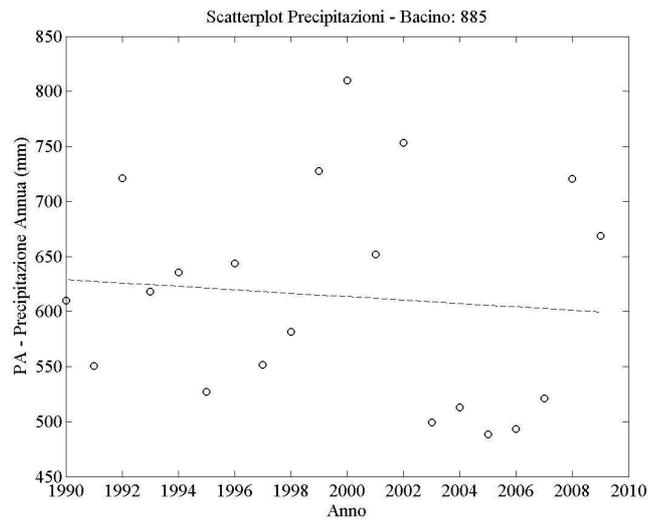
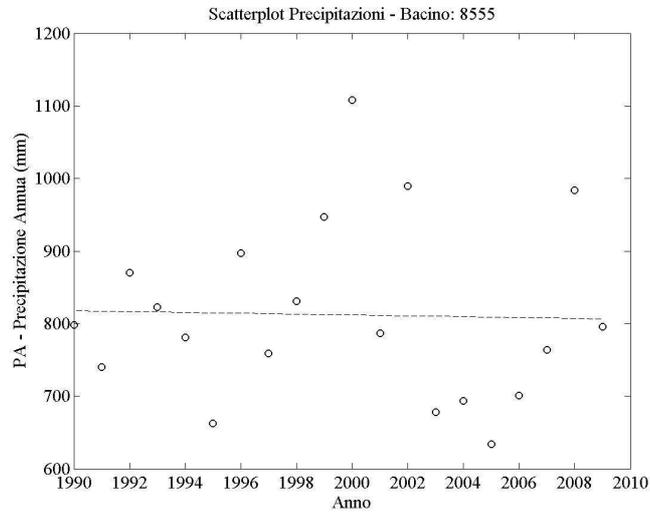


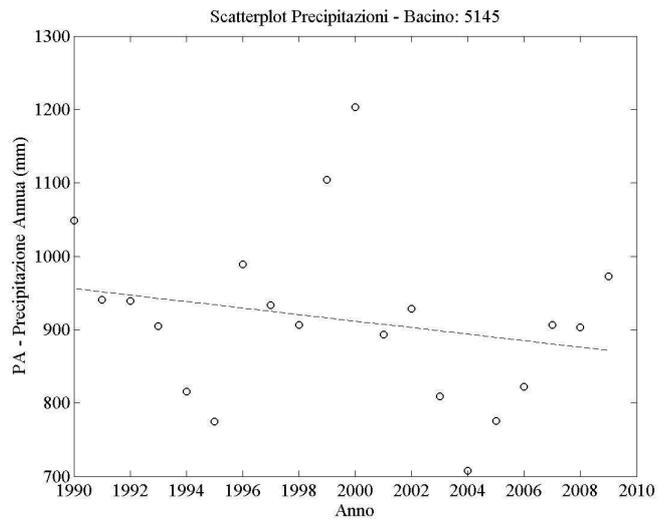
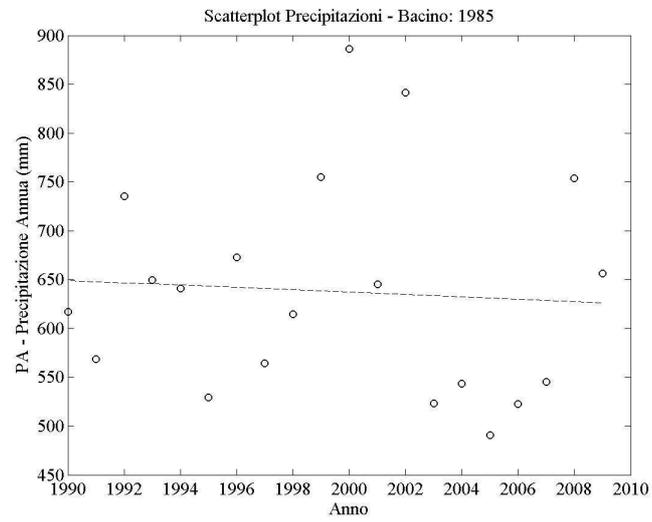
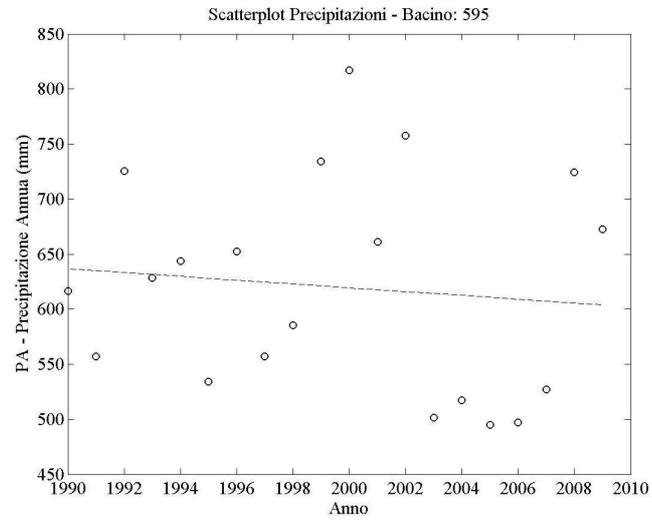
DAFDC adimensionale, Sito: 4575

