

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

DICAM

*INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO LM*

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

in

Modellistica Idrologica M

**Stima della variabilità intra-annuale del regime dei deflussi idrici  
superficiali in bacini non strumentati**

CANDIDATO  
Antonio Liguori

RELATORE:  
Chiar.mo Prof. Attilio Castellarin

CORRELATORI:  
Alessio Pugliese  
Stacey A. Archfield  
William H. Farmer

Anno Accademico 2013/14

Sessione II



*A nonna Anna e nonno Antonio  
che da lassù mi proteggono*



# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	9
<b>CAPITOLO 1: CURVE DI DURATA</b> .....	13
1.1 Definizione di curva di durata .....	13
1.2 Interpretazione delle curve di durata delle portate: curve di lungo periodo (POR-FDC) e curve annuali (AFDC) .....	16
1.3 Curve di durata associate ai percentili .....	22
1.4 Applicazioni ingegneristiche delle curve di durata annuali.....	24
1.5 Curve di durata di lungo periodo su base stagionale .....	28
<b>CAPITOLO 2: STIMA DELLE CURVE DI DURATA IN BACINI NON STRUMENTATI</b> .....	31
2.1 Influenza del clima e delle caratteristiche del bacino sulla curva di durata .....	31
2.2 Individuazione di bacini idrologicamente simili .....	35
2.3 Raggruppamento di bacini.....	38
2.4 Modelli regionali fisicamente basati.....	39
2.5 Modelli regionali statistici .....	40
2.6 Metodi geostatistici .....	42
2.7 Top-Kriging .....	43
2.8 Top-Kriging applicato al Total Negative Deviation (metodo TNDTK).....	46
2.8.1 Total Negative Deviation (TND).....	46
2.8.2 Il MAF e Il MAP* per la standardizzazione delle curve empiriche .....	48
2.8.3 Stima delle curve di durata con il TNDTK.....	49
<b>CAPITOLO 3: AREA DI STUDIO</b> .....	51
3.1 Inquadramento geomorfologico .....	51

3.2 Dati climatici.....	53
<b>CAPITOLO 4: METODO TNDTK PER LA STIMA DELLE CURVE DI DURATA PERCENTILI ANNUALI E STAGIONALI.....</b>	<b>55</b>
4.1 Struttura dell'indagine .....	55
4.2 Analisi preliminari .....	55
4.3 Calcolo dei TND a base annuale e stagionale.....	56
4.3.1 Standardizzazione per MAF.....	57
4.3.2 Standardizzazione per MAP* .....	63
4.4 Leave-One-Out-Cross-Validation (LOOCV) .....	64
4.5 Efficienza di Nash & Sutcliffe .....	65
4.6 Interpolazione geostatistica dei TND e delle curve annuali e stagionali .....	66
<b>CAPITOLO 5: PRESENTAZIONE DEI RISULTATI.....</b>	<b>71</b>
5.1 Stima dei TND annuali e stagionali in cross-validazione.....	74
5.1.1 Standardizzazione con MAF.....	74
5.1.2 Standardizzazione con MAP* .....	76
5.2 Stima del MAF in cross-validazione.....	80
5.3 Stima delle curve percentili annuali.....	81
5.3.1 Standardizzazione per MAF.....	82
5.3.2 Standardizzazione per MAP* .....	89
5.3.3 Curve dimensionali ricavate dal MAF stimato .....	96
5.3.4 Curve dimensionali ricavate dal MAP* .....	102
5.4 Stima delle curve stagionali .....	109
5.4.1 Standardizzazione per MAF.....	109
5.4.2 Standardizzazione per MAP* .....	113
5.4.3 Curve dimensionali ricavate dal MAF stimato .....	118
5.4.4 Curve dimensionali ricavate dal MAP* .....	122
5.5 Esempi di ricostruzione di curve dimensionali con il modello TNDTK .....	126
5.6 Sintesi dei risultati ottenuti .....	132

<b>CAPITOLO 6: DISCUSSIONE DEI RISULTATI .....</b>	<b>135</b>
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>141</b>
<b>APPENDICE A - DATASET COMPLETO .....</b>	<b>143</b>
<b>APPENDICE B - STRUTTURA DEL DATABASE DEI DEFLUSSI .....</b>	<b>147</b>
<b>APPENDICE C - CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI .....</b>	<b>149</b>
<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....</b>	<b>153</b>





## ***INTRODUZIONE***

Nella gestione delle risorse idriche e, più in generale nei problemi di ingegneria idraulica che necessitano di informazioni relative al regime dei deflussi superficiali, le curve di durata (o curva di durata delle portate, in inglese *Flow Duration Curves* FDC) rivestono un ruolo fondamentale. Esse sono strumenti grafici che illustrano la relazione esistente tra intensità e frequenza dei deflussi idrici in un'assegnata sezione fluviale. In altri termini, permettono di individuare la percentuale di tempo, in un particolare periodo di osservazione, in cui un valore di portata è uguagliato o superato e, dunque, risulta essere disponibile per il corso d'acqua in esame. L'elevata semplicità di costruzione delle curve empiriche e la loro natura grafica permette il loro utilizzo nell'affrontare graficamente molteplici problemi idrologico-idraulici e di gestione delle risorse idriche, come ad esempio: costruzione di carte d'inondazione, la valutazione del deflusso minimo necessario alla sopravvivenza dell'ecosistema acquatico (DMV), analisi di qualità delle acque, ecc.

Per quanto riguarda la costruzione delle curve di durata empiriche per sezioni strumentate, l'approccio tradizionale prevede l'utilizzo, in un unico campione di osservazioni, di tutti i dati di portata disponibili. La curva che viene costruita in questo caso viene detta curva di durata di lungo periodo o totale, o in inglese *Period of Record Flow Duration Curve* (POR-FDC). Nonostante la lunga tradizione in ambito idrologico, l'utilizzo delle curve di durata totali è spesso criticato per il fatto che il loro andamento dipende fortemente dal periodo di osservazione sul quale sono basate; inoltre non sono in grado di cogliere la stagionalità del regime fluviale e sono molto sensibili alle situazioni estreme (periodi umidi o secchi) verificatesi nel corso dell'intervallo temporale in analisi. Per tal motivo Fennessey e Vogel (1994) hanno proposto una differente interpretazione della curva di durata basata non più sull'intero campione di dati di portata disponibili, ma suddiviso per anni di osservazione: in questo modo si ottiene una curva di durata annuale nota come *Annual Flow Duration Curve* (AFDC). Tale interpretazione della curva di durata ha il vantaggio fondamentale di permettere l'introduzione del concetto di percentile, ovvero di probabilità di non superamento associata alle portate fluviali; è possibile infatti ricostruire, a partire dall'intero periodo di osservazione, curve annuali che si riferiscono ad anni tipici (con probabilità di non superamento del 50%)

particolarmente secchi (con basse probabilità di non superamento) e particolarmente umidi (con alte probabilità di non superamento) le quali non saranno influenzate da eventi estremi eventualmente verificatisi in pochissime circostanze nel periodo in esame.

Una diversa interpretazione delle curve di durata totale, non ancora molto diffusa in letteratura, prevede la loro costruzione su base stagionale, ovvero raccogliendo, in un unico campione, le sole osservazioni dei deflussi relativi ad una particolare stagione, prelevati dagli anni del periodo di osservazione. Tale interpretazione non è stata oggetto di particolari studi in letteratura, ma diventa interessante quando è importante tenere conto della variabilità stagionale delle portate; ad esempio la quantità d'acqua necessaria a garantire la sopravvivenza dell'ecosistema acquatico, in una zona soggetta a derivazioni idriche, sarà diversa durante il periodo dell'anno e strettamente legata alla variabilità stagionale.

La ricerca dei valori di portata, necessari per la costruzione dei vari tipi di curve di durata, è però ostacolata dalla mancanza di informazioni idrologiche legate ai deflussi su scala locale, circostanza che introduce il complesso problema legato alla stima delle curve di durata per bacini sprovvisti di osservazioni, argomento verso il quale la comunità scientifica ha riposto, negli ultimi anni, un'attenzione sempre maggiore. La regionalizzazione statistica delle portate è ad oggi tra le tecniche comunemente usate per la stima dei deflussi fluviali in siti per i quali non sono disponibili o reperibili dati. Secondo l'approccio tradizionale, alla base di tali tecniche vi è la ricerca di regioni omogenee, ovvero di raggruppamenti di bacini sulla base di criteri di vicinanza geografica o di similitudine idrologica. Recentemente, nell'ambito della regionalizzazione idrologica, si stanno affermando tecniche geostatistiche di interpolazione basate sul Kriging. Tale tecnica, nata in ambito minerario, permette la stima di una variabile regionalizzata in punti in cui essa non è nota a priori, a partire da un campione di dati distribuiti sul dominio di interpolazione.

L'obiettivo posto nella presente dissertazione è stato quello di valutare l'efficienza di un modello basato sul Topological kriging, ovvero una tecnica di kriging che utilizza un supporto non puntuale nello spazio geografico di riferimento sul quale è definita la variabile da stimare (Skøien, Merz e Blöschl 2006), nella ricostruzione delle curve di durata annuali, associate a tre diversi valori di probabilità di non superamento (50%, 10%, e 90%), e delle curve di durata stagionali relative a 182 bacini situati nella regione sud-orientale degli Stati Uniti. Di questi 182 bacini sono note tali curve di durata e, per valutare l'efficienza del metodo, sono state simulate condizioni non strumentate, ovvero condizioni di assenza di dati.

Il lavoro di tesi si articola come segue:

Nel *primo capitolo* viene illustrato il concetto di curva di durata, la sua interpretazione annuale con i percentili ad essa associata e l'interpretazione a base stagionale, oltreché alcune tra le più importanti applicazioni ingegneristiche in cui si fa ricorso a tali curve.

Nel *secondo capitolo* vengono presentati i fattori che influenzano la curva e come essi siano sfruttati nella regionalizzazione statistica delle portate oltreché, in modo approfondito, il Top-kriging e il modello, su di esso basato, utilizzato nel presente lavoro.

Nel *terzo capitolo* viene presentata l'area di studio sulla quale si sono concentrate le analisi.