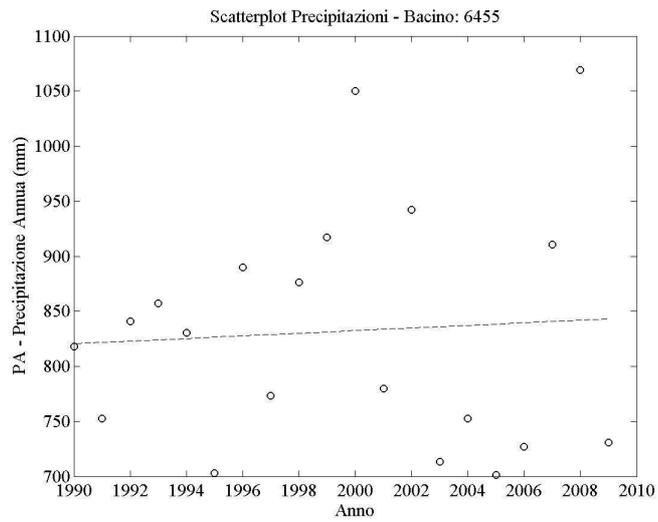
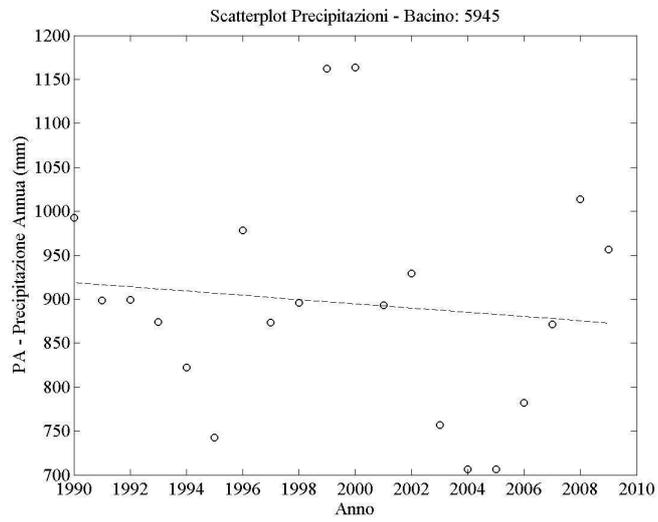
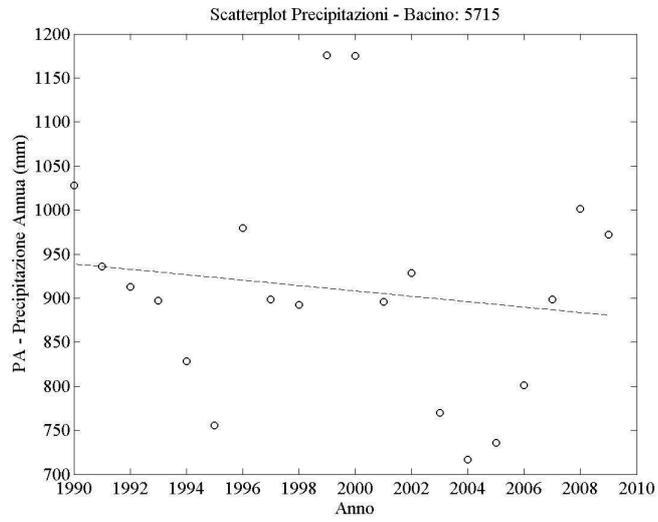


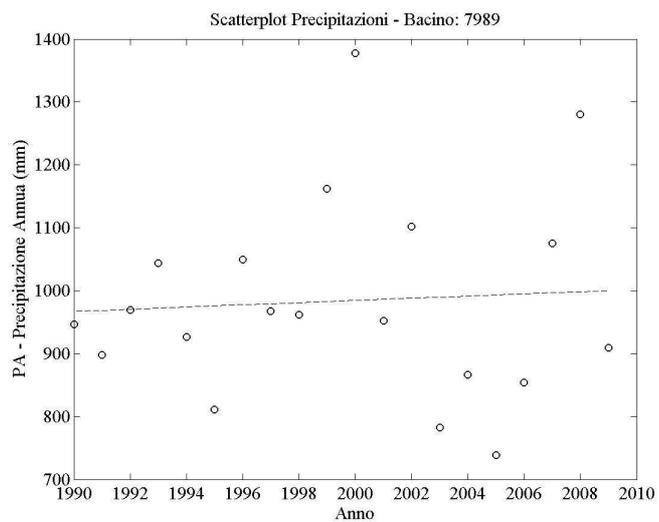
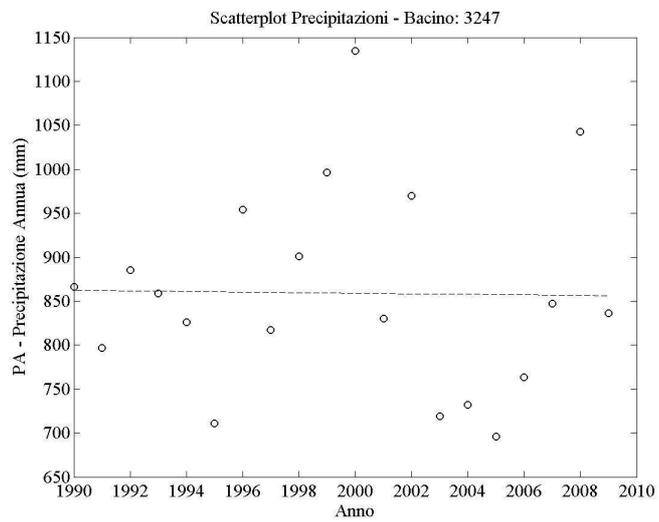
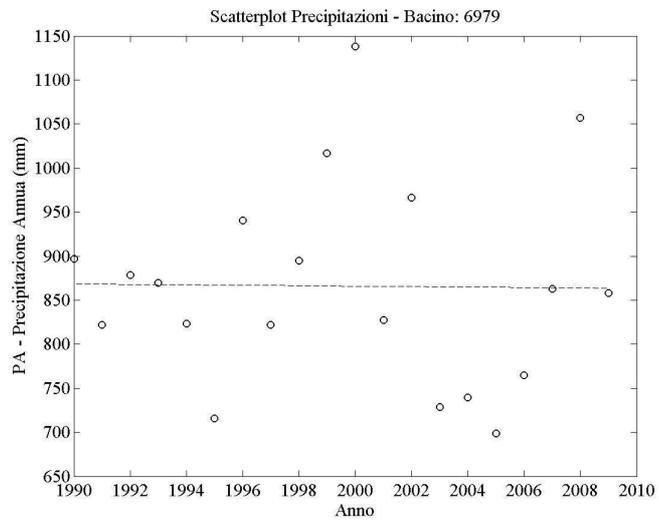


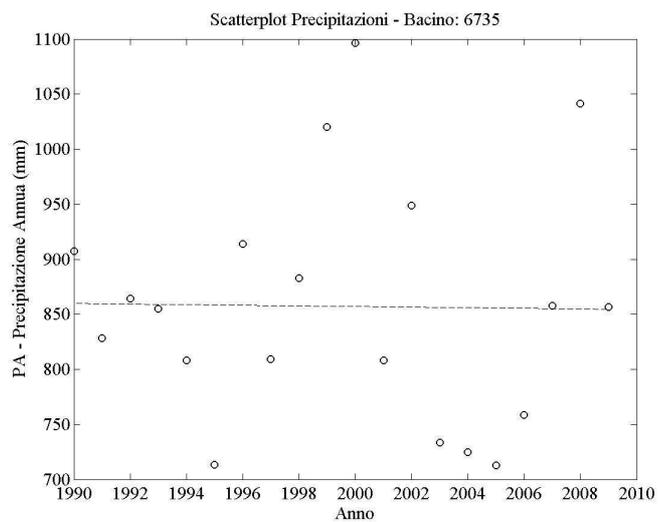
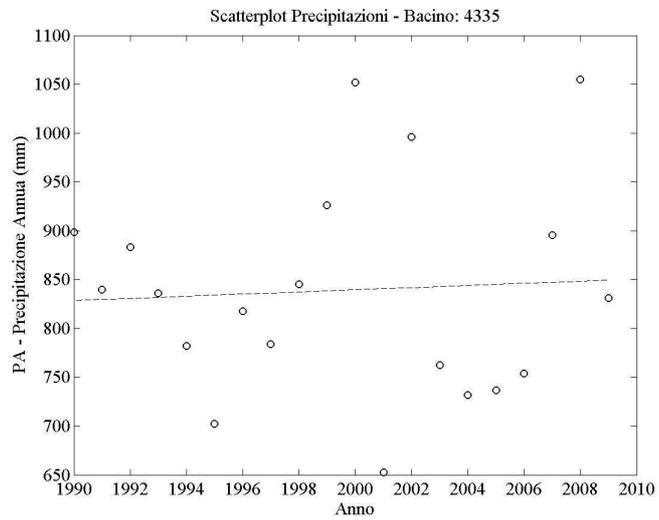
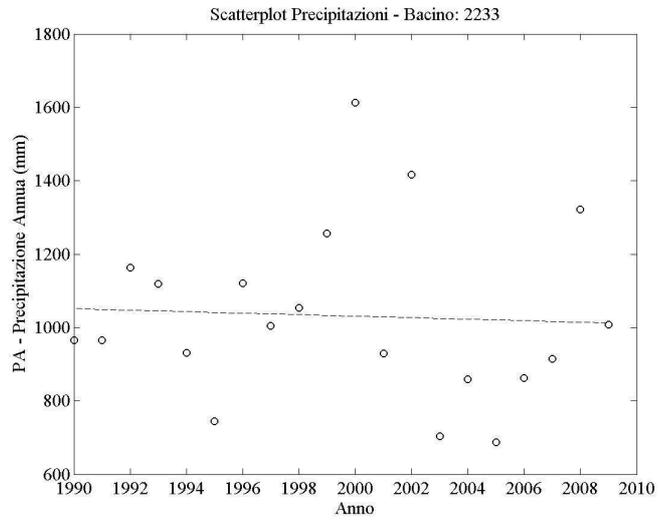
Rette di regressione relativa alle precipitazioni annuali costruita per ogni bacino necessarie alla determinazione della pendenza di Sen