Nel *quarto capitolo* si articola la struttura dell'indagine volta a stimare i due tipi di curva di durata sopra riportati.

Nel *quinto capitolo* sono riportati i risultati ottenuti in termini di efficienze del modello e di confronti grafici fra variabili osservate e stimate.

Nel *sesto capitolo*, infine, è presentata la discussione dei risultati ottenuti.

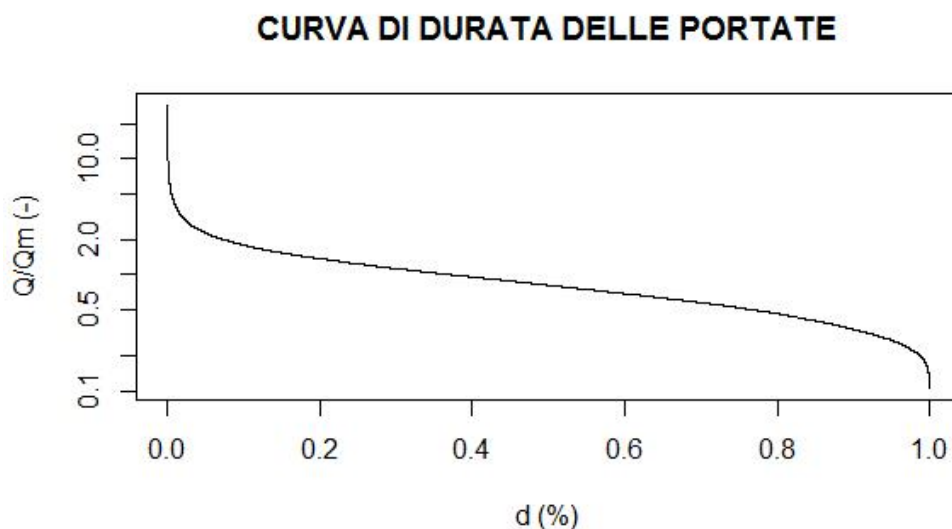


# CAPITOLO 1: CURVE DI DURATA

## 1.1 Definizione di curva di durata

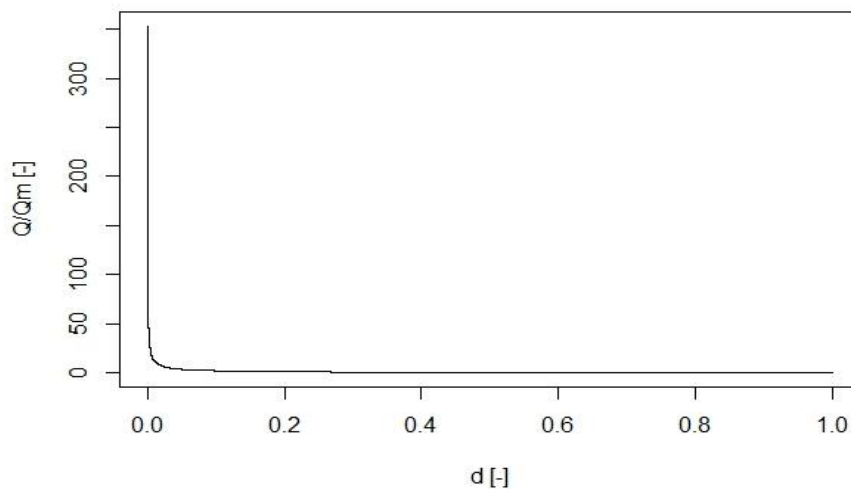
La curva di durata è uno strumento grafico che evidenzia la relazione tra frequenza ed entità di portate giornaliere, settimanali, mensili o altri intervalli temporali, per uno specifico corso d'acqua.

Essa fornisce una stima della percentuale di tempo in cui un determinato valore di portata è uguagliato o superato all'interno di un assegnato periodo storico. Le curve di durata, dunque, forniscono una visualizzazione grafica semplice e, allo stesso tempo esauriente, della variabilità storica associata alle portate che defluiscono in un corso d'acqua.



**Figura 1.1:** Esempio di curva di durata con portate standardizzate per il loro valore medio e riportate in scala logaritmica

La Figura 1.1 presenta le portate standardizzate per la media riportate in scala logaritmica. Tale rappresentazione è quella maggiormente utilizzata, in quanto la presenza di portate di elevata intensità rende difficile la visualizzazione dei valori bassi come mostrato dalla Figura 1.2.



**Figura 1.2:** Esempio di curva di durata con portate standardizzate per il loro valore medio e riportate in scala naturale

Dall'andamento della curva di durata è possibile ricavare informazioni sulla natura del corso d'acqua in esame; mantenendo inalterata la scala dell'asse delle ordinate, più la curva è traslata in alto e maggiori sono le portate e, quindi, maggiore è la grandezza del corso d'acqua e/o più umide sono le condizioni climatiche, essendo la portata direttamente collegata agli eventi meteorici. Se l'andamento della curva è tale intersecare l'asse delle ascisse (possibile solo in scala naturale e non in quella logaritmica), significa, invece, che sono presenti periodi di secca e, conseguentemente, tale curva sarà, molto probabilmente, rappresentativa di un bacino di dimensioni ridotte e/o di un clima arido.

Sebbene gli andamenti della curva di durata siano infiniti, l'analisi della Figura 1.1 ci permette di evidenziare due caratteristiche, consequenziali l'una con l'altra, comuni a tutte le curve:

- Andamento monotono decrescente
- Portate alte corrispondenti a percentuali di durata basse.

Tali considerazioni derivano dalla definizione di curva di durata; infatti valori alti di portata, per un'assegnata serie storica, sono eguagliati o superati molto più raramente di portate più basse appartenenti alla medesima serie storica.

È molto frequente rappresentare sull'asse delle ascisse una durata dimensionale riportante, ad esempio, i giorni (365 se la curva si riferisce ad un anno di osservazioni) in cui un determinato valore di portata è disponibile in quell'assegnato corso d'acqua. Tuttavia, per gli

scopi della modellistica, è molto utile considerare la durata percentuale e, sull'asse delle ordinate, la portata standardizzata per il valore medio della serie storica in esame; in tal modo è possibile mettere a confronto, in termini di curve di durata, corsi d'acqua molto diversi tra loro.

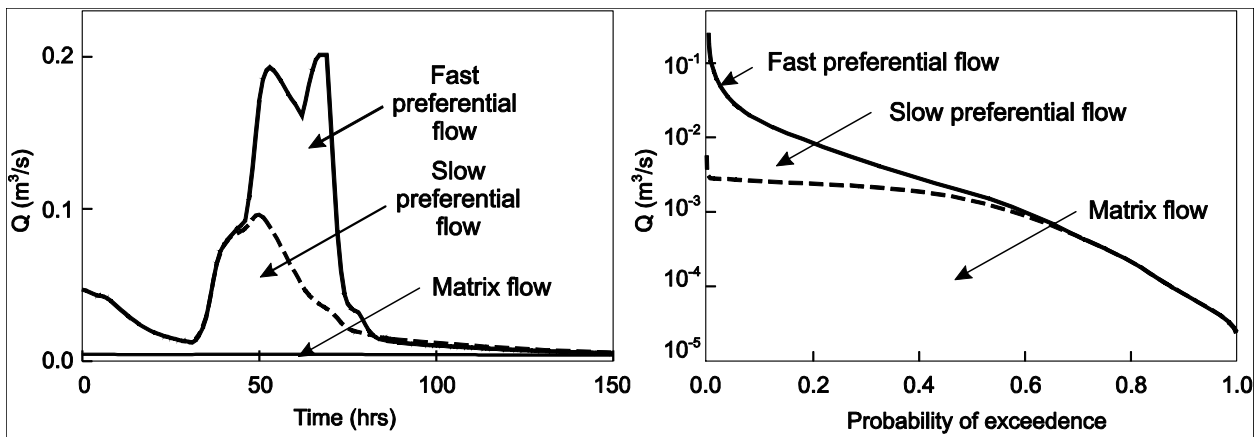
Dal punto di vista statistico, la curva di durata può essere vista come il complemento ad uno della funzione di distribuzione cumulata dei deflussi (c.d. funzione di probabilità di non superamento). Ad ogni valore di portata  $Q$  è associata una probabilità di superamento  $p$ , e una curva di durata è semplicemente la rappresentazione grafica di  $Q_p$ , ovvero la rappresentazione del  $p$ -esimo quantile o percentile dei deflussi in funzione della probabilità di superamento  $p$ , definita come:

$$p=1 - P\{Q \leq q\}$$

$$p=1 - F_Q(q)$$

dove  $F_Q(q)$  rappresenta la probabilità che il valore di portata  $q$  non venga superato.

Beckers e Alila (2004) hanno realizzato uno studio sulla base del quale hanno potuto affermare che la curva di durata può essere suddivisa in tre parti distinte, ognuna delle quali governata da differenti meccanismi o processi. La frazione di curva corrispondente ad elevati valori di portata (e, dunque, bassi valori di percentuale di durata) è governata dai fenomeni di piena regolati principalmente dall'interazione fra precipitazioni estreme e rapida risposta idrologica del bacino in esame. La parte centrale, rappresentante la portata media e la sua stagionalità, è regolata dall'interazione stagionale fra acqua disponibile, energia e stoccaggio, mentre la frazione di curva, associata ad elevate percentuali di durata e basse portate, rappresentante il deflusso di base e la diminuzione di acqua durante i periodi siccitosi, è regolata dal contrasto fra il drenaggio profondo e l'evaporazione nella zona ripariale. La Figura 1.3, tratta da Beckers e Alila (2004), illustra i concetti appena esposti.



**Figura 1.3:** *Suddivisione della curva di durata in tre parti distinte (pannello di destra). La parte alta è regolata fenomeni di piena, quella centrale dall'interazione stagionale fra acqua disponibile, energia e stoccaggio, quella più in basso rappresenta il deflusso di base. Nel pannello di sinistra è riportato l'idrogramma delle portate dal quale è costruita la curva. Tratta da Beckers e Alila (2004).*

## **1.2 Interpretazione delle curve di durata delle portate: Curve di lungo periodo (POR-FDC) e curve annuali (AFDC)**

Tradizionalmente, le curve di durata empiriche sono interpretate sulla base dell'intero periodo di osservazioni utilizzato per costruirle. Questa forma di rappresentazione prende il nome di POR-FDC (dove POR sta per *Period of Record* e FDC per *Flow Duration Curve*) e vengono ricavate a partire da un campione di dati che raccoglie tutte le osservazioni di portata disponibili.