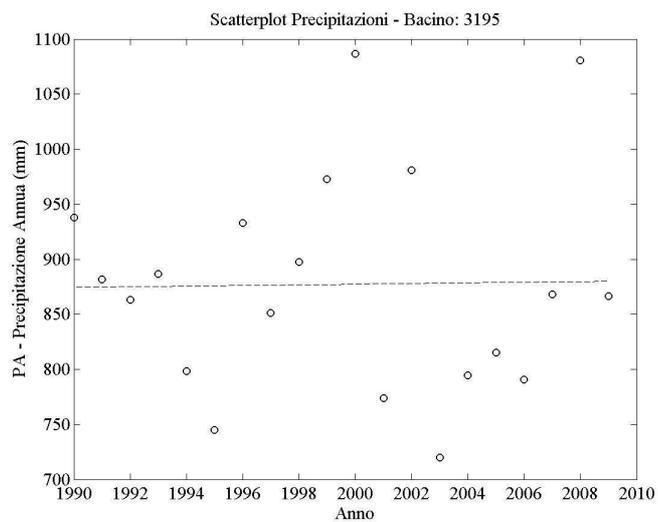
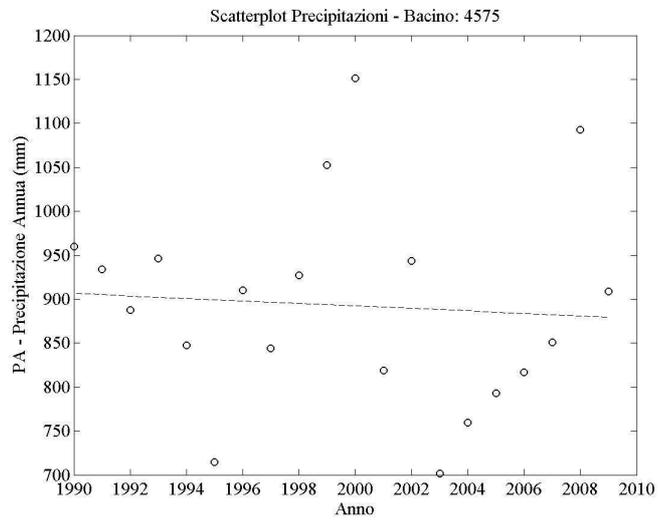
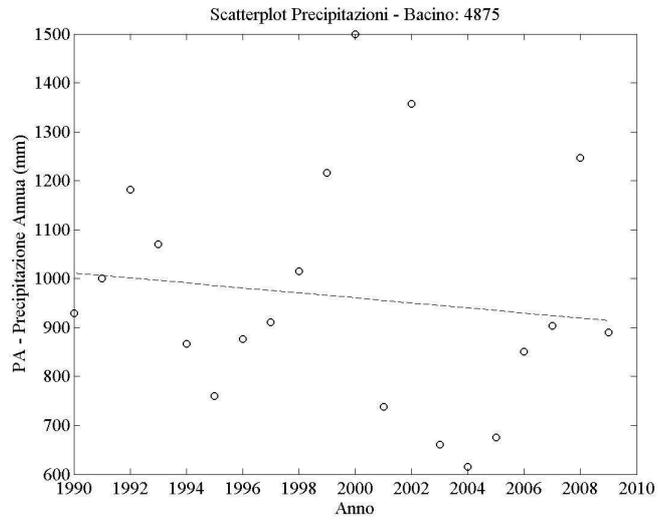


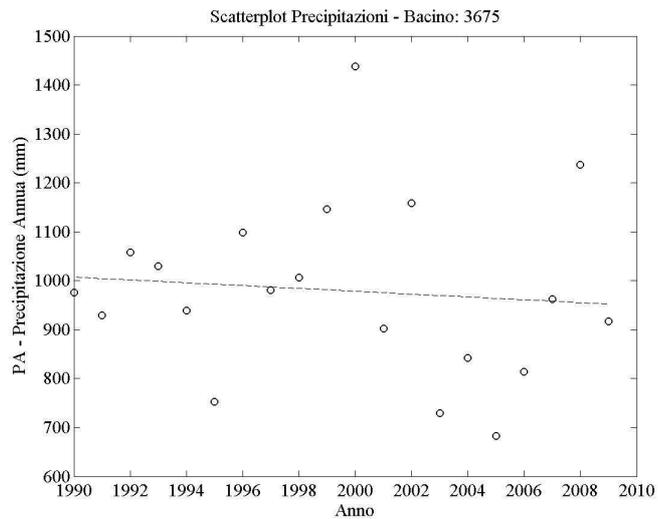
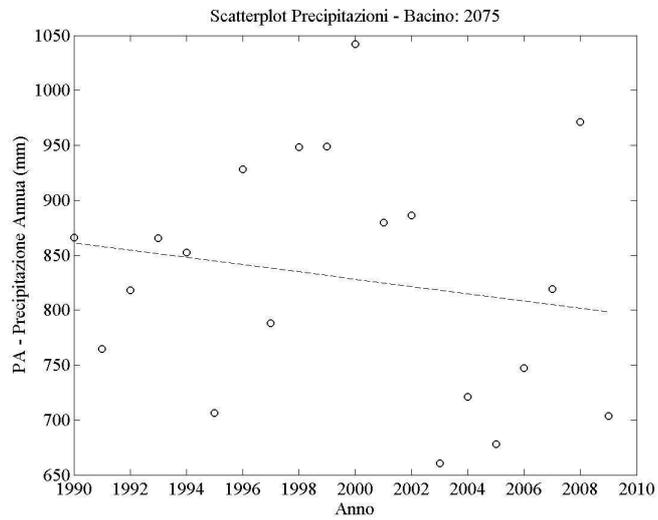
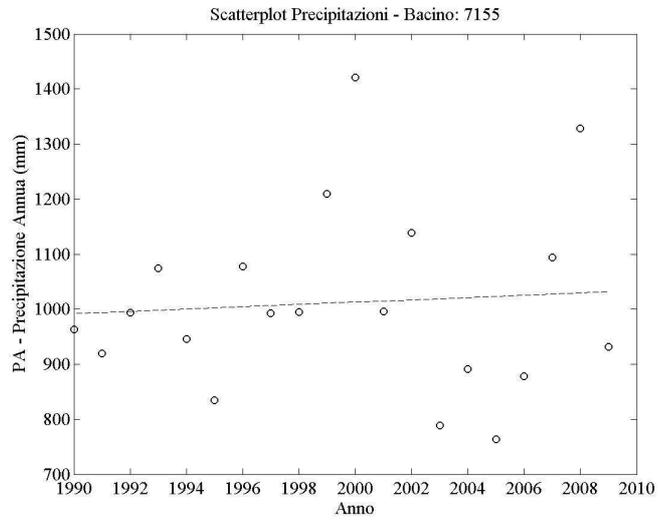