L'andamento di tali curve (dette anche curve di durata totali) può variare fortemente in funzione dell'intervallo di osservazioni considerato, in quanto i dati di portata possono essere molto diversi passando da un periodo ad un altro. Ciò vale soprattutto per il ramo inferiore della curva (cfr. Figura 1.1) molto sensibile ai minimi valori idrologici registrati. In generale, si può affermare che tali curve sono estremamente influenzate dai valori estremi presenti nel periodo di osservazione in esame e, inoltre, non consentono di individuare le variazioni stagionali dei deflussi.

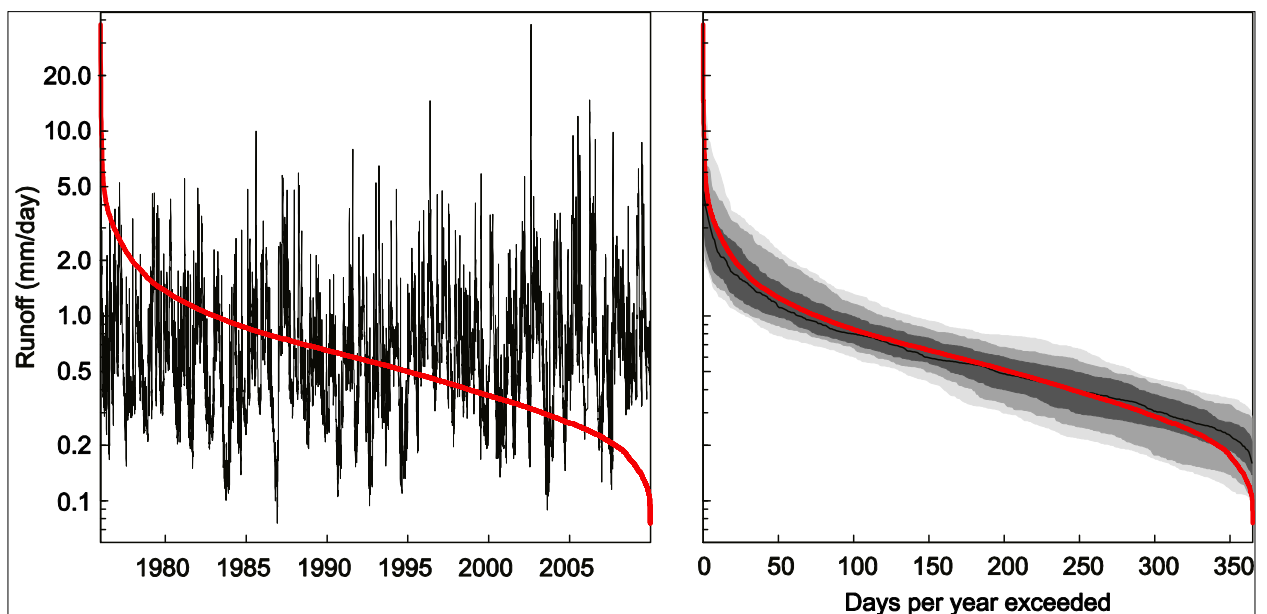
Per far fronte a questi problemi, legati all'interpretazione tradizionale delle curve di durata, Vogel, Fennessey (1994) e altri autori hanno proposto una differente interpretazione delle curve di durata arrivando a definire le AFDC (Annual Flow Duration Curve) anche note come curve di durata annuali.



Per giungere alla costruzione di tali AFDC, Vogel e Fennessey (1994) hanno considerato una sezione fluviale strumentata (dotata cioè di una stazione idrologica capace di misurare le portate che transitano per quella sezione) che dispone di  $n$  anni completi di osservazioni; questa nuova interpretazione consiste nel tracciare dapprima  $n$  curve di durata di tipo tradizionale, una per ogni anno di osservazione, 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. Ovviamente, a tale curva non corrispondono valori di portata effettivamente misurati, poiché la media non individua necessariamente valori sperimentali; questa curva, quindi, non rappresenta un andamento reale del bacino esaminato e per questo motivo si parla di anno ipotetico. Tuttavia, questa nuova interpretazione delle curve di durata, consente di ovviare ai difetti propri delle curve di lungo periodo (o totali) e risulta molto più vantaggiosa per diverse applicazioni idrologiche.

Utilizzando le curve di durata annuali si perdono alcune importanti informazioni come i valori massimi e minimi assoluti di portata; è però possibile 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.

Di seguito si riporta una figura che evidenzia le differenze, da un punto di vista grafico fra le due interpretazioni delle FDC (Castellarin et al. 2013):



**Figura 1.4:** Curva di durata totale e curve annuali: nel pannello di sinistra è riportata la curva di lungo periodo (in rosso) costruita a partire dalle informazioni di portata relative ad un periodo di oltre vent'anni (rappresentate in nero); nel pannello di sinistra si confronta la POR-AFDC (sempre in rosso) con le curve annuali in varie scale di grigio (Castellarin et al., 2013).

La costruzione delle AFDC segue i seguenti quattro step:

- definire il campione di dati di portata raccolti negli  $n$  anni di osservazione e suddividerlo in  $n$  campioni ciascuno contenente i valori di portata di un solo anno. Si avrà un campione costituito da 365 o  $24 \cdot 365$  dati rispettivamente per portate giornaliere o orarie;
- disporre i dati di ogni campione in ordine decrescente ( $i=1..365$  o  $365 \cdot 24$ ). Questo consente di individuare, in maniera immediata, il valore massimo e minimo di portata registrati in ogni anno rispettivamente alla posizione 1 e 365 (o  $365 \cdot 24$ ) di ciascun campione;
- calcolare la durata relativa associata ad ogni valore di portata di tutti i campioni mediante la *Plotting Position di Weibull* (Weibull, 1951). In questo caso, dal momento che tutti i campioni hanno lo stesso numero di elementi, la durata relativa all' $i$ -esimo dato di portata è la stessa per gli  $n$  campioni e vale:

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

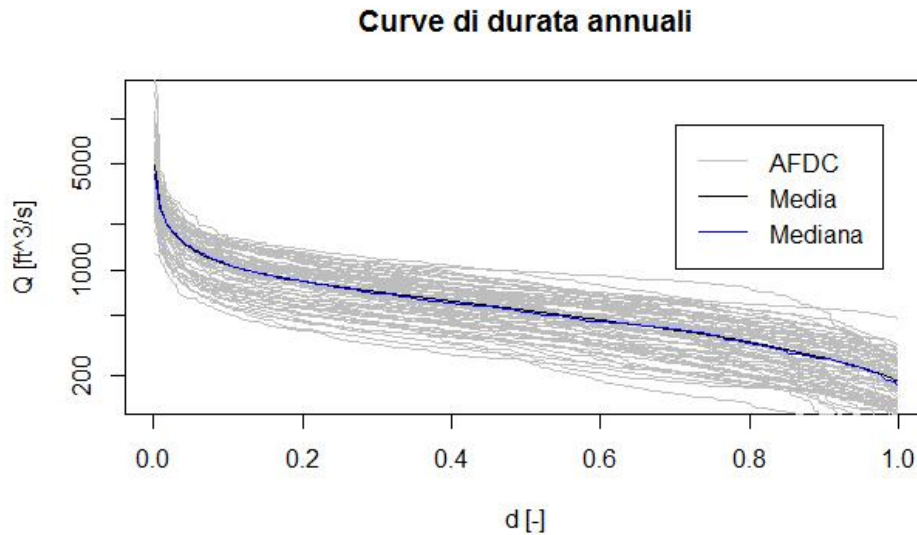
dove  $N = 365$  o  $365 \cdot 24$ .

- tracciare le  $n$  curve di durata, relative a ciascun anno, in un diagramma cartesiano riportando in ascissa la durata relativa e in ordinata le portate medie giornaliere o orarie per poi ricavare la curva di durata annuale facendo corrispondere, ad ogni passo di durata, un valore di portata mediato per gli  $n$  valori disponibili (uno per ogni anno).

E' possibile ostruire due curve di durata annuali: la curva di durata annuale media che si ottiene associando ad ogni valore di durata relativa o probabilità di superamento (cfr. Cap. 1.1) la media statistica degli  $n$  valori di portata corrispondenti a quella durata; la curva di durata annuale mediana che si ottiene, invece, associando ad ogni valore di durata relativa (o probabilità di superamento) il valore mediano, ovvero il valore con una probabilità di superamento del 50%, tra tutti gli  $n$  dati di portata corrispondenti sempre a quella durata.

Dall'analisi della Figura 1.5, di seguito riportata, si può vedere come le curve di durata annuali medie e mediane siano pressoché coincidenti: questo comportamento è caratteristico di quelle sezioni che dispongono di pochi dati di osservazione con deflussi annuali molto simili tra loro

o, come nel caso sopra rappresentato, di quelle sezioni che dispongono di molti anni di osservazione, ma che non presentano fenomeni di rilievo durante l'intero periodo di osservazione.



**Figura 1.5:** Curve di durata annuali media e mediana relativi al bacino del Chattooga River chiuso a Clayton, GA (USA). Sono riportati anche le curve di durata relative ai 71 anni di osservazione dal 1939 al 2009.

Nel caso riportato in Figura 1.5, gli anni di osservazione sono 71 (dal 01-ott-1939 al 30-sett-2009) e, fatta eccezione per gli anni idrologici 1939 e 2004, che hanno una portata massima che eccede i 10000  $\text{ft}^3/\text{s}$ , e l'anno 2001, che presenta una portata massima di soli 1270  $\text{ft}^3/\text{s}$  e diversi valori nulli di deflusso, gli altri 68 anni presentano una curva di durata annuale dall'andamento molto simile, caratterizzato da assenza di deflussi nulli e da una portata massima che oscilla intorno ai 5000  $\text{ft}^3/\text{s}$ .

Si possono poi verificare altre situazioni:

- la curva mediana può risultare inferiore alla curva media in modo più o meno accentuato: nel caso di stazioni con pochi anni di osservazione, ciò può derivare dalla presenza di un anno particolarmente umido che porta ad un innalzamento significativo delle medie statistiche dei dati di portata; nel caso invece siano disponibili molti anni di osservazione, questo andamento può essere dovuto al fatto che i valori di portata elevati influiscono maggiormente sulla media dei deflussi rispetto alle portate più basse;

- La curva mediana risulta inferiore alla curva media solo per valori di percentuale di durata maggiori di 0,6-0,7: questo andamento è caratteristico di quelle sezioni fluviali con bassi deflussi e periodi di magra nel corso dell'anno o quando molte delle  $n$  curve annuali presentano diversi valori di portata nulli o prossimi allo zero per durate elevate ( $d > 0,8$ ).
- la curva media può risultare inferiore alla curva mediana per buona parte o tutto il dominio delle percentuali di durata: ciò si verifica quando si osservano anni piuttosto secchi rispetto all'insieme dei restanti anni di osservazione.

Un'altra osservazione interessante che può essere fatta con riferimento alle due curve annuali introdotte nel 1994 da Vogel e Fennessey, che non è però riscontrabile dall'analisi della Figura 1.5, riguarda la maggiore regolarità della curva media rispetto alla mediana. Questa differenza è facilmente comprensibile se si pensa alle procedure effettuate per ottenere le due curve.

Ipotizzando di avere a disposizione  $n$  anni di osservazione per una specifica sezione fluviale, la curva media è ottenuta associando ad ogni percentuale di durata, calcolata con la Plotting Position di Weibull, la media statistica degli  $n$  valori di portata corrispondenti a quella frazione di durata; indicando con  $d_i$  la  $i$ -esima percentuale di durata, la portata media  $Q_i$  associata ad essa è ottenuta come:

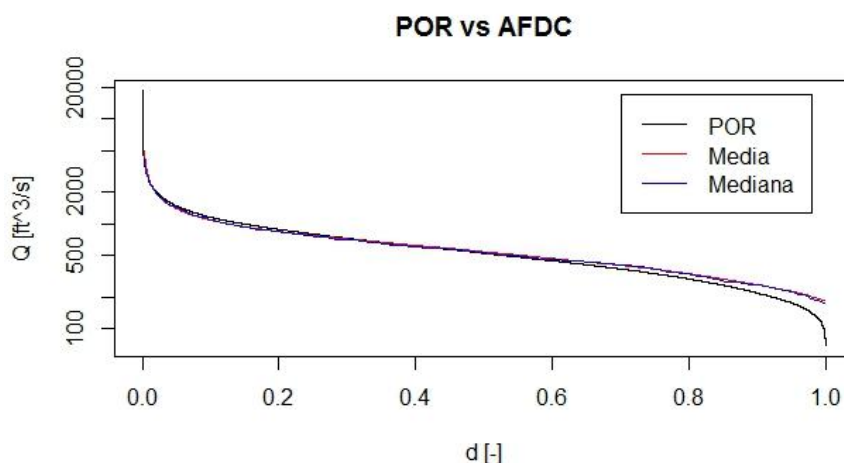
$$Q_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_{i,j}$$

dove  $q_{i,j}$  è la portata corrispondente alla frazione di 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 percentuali di durata attigue risultano piuttosto ridotte.

La curva mediana è invece ottenuta associando ad ogni percentuale di durata il valore mediano tra gli  $n$  valori di portata corrispondenti a quella frazione, 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 sempre a quella frazione di durata. Il valore mediano riferito alla durata relativa  $D_i$  rappresenta quindi quella portata che è stata superata il 50% delle volte; tale valore, rispetto a quello delle durate attigue ad esso, può anche essere molto differente; per questo motivo l'andamento della curva mediana risulta generalmente più irregolare rispetto a quello della curva media.

Si può effettuare un confronto tra le due diverse interpretazioni delle curve di durata (POR e AFDC) da un punto di vista grafico, riunendo in un'unica rappresentazione la curva totale

(calcolata sull'intero periodo di osservazione) e le corrispondenti curve di durata annuali, media e mediana, mettendo così in evidenza le caratteristiche di ogni curva rispetto alle altre. Un esempio, sempre relativo al Chattooga River, è riportato in Figura 1.6.



**Figura 1.6:** Confronto tra la curva di durata POR relativa all'intero periodo di osservazione (1939-2009) e le curve annuali media e mediana del Chattooga River chiuso a Clayton, GA (USA)

La Figura 1.6 mostra come sia la curva media che la curva mediana approssimino bene la curva totale nel tratto intermedio, ovvero per percentuali di durata compresi tra 0.2 e 0.6, mentre nei rami inferiore e superiore dove le due rappresentazioni tendono a divergere. Per percentuali di durate elevate (in questo caso  $d > 0.6$ ) o ridotte (in questo caso  $d < 0.2$ ) la curva totale è quasi sempre, rispettivamente, inferiore o superiore alle altre due curve, proprio perché, come già spiegato in precedenza, essa è molto sensibile ai deflussi estremi di magra o di piena. Essendo le curve totali ottenute a partire da un campione di dati ordinato in maniera decrescente e che raccoglie tutte le osservazioni di portata disponibili, alle alte durate si possono avere valori di portata nulli o comunque prossimi allo zero; le curve annuali medie e mediane, invece, difficilmente presenteranno valori nulli poiché esse derivano dal calcolo della media e della mediana dei valori osservati, ovvero dalla media e dalla mediana dei valori minimi di deflusso che non saranno tutti nulli. Il repentino abbassamento della curva totale alle alte percentuali di durata, che osserviamo per  $d > 0.9$ , è però anche accentuato dalla scala semilogaritmica adottata.

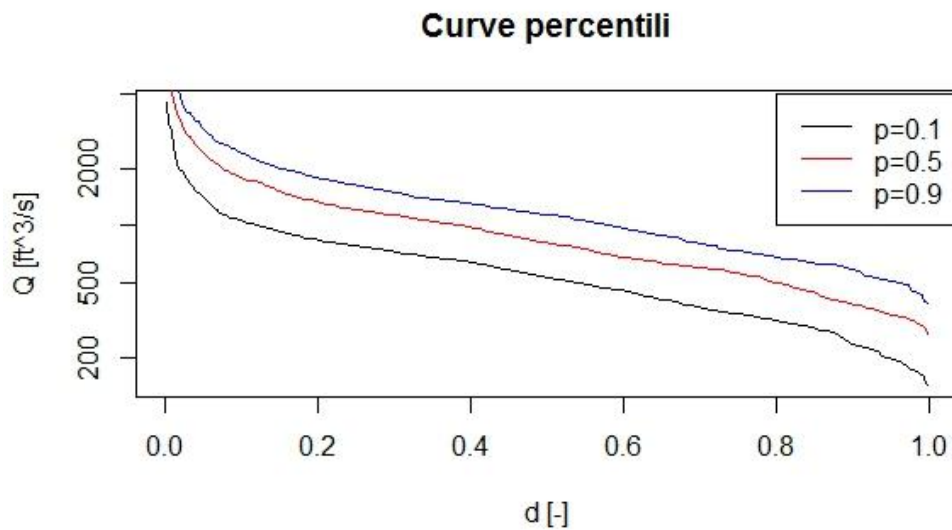
### ***1.3 Curve di durata associate ai percentili***

L'interpretazione annuale proposta da Vogel e Fennessey (1994) ha consentito di introdurre, nella letteratura relativa alle curve di durata, i concetti di percentile e intervallo di confidenza e, quindi, la costruzione di una nuova classe di curve di importante rilevanza: le curve di durata associate ad un ben definito percentile  $p$ .

Il percentile  $p$  rappresenta, per ogni percentuale di durata  $d$ , quel valore di portata che viene superato l' $(1-p)\%$  delle volte. Tramite questo concetto è possibile, quindi, rappresentare, sempre per uno specifico campione di osservazioni associato ad un ben definito corso d'acqua, l'andamento della curva di durata per tipici, ma ipotetici, anni umidi o secchi. Nel Paragrafo 1.2 è stato già introdotto un esempio di curva di durata associata ad un percentile: si tratta della curva mediana che, come detto, rappresenta il campione di portate ordinate che, relativamente ad una specifica percentuale di durata, viene superata con una probabilità del 50% ( $p=0.5$ ). Seguendo tale definizione, tale curva rappresenta la distribuzione delle portate per un ipotetico anno "medio" o "tipico" del corso d'acqua analizzato.

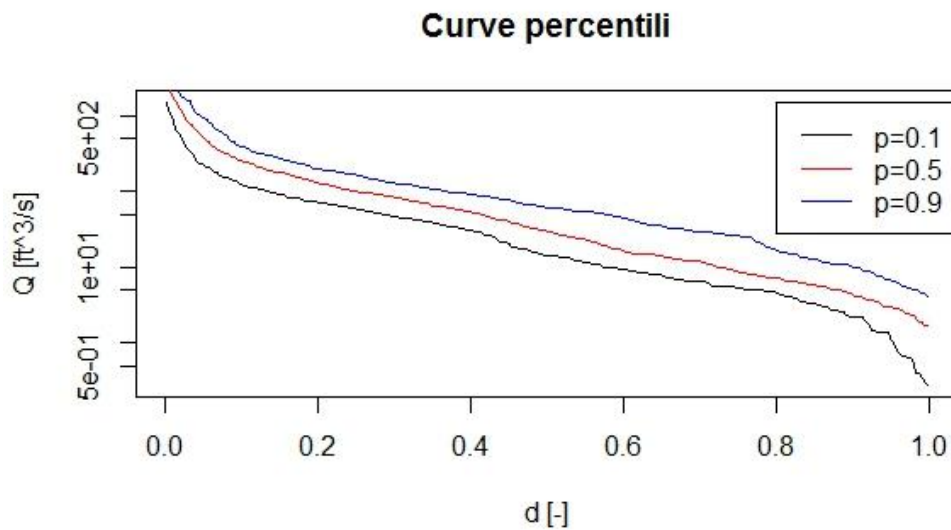
Combinando tra loro vari percentili, è possibile costruire i cosiddetti intervalli di confidenza, associati ad un determinato livello di significatività  $\alpha$ , che permettono di individuare dei campi di variabilità delle portate ben definiti: in questo modo si realizzano, intorno al valore medio, delle fasce all'interno delle quali ho la probabilità  $\alpha$  di trovare un determinato valore di portata. Con la rappresentazione grafica di tali intervalli è possibile quindi avere un'idea, per ogni durata, della variabilità dei valori di portata attorno al valore individuato dalla curva annuale media o mediana. Gli intervalli di confidenza sono individuati utilizzando percentili la cui somma sia pari a 100% e la differenza sia pari al livello di significatività  $\alpha$  voluto.