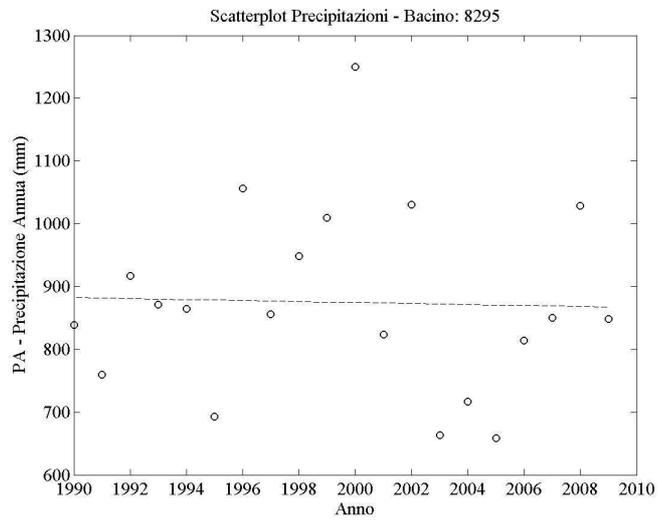
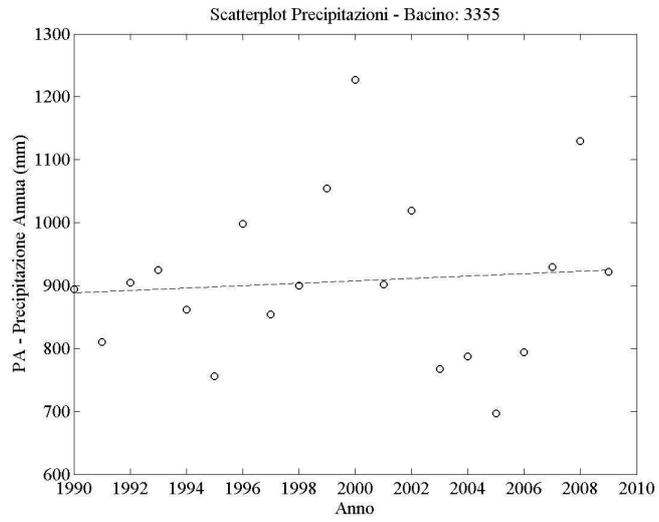




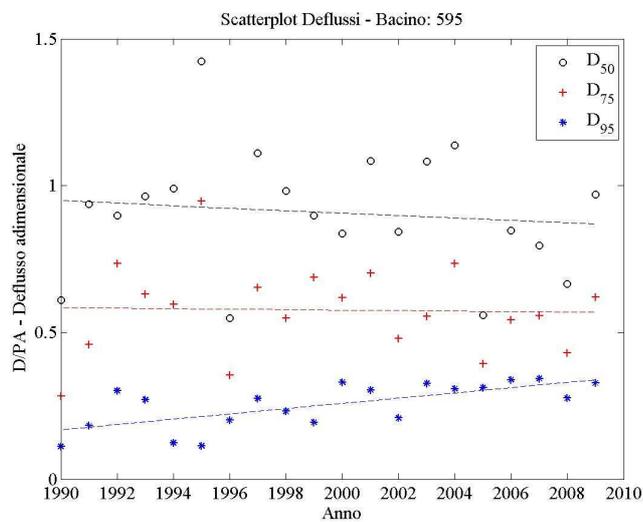
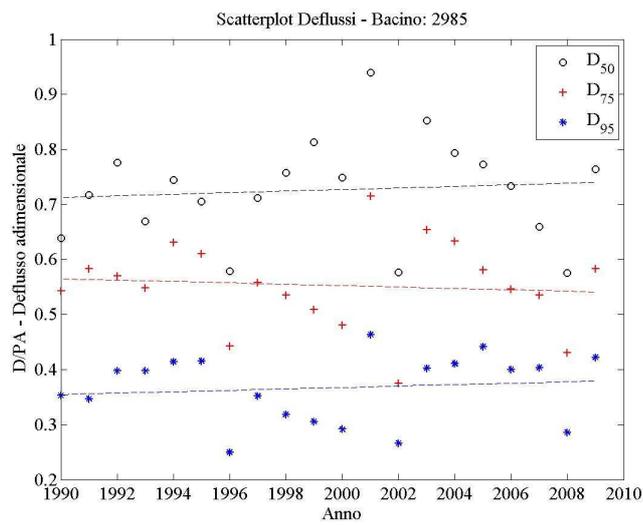
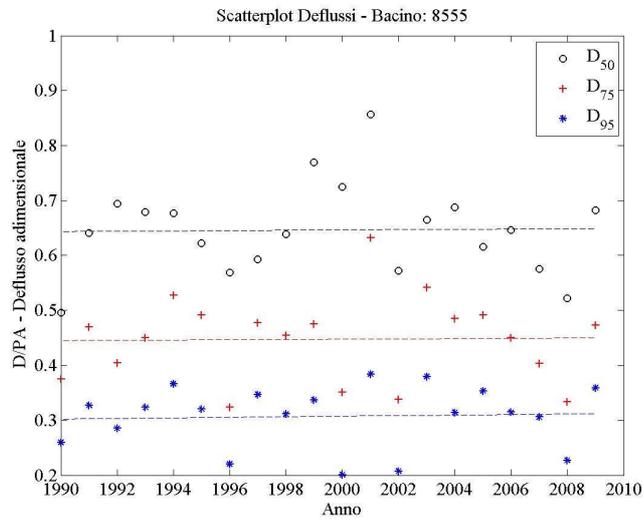


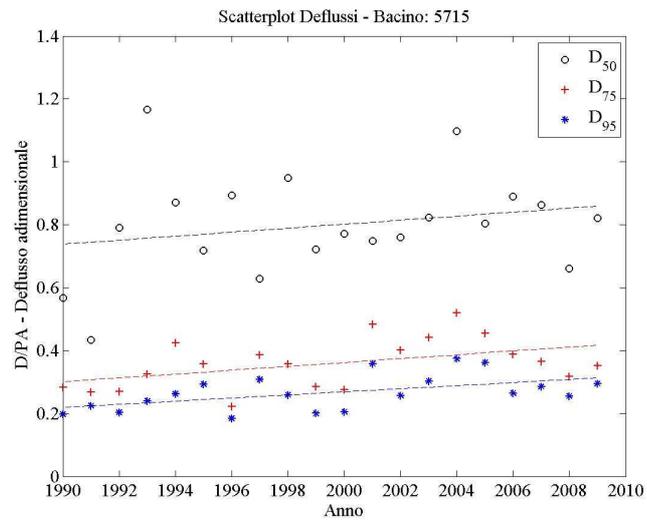
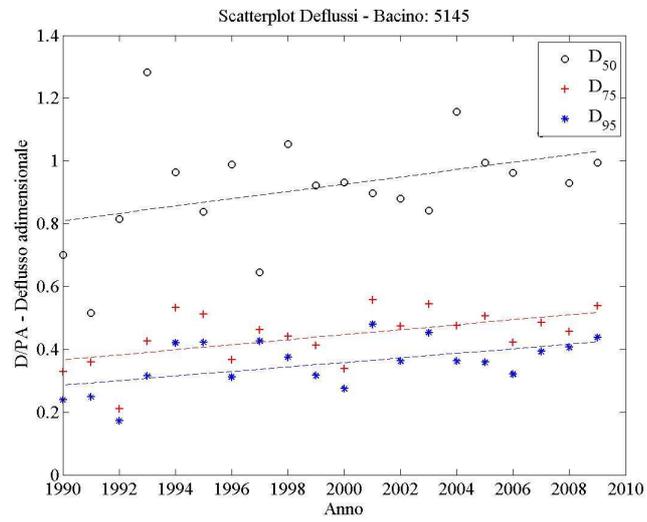
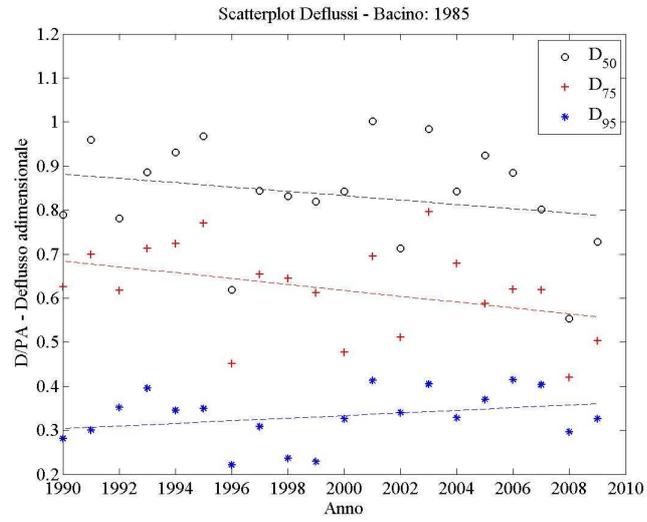