Alla pagina seguente è riportato un esempio di curve percentili ricavate dalle osservazioni di portata relative al bacino del Little Tennessee River chiuso Needmore (North Carolina):



**Figura 1.7:** Andamento delle curve annuali relative al Little Tennessee River at Needmore (NC) associate ai percentili 0.1 e 0.9 con intervallo di confidenza dell'80%. Si riporta inoltre la curva mediana (percentile 0.5).

Dalla Figura 1.7 si vede come l'andamento dell'intervallo di confidenza presenti un andamento molto simile a quello delle curve di durata annuali. Ciò non è scontato poiché l'eventuale presenza di anni secchi, con conseguente numero elevato di deflussi nulli, può provocare un abbassamento molto accentuato del percentile inferiore (10%) che tenderebbe così a valori di portata prossimo allo zero. Ciò è visibile nel grafico in Figura 1.8 relativo al bacino del Turkey Creek chiuso a Kimbrough (Alabama), riportato alla pagina seguente.



**Figura 1.8:** Andamento delle curve annuali relative al Turkey Creek at Kimbrough (AL) associate ai percentili 0.1 e 0.9 con intervallo di confidenza dell'80%. Si riporta inoltre la curva mediana (percentile 0.5).

In corrispondenza delle percentuali di durata  $d > 0.9$  si vede un repentino crollo della curva di durata associata al percentile 10% dovuta alla presenza di numerosi valori nulli nel campione di osservazioni dei deflussi.

In generale, stazioni idrometriche caratterizzate da andamenti dei deflussi piuttosto regolari presentano intervalli di confidenza ristretti, mentre le stazioni caratterizzate da una certa variabilità dei deflussi nel corso degli anni, o per le quali si sono verificati anni particolarmente umidi o secchi, presentano intervalli di confidenza ampi, dove le curve percentili superiori risultano innalzate rispetto a quelle inferiori o, viceversa, le curve percentili inferiori risultano abbassate rispetto a quelle superiori.

Come già spiegato nel Paragrafo 1.2, le curve di durata associate ai diversi percentili possono presentare un'irregolarità maggiore rispetto all'andamento della curva media.

#### ***1.4 Applicazioni ingegneristiche delle curve di durata annuali***

Le curve di durata, vista la loro capacità di rappresentare in modo semplice molteplici informazioni di natura idrologica, sono, al giorno d'oggi, molto utilizzate in una grande

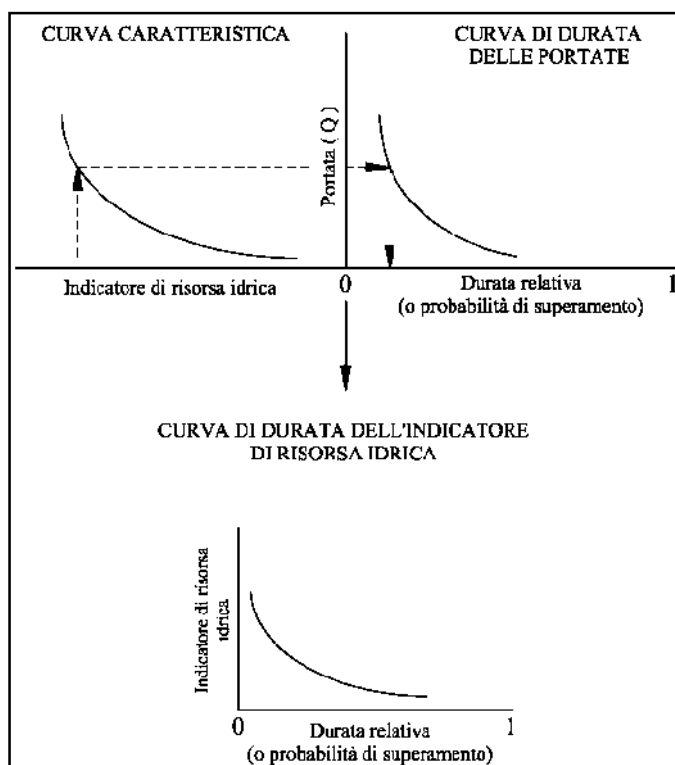


varietà di tematiche relative alla gestione delle risorse idriche come l'approvvigionamento idrico, il controllo della qualità delle acque e la produzione di energia idroelettrica.

In ognuna delle applicazioni in cui è usata, la curva di durata è sempre associata ad un indicatore della risorsa idrica che chiameremo IRI (Vogel e Fennessey 1995). Esso può essere ad esempio rappresentato dal volume di sedimenti veicolato dalla corrente fluviale, dal grado medio di torbidità della stessa, dalla concentrazione media di inquinanti, dalle caratteristiche organolettiche, come il pH, ed altri elementi rilevati durante un dato periodo di osservazione.

La Figura 1.9 mostra come si costruisce una curva di questo tipo:

- la relazione esistente tra le portate misurate in una determinata sezione e l'IRI scelto viene descritta in base alla cosiddetta curva caratteristica (indicata con terminologia anglosassone come *rating curve*);
- tale curva viene combinata con una curva di durata delle portate relativa alla stessa sezione e si ottiene la curva di durata dell'IRI di interesse. Ovviamente l'esattezza della curva risultante dipende dall'esattezza delle curve che vengono combinate.



**Figura 1.9:** Metodo di costruzione di una curva di durata dell'indicatore di risorsa idrica di interesse

Tale costruzione è possibile solo per gli indicatori che possono essere correlati unicamente con la portata. Questo rappresenta una limitazione delle curve caratteristiche le quali possono risultare non corrette proprio per il fatto che molti indicatori non sono funzione solo della portata ma sono complesse funzioni di più variabili. Ad esempio, i vari controlli idraulici che vengono effettuati a monte o a valle del punto di interesse dimostrano che la relazione esistente tra portata e altezza idrometrica non è la stessa per diverse sezioni fluviali.

Le curve di durata annuali, oggetto di questo elaborato, vengono utilizzate per la caratterizzazione della frequenza annuale dei regimi di deflusso e, di seguito, vengono riportate due applicazioni possibili di questo tipo di curva (Vogel e Fennessey 1995).

Costruzione di carte delle inondazioni di corsi d'acqua: Per costruire carte delle inondazioni di corsi d'acqua, si possono utilizzare le curve di durata delle altezze idrometriche (Stage Duration Curves) in una data sezione del corso d'acqua stesso. Tali curve si ottengono combinando insieme la scala di deflusso, che descrive la relazione esistente tra le portate misurate in una determinata sezione e le corrispondenti altezze idrometriche, e una curva di durata delle portate relativa alla stessa sezione. L'IRI è quindi rappresentato, in questo caso, dall'altezza idrometrica associata ad una determinata portata.

In generale, la curva di durata delle altezze idrometriche rappresenta la probabilità che un dato livello idrometrico venga eguagliato o superato durante l'intero periodo di osservazione. Se si utilizza la mediana delle curve di durata annuali, allora la risultante curva di durata delle altezze idrometriche rappresenta la probabilità di superamento di un dato livello idrometrico durante un ipotetico anno "tipico" o mediano per la sezione in esame. L'utilizzo della curva annuale è, in questo caso, molto più idoneo rispetto a quello della curva di lungo periodo in quanto, nell'anno "tipico" o mediano considerato, non rientrano valori estremamente elevati di portata che non si sono ripetuti, ad esempio, più di una volta in un periodo di osservazioni molto lungo e che farebbero sovrastimare, in modo eccessivo, il rischio di inondazione.

L'uso delle curve di durata dei livelli idrometrici per la costruzione di carte delle inondazioni presenta diversi vantaggi rispetto alle tradizionali procedure contenute nei piani di controllo delle piene, le quali tendono a focalizzare la loro attenzione solo sugli eventi di piena più violenti con tempo di ritorno pari a 100 e 500 anni. Le curve di durata delle altezze idrometriche invece possono fornire informazioni su tutti gli eventi di portata; per questo motivo sono particolarmente adatte per tutti quegli studi che cercano di definire la frequenza di inondazione relativa ad ogni valore di portata e non solo per gli eventi estremi di piena.

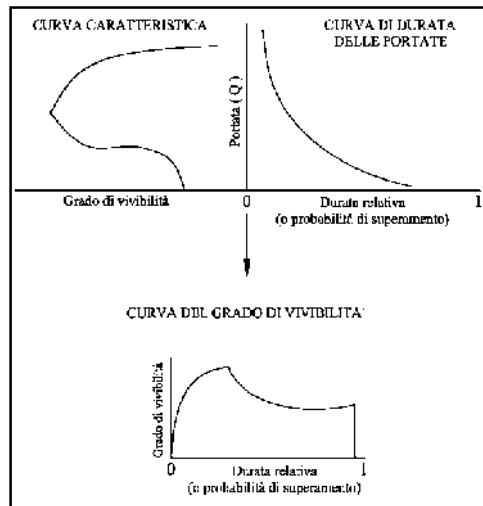
Le carte dei livelli idrometrici di un corso d'acqua e delle inondazioni ricavate da una curva di durata delle portate ottenuta a partire dai dati di portata media giornaliera, non possono

comunque sostituire le tradizionali analisi di frequenza delle piene che sono e dovrebbero sempre essere basate sui valori di portata massima istantanei (colmi istantanei).

Valutazione del deflusso minimo vitale: Recentemente, l'interesse per l'ambiente riguardo agli effetti dell'urbanizzazione sugli ecosistemi acquatici è cresciuto. Il perseguimento di un unico obiettivo nel controllo delle portate fluviali, come ad esempio la derivazione ad uso irriguo, la navigazione interna, la produzione di energia idroelettrica, la conservazione di una particolare specie a rischio di estinzione o la preservazione di beni paesistici, non è più una scelta ingegneristica praticabile. 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 ossigeno disciolto, di torbidità e determinate concentrazioni di sedimenti, in generale, dunque, 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. Estes e Orsborn (1986) e Gordon et al. (1992) passano in rassegna una varietà di metodi empirici e modelli di simulazione numerica per la determinazione di tali portate.

Probabilmente l'approccio più largamente accettato e sicuramente il più diffuso negli Stati Uniti è l'Instream Flow Incremental Method (IFIM), introdotto dal Cooperative Instream Flow Group del Fish and Wildlife Service degli Stati Uniti (Milhous et al., 1990) e ricapitolato da Nestler et al. (1989). L'IFIM è un piano concettuale per l'esame e lo studio degli habitat presenti in un corso d'acqua, ed è costituito da un insieme di modelli che possono prevedere cambiamenti nelle specie ittiche e in altri habitat dovuti a modificazioni nel regime dei deflussi idrici del fiume considerato. Una componente fondamentale dell'IFIM è quella dedicata alla simulazione di un determinato habitat naturale, detta PHABSIM (Milhous et al., 1990). Il PHABSIM può essere utilizzato per sviluppare una curva caratteristica che mette in relazione il grado di vivibilità (Weighted Useable Habitat) con la portata defluente nel corso d'acqua 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 1.10:



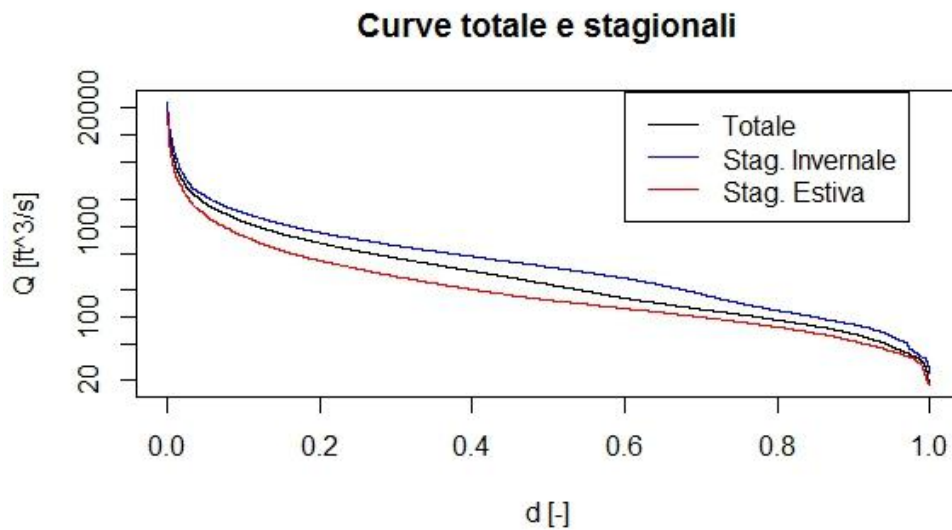
**Figura 1.10:** Metodo di costruzione di una curva di durata del grado di vivibilità

La curva di durata annuale, da accoppiare alla curva relativa al grado di vivibilità, è molto utile poiché, in tal modo, si riescono a valutare le condizioni di vita, della specie considerata, annualmente escludendo eventuali valori anomali di portata che potrebbero falsificare l'intera analisi.

### ***1.5 Curve di durata di lungo periodo su base stagionale***

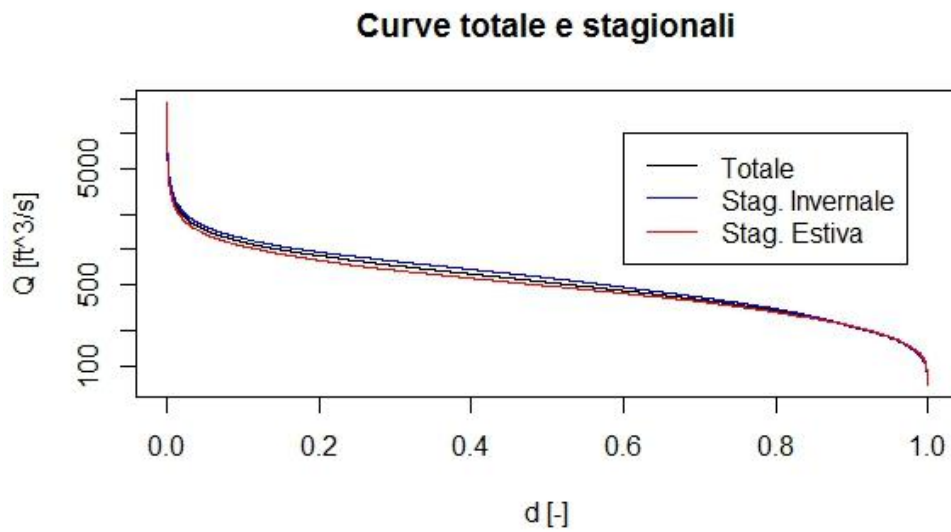
Una diversa interpretazione delle curve di durata di lungo periodo (POR) è data dalla loro costruzione su base stagionale. Essa non è ancora molto conosciuta ed utilizzata nella gestione delle risorse idriche e nemmeno in letteratura sono riportate numerose informazioni su tale argomento. Tuttavia, questa nuova interpretazione può presentare una notevole utilità vista la ciclicità stagionale delle portate nei corsi d'acqua.

Di seguito si riporta il confronto fra la curva POR relativa ai 39 anni di osservazione (dal 1951 al 2009) dei deflussi nel Buttahatchee River chiuso a sud di Hamilton (Alabama) negli USA e due ulteriori curve POR, riferite allo stesso periodo di osservazioni del medesimo bacino, rappresentanti l'andamento delle portate nella stagione autunnale - invernale (ottobre-marzo) e nella stagione primaverile - estiva (aprile-settembre).



**Figura 1.11:** *Buttahatchee River - Confronto fra la curva POR totale e le curve POR relative alla stagione autunnale - invernale e primaverile - estiva*

Dall'analisi della Figura 1.11, si vede come le portate durante il periodo autunnale - invernale siano maggiori di quelle della stagione primaverile - estiva. Tale comportamento è caratteristico delle curve stagionali, costruite con la precedentemente esposta suddivisione mensile, in corrispondenza di valori di deflusso associati a percentuali di durata intermedie ( $0.3 \leq d \leq 0.8$ ); può accadere, invece, di avere la POR estiva maggiore rispetto a quella invernale in particolare nel ramo superiore della curva. In Figura 1.12 è mostrato il confronto delle tre curve, viste in Figura 1.11, relative al Chattooga River chiuso a Clayton (Georgia). In tal caso possiamo notare come, in corrispondenza di percentuali di durata prossime a zero, la POR estiva è più alta, in termini di portata, rispetto alla POR invernale. Ciò è dovuto a dei valori di portata superiori ai  $15000 \text{ ft}^3/\text{s}$  che si sono verificati nella seconda metà dei mesi di settembre degli anni 1939 e 2003, ovvero due mesi caratterizzati da valori di precipitazione inattesi per quella stagione.



**Figura 1.12:** *Chattooga River - Confronto fra la curva POR totale e le curve POR relative alla stagione autunnale - invernale e primaverile - estiva*

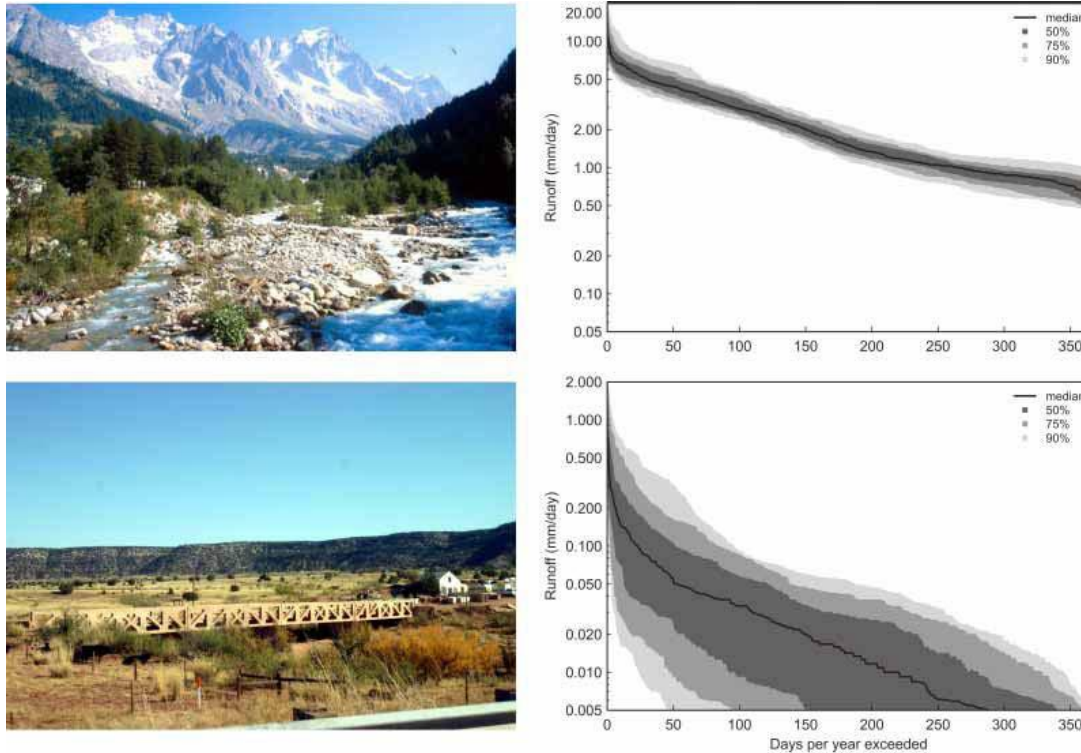
In generale possiamo dire, dall'analisi delle Figure 1.11 e 1.12, che, considerando un raggruppamento dei dati di portata in sole due stagioni, la curva totale rappresenta una sorta di curva media dei regimi di deflusso stagionali.