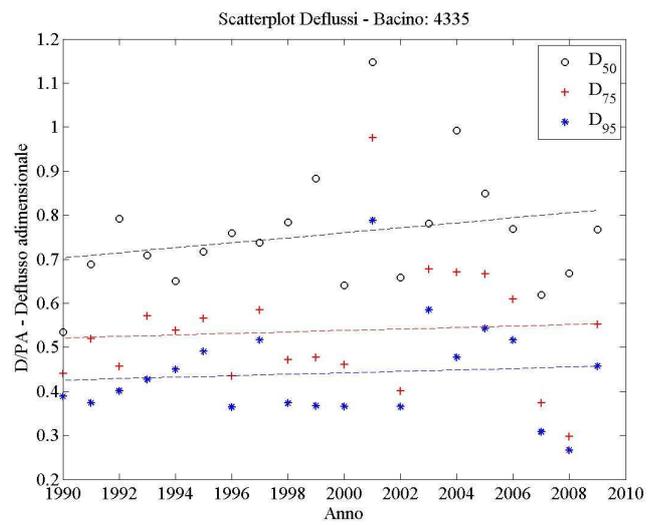
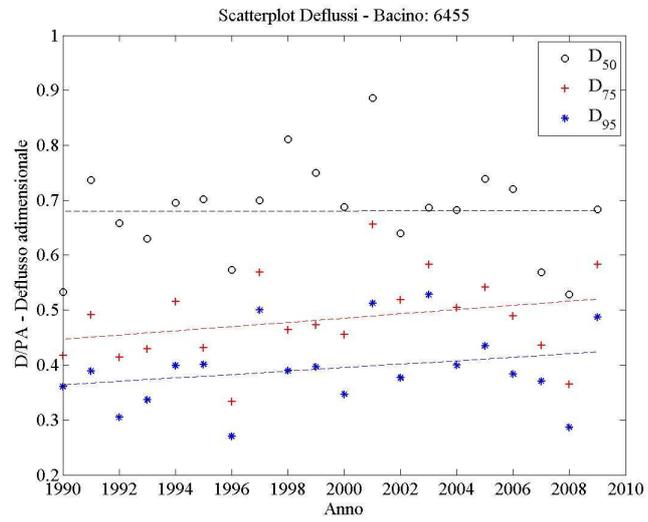
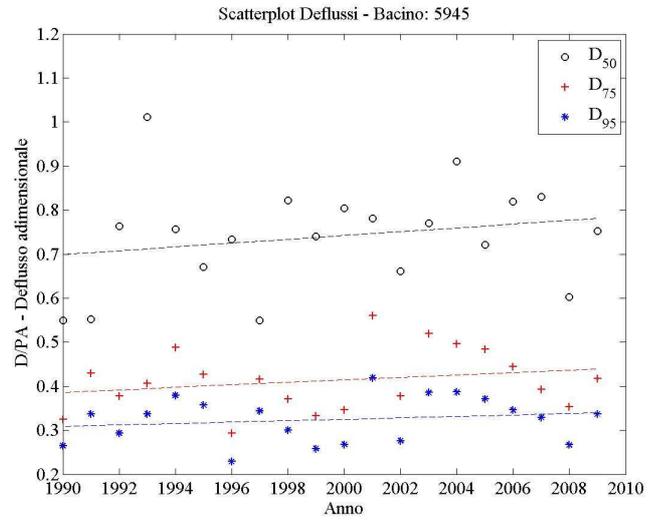


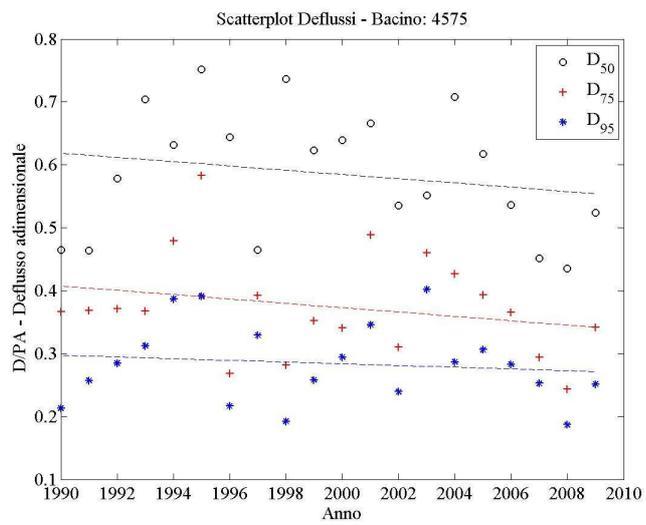
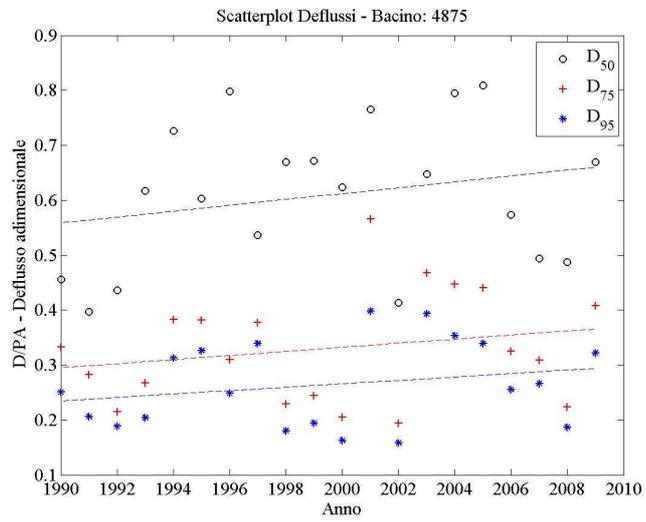
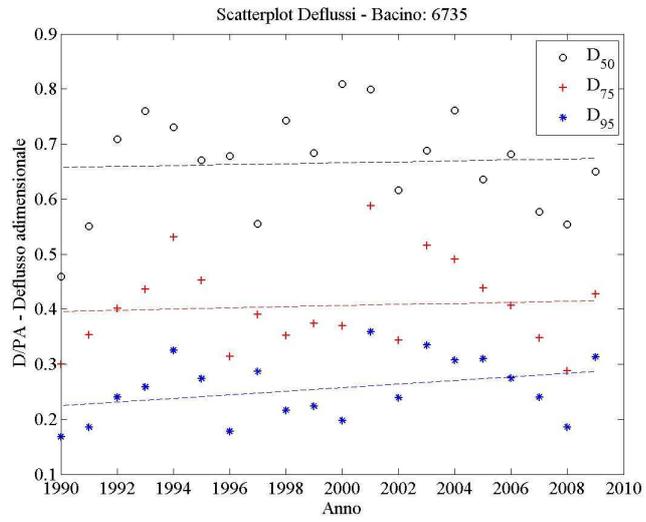