## ***CAPITOLO 2: STIMA DELLE CURVE DI DURATA IN BACINI NON STRUMENTATI***

### ***2.1 Influenza del clima e delle caratteristiche del bacino sulla curva di durata***

Le curve di durata, come detto nel Capitolo 1, sono rappresentazioni grafiche di immediata e semplice comprensione che permettono di individuare la variabilità dei deflussi in un determinato bacino e, sempre considerata la loro estrema semplicità ed affidabilità, come visto, sono utilizzate in numerose applicazioni nel campo della gestione delle risorse idriche. Tuttavia, il problema legato all'insufficienza o alla totale assenza di dati di portata, molto spesso dovute alla difficoltà di installazione di stazioni idrometriche, ha come conseguenza l'impossibilità di costruire la curva di durata oppure di ricostruirla con elevati e, molto spesso intollerabili, livelli di incertezza. Per ovviare a tale problema, è necessario ricorrere a modelli idrologici di diverso tipo, caratterizzati da un numero più o meno elevato di parametri da calibrare, al fine di stimare i deflussi relativi ad un particolare corso d'acqua.

Per stimare le curve di durata in sezioni non strumentate, o con un numero di dati di portata insufficiente, è necessario individuare tutti quei fattori che differenziano tali curve passando da un bacino ad un altro. In Figura 2.1, tratta da Castellarin et al. 2012, è riportato un confronto tra due curve di durata associate a due bacini aventi dimensioni simili, ma posizionate in regioni particolarmente in contrasto tra loro, una nell'Italia settentrionale e un'altra in New Mexico (USA). Dal confronto fra le FDC si vede come il bacino del New Mexico non solo è effimero, ma ha anche una significativa variabilità intra-annuale (caratteristica usuale dei bacini effimeri). Viceversa il bacino nel Nord Italia è perenne e con una variabilità intra-annuale molto contenuta.



**Figura 2.1:** Variabilità mediana e intra-annuale delle curve di durata. In alto è riportato il bacino del Dora Baltea cjiuso a Tavagnasco in Italia (area 3311 km<sup>2</sup>). In basso è riportato il bacino del Mora chiuso a Shoemaker, New Mexico (area 2959 km<sup>2</sup>). Foto: XX, K.Ahler.

La stima delle curve di durata in sezioni non strumentate passa, per i motivi illustrati in Figura 2.1, dal principio di similitudine idrologica, secondo il quale una relazione, che esprime un legame idrologico, può essere utilizzata non solo sul bacino per il quale è stata dedotta, ma anche su tutti i bacini che sono idrologicamente simili ad esso. Due bacini si dicono idrologicamente simili se hanno uguali, o simili, quelle caratteristiche che influiscono sul particolare fenomeno idrologico in esame come, ad esempio, la permeabilità del bacino, l'estensione areale, la precipitazione che lo sollecita, la copertura vegetale, ecc. L'individuazione dell'influenza delle caratteristiche climatiche e geomorfologiche del bacino, sulle portate che in esso defluiscono, può rendere possibile l'adattamento della curva di durata, ricavata per sezioni strumentate, a sezioni non strumentate appartenenti a regioni simili o omogenee. Allo stesso modo, l'individuazione di tutti i processi che controllano le curve di durata empiriche aiuta non solo nella caratterizzazione di zone omogenee, ma anche nell'uso appropriato di modelli per l'estrapolazione/ricostruzione delle curve di durata in bacini non strumentati.

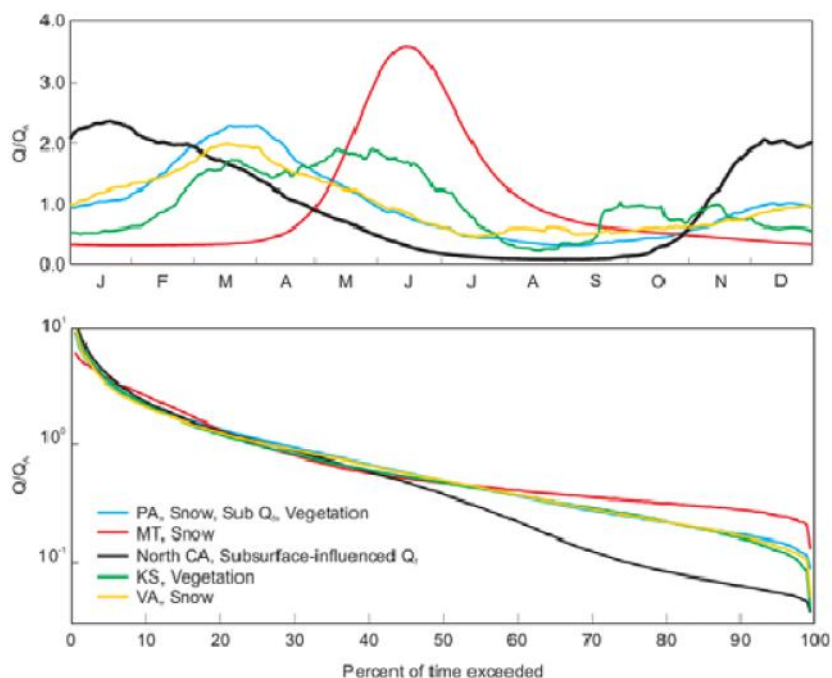
Uno dei fattori principali che influenza l'andamento e la forma della curva di durata è, come già detto, il clima. A testimonianza di ciò, possiamo riportare alcuni esempi: la media annuale



della curva di durata (o delle portate) dipende dall'aridità del clima la quale rispecchia la contrapposizione tra acqua ed energia disponibile; la pendenza della curva nel ramo centrale, dipendente dalla varianza delle portate giornaliere, può essere affetta dall'antagonismo tra la stagionalità delle precipitazioni e quella del potenziale di evaporazione.

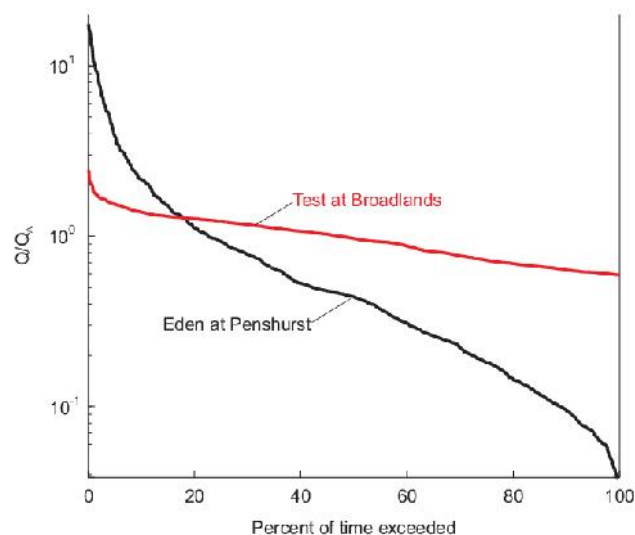
Altri aspetti climatici che possono influenzare la curva di durata sono: il quantitativo di precipitazione nevosa e la percentuale di tempo, rispetto all'intero periodo di osservazione, in cui essa si verifica; l'eventuale scioglimento di neve accumulata; la variazione stagionale e spaziale della copertura vegetativa, la quale influenza l'entità e il tempo di evaporazione e, di conseguenza, l'entità e la distribuzione temporale dei deflussi. In generale, le stagionalità dei processi nevosi e di quelli fenologici possono entrambe essere attribuite alla variazione stagionale della temperatura dell'aria (che è ovviamente un fattore climatico).

La relazione fra aspetti climatici caratteristici del bacino e l'accumulo di portate in esso possono influenzare la forma della curva, come mostrato in Figura 2.2. In essa è riportata la variabilità annuale delle portate in diversi corsi d'acqua degli Stati Uniti e le curve di durata adimensionalizzate per la media giornaliera la quale, come detto, dipende dall'aridità del clima. Si vede, chiaramente, come tale procedura di standardizzazione porti ad avere curve di durata con forma simile associati a bacini con caratteristiche climatiche differenti.



**Figura 2.2:** Andamento del regime dei deflussi intra-annuale (in alto) e FDC standardizzate per la media giornaliera delle osservazioni (in basso) relativi a bacini degli Stati Uniti localizzati in Pennsylvania (PA), Montana (MT), Northern California (North CA), Kansas (KS), and Virginia (VA). Da Yaeger et al., (2012).

La variabilità intra-annuale delle portate, riscontrabile dall'andamento della curva di durata, è dovuta non solo a fattori climatici, ma anche alle caratteristiche del bacino e del sottosuolo. Ad esempio, i bacini caratterizzati da un letto con permeabilità bassa (argilla, limo) presentano una risposta idrologica (traduzione della precipitazione in deflusso superficiale) molto rapida e la corrispondente curva di durata risulterà più ripida; invece, bacini con letto ad elevata permeabilità (sabbia o ghiaia) avranno una risposta idrologica più lenta e, di conseguenza, una curva di durata meno ripida. Altra caratteristica chiave del bacino, che influisce sulla forma della curva, è la copertura vegetale che determina una ripartizione della precipitazione caduta in una componente di intercettazione e in una di deflusso superficiale e subsuperficiale. Inoltre, la precipitazione, depurata dalla componente di intercettazione, che si infiltra è ripartita in una frazione che defluisce nel sottosuolo ed in un'altra che viene reindirizzata in atmosfera tramite il processo di traspirazione ad opera delle piante. Tutti i fenomeni appena descritti sono governati dalla geologia del suolo, in particolare dalla conducibilità idraulica del suolo stesso, dalla copertura vegetativa e dalla loro attività e dall'uso antropico del territorio. La Figura 2.3 mostra gli effetti della geomorfologia del bacino sulla forma della curva di durata per due bacini nel Regno Unito. Si vede come l'Eden chiuso a Peshurst, caratterizzato da depositi argillosi, abbia una capacità d'accumulo minore rispetto al Test chiuso a Broadlands costituito da formazioni permeabili per il 90%.