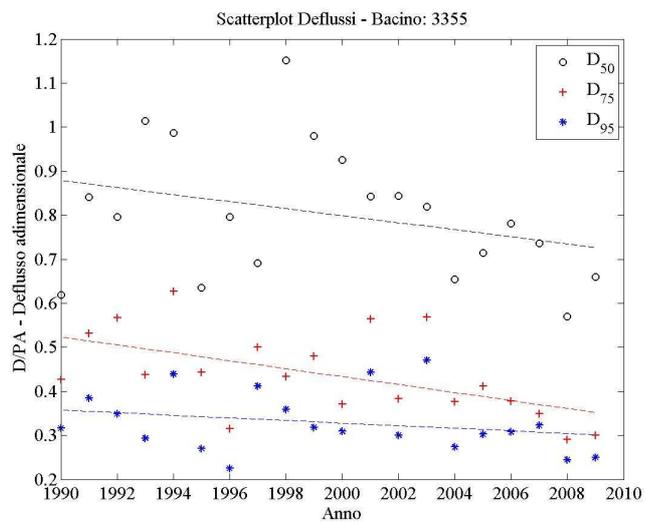
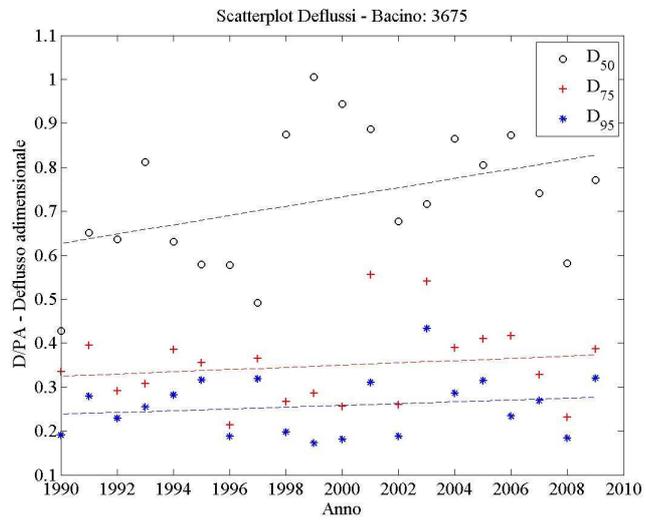
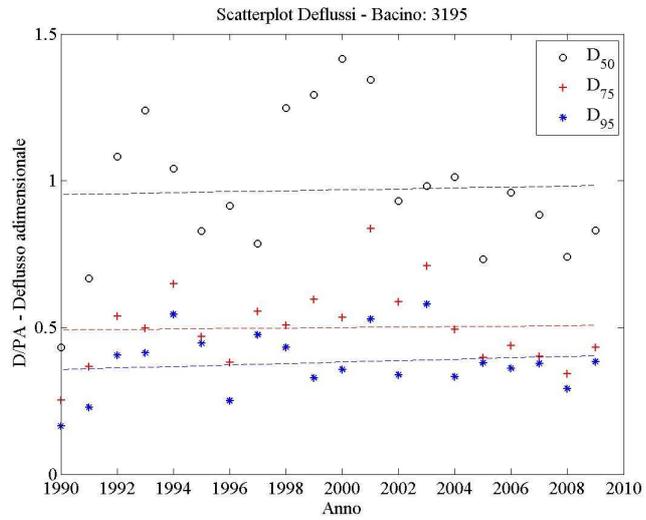
Rette di regressione relative ai bacini con almeno 19 anni di osservazione relative ai deflussi costruite per determinare la pendenza di Sen











BIBLIOGRAFIA

Brown, A.E., L. Zhang, T.A., McMahon, A.W. Western, R.A. Vertessy (2005). *A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation*, Journal of Hydrology, 310, 1-4, 1, 28-61.

Castellarin, A., G. Galeati, L. Brandimarte, A. Montanari, A. Brath (2004). *Regional flow-duration curves: reliability for ungauged basins*. Advances in Water Resources, Volume 27, Issue 10.

LeBoutillier, D.V., P.R. Waylen (1993). *A stochastic model of Flow Duration Curves*, Water Resources Research, 29(10), 3535-3541.

Sen, P.K. (1968). *Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau*. Journal of the American Statistical Association, 63, 1379-1389.

Viglione A., Claps P., Laio F. (2006). *Utilizzo di criteri di prossimità nell'analisi regionale del deflusso annuo*. Atti del XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche – IDRA 2006.

Vogel, R.M., N.M. Fennessey (1994). *Flow duration curves I: New interpretation and confidence intervals*. J. Wat. Resour. Plann. and Manage., 120(4), 485-504.

Vogel, R.M., N.M. Fennessey (1995). *Flow duration curves II: A review of applications in water resources planning*. Water Resour. Bulletin, 31(6), 1029-1039.

FONTI MULTIMEDIALI

<http://www.bacino-adige.it>

<http://www.provincia.bz.it/meteo/hydroreport.asp>

<http://www.provincia.bz.it/agenzia-ambiente/acqua/piano-stralcio-tutela.asp>