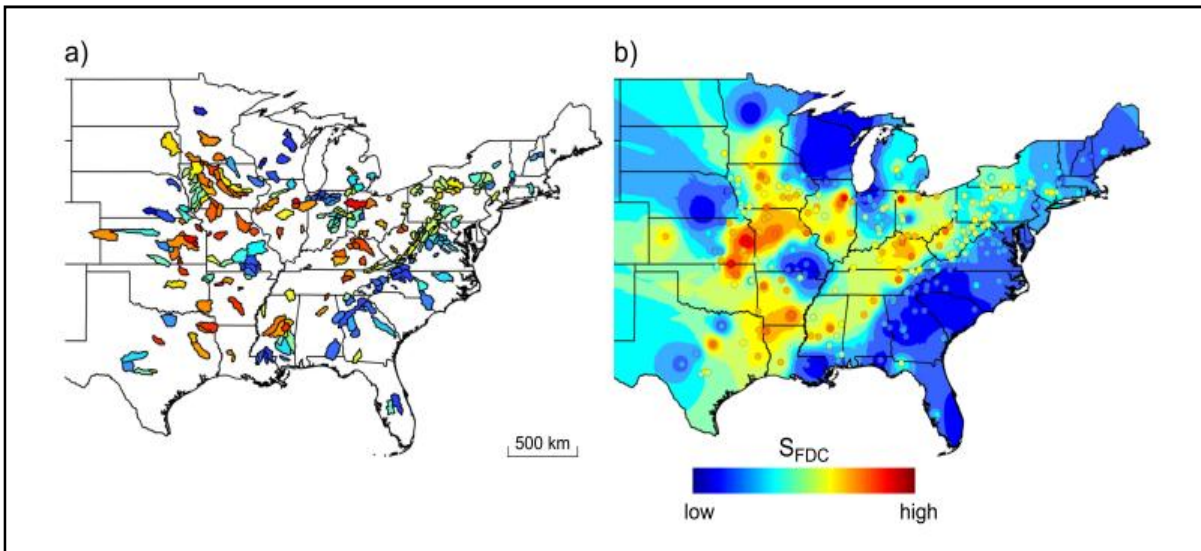
**Figura 2.3:** Curve di durata standardizzate per la media dei deflussi giornalieri dell'Eden chiuso a Peshurst (UK) e del Test chiuso a Broadlands (UK). Tratta da Yadav et al. (2007).

Inoltre, è bene ricordare che per ricavare la curva di durata in sezioni non strumentate è molto importante considerare che tale curva, per un assegnato bacino, può subire importanti modifiche a seguito di cambiamenti ambientali, come i cambiamenti nell'uso del suolo, l'estrazione di acqua o cambiamenti climatici.

## ***2.2 Individuazione di bacini idrologicamente simili***

L'estrapolazione o il trasferimento di curve di durata da sezioni strumentate a non strumentate è strettamente dipendente dalla nozione di similitudine idrologica precedentemente introdotta. Per poter individuare tale similitudine è necessario conoscere e comprendere la relazione fra le caratteristiche della curva (valori di portata e pendenza) e le caratteristiche climatiche e geomorfologiche del bacino.

*Similitudine di portate:* Gli indici naturali per valutare la similitudine tra curve di durata sulla base delle sole portate sono la pendenza della curva stessa o i parametri delle distribuzioni di probabilità ad essa associati. Sawicz et al. (2011) hanno presentato uno studio effettuato su un elevato numero di bacini degli Stati Uniti in cui è riportata una mappa, visibile nel pannello di sinistra in figura 2.1, della pendenza media del ramo centrale delle curve di durata, associate a tali bacini, e costruite sulla base di un periodo di osservazioni di oltre 50 anni. La pendenza del ramo intermedio della curva, legata alla varianza delle portate giornaliere, è il risultato dell'antagonismo tra la stagionalità della precipitazione e quella dell'evaporazione potenziale; essa è mediata per l'area della superficie di drenaggio e, dunque, fornisce una misura affidabile di similitudine per l'intera curva. D'altra parte il pannello di destra in Figura 2.4, sempre riferito allo studio effettuato da Sawicz et al. (2011), presenta un'interpolazione lineare tra la pendenza media della curva di durata del bacino basate sulla distanza fra le corrispondenti stazioni idrometriche di misura.



**Figura 2.4:** Pendenza delle curve di durata di bacini nell'est degli Stati Uniti ripresi dallo studio di Sawicz et al (2011): (a) Valori medi per ogni bacino. (b) Interpolazione lineare fra le stazioni idrometriche dell'USGS. In entrambi i casi, il colore è rappresentativo dell'entità della pendenza della curva.

Cheng et al. (2012) realizzarono un'analisi comparativa delle curve di durata per 197 bacini degli Stati Uniti, seguendo l'approccio presentato da Yokoo e Sivapalan (2011). Si è costruita una curva di durata per la precipitazione, una per il deflusso superficiale, una per il deflusso subsuperficiale e una per il deflusso totale, indicate con PDC, FFDC, SFDC e TFDC e si è costruita una distribuzione gamma troncata a tre parametri per ognuna di queste curve. Un esempio di tale distribuzione è la seguente:

$$f(q, k, n, r) = \begin{cases} r & q = 0 \\ (1-r) \cdot g(q, k, n) & q > 0 \end{cases}$$

dove  $r$  è la probabilità di deflusso nullo, ad esempio il numero di deflussi nulli diviso per la lunghezza del campione di osservazioni;  $g(\ )$  è la funzione di probabilità cumulata della distribuzione gamma;  $k$  e  $n$  sono i parametri della distribuzione gamma che soddisfano la condizione  $k \times n = 1/(1-r)$ . Questo significa che due dei tre parametri,  $r$ ,  $k$ ,  $n$ , e la media delle portate giornaliere sono sufficienti per rappresentare l'intera curva.

Similitudine climatica: La regionalizzazione delle curve di durata ha la migliore efficienza se la portate sono standardizzate per la portata media giornaliera, come visto in Figura 2.2. Tale valore può essere stimato tramite l'Indice di Aridità del corso d'acqua (Cheng et al. 2012), il quale diventa l'indicatore principale della similitudine tra i bacini. Castellarin et al. (2007)

mostrano come il parametro di posizione della curva di durata, connesso strettamente alla media annuale dei deflussi, è legato alla precipitazione netta media annuale insieme all'area del bacino su cui tale precipitazione cade. Una volta che ogni singolo valore di portata è normalizzato per la media giornaliera dei deflussi, le FDC annuali che ne derivano sono governate da diverse caratteristiche climatiche e territoriali che hanno un notevole impatto sulla trasformazione della variabilità della precipitazione intra-annuale nella corrispondente variabilità dei deflussi. Così come effettuato per la struttura proposta da Yokoo e Sivapalan (2011), il controllo di primo ordine sulle FDC normalizzate è la curva di durata delle precipitazioni (PDC). Ciò è particolarmente vero nel caso di FDC stimate per il deflusso veloce di superficie (FFDC). Cheng et al. (2012) hanno ricavato un indice climatico  $P_{max} \cdot r_p$

basato sulle serie di precipitazioni, dove  $P_{max}$  è la precipitazione massima osservata durante l'anno e  $r_p$  è la probabilità di precipitazione nulla. Si è visto che tale parametro ha un'ottima capacità predittiva della FFDC. Dallo studio svolto da Cheng et al. (2012) si vede, inoltre, un certo livello di simmetria spazio-temporale: la variabilità delle curve di durata tra i bacini è combinata con la loro variabilità tra gli anni.

Altri parametri climatici che controllano la pendenza della curva possono essere la stagionalità delle precipitazioni e l'evaporazione potenziale regionale. Ad esempio Cheng et al. (2012) hanno considerato il valore dell'indice di stagionalità, che rappresenta una misura della variabilità annuale delle precipitazioni, come un potenziale indice climatico per modelli regionali di stima delle FDC per deflussi lenti subsuperficiali (SFDC), nonostante la relazione non sia molto forte.

Similitudine di bacini: La maggior parte degli studi proposti in letteratura sui metodi regionali per la stima delle curve di durata hanno seguito approcci di natura statistica e, in essi, si è cercato di associare le misure quantitative delle FDC (pendenza, parametri di distribuzioni statistiche) ad appropriate caratteristiche dei bacini. Le caratteristiche dei corsi d'acqua, usualmente considerate per caratterizzare entità e forma delle curve di durata, sono l'estensione dei bacini stessi, la copertura vegetativa (Ouarda et al. 2000) e la geologia superficiale (Holmes et al. 2002, Castellarin et al. 2004).

In generale l'esistenza di relazioni significative tra gli indici quantitativi rappresentanti la forma della curva di durata e caratteristiche climatiche e geomorfologiche del bacino, come indice di aridità, indice di deflusso di base e indice di precipitazione, possono consentire regionalizzazioni idrologiche affidabili tra le quali il raggruppamento di bacini simili

## ***2.3 Raggruppamento di bacini***

Il raggruppamento di bacini aiuta nel processo di stima della curva di durata in due modi:

- permette una migliore individuazione del comportamento dei bacini in esame;
- incrementa la lunghezza del campione di osservazioni e quindi migliora l'accuratezza delle FDC in sezione non strumentate.

Tuttavia la letteratura scientifica non ha ancora trovato un accordo circa il miglior metodo di raggruppamento o su come selezionare gli approcci più affidabili. Il raggruppamento di bacini idrologicamente simili rimane, dunque, un problema aperto nell'ambito della regionalizzazione delle curve di durata.

Il processo di raggruppamento prevede due diverse fasi:

- la scelta di un indice quantitativo di similitudine che verrà utilizzato per identificare bacini idrologicamente simili;
- La scelta di un metodo di raggruppamento che utilizza la stima di questo indice di similitudine e organizza i bacini in vari gruppi.

I vari metodi ,riportati nel Paragrafo 2.2, presentavano degli approcci statistici per determinare questi indici che consentono di raggruppare bacini idrologicamente simili. Tuttavia, alternativamente, è possibile utilizzare approcci non parametrici: ad esempio, Ganora et al. (2009) hanno definito un metodo per quantificare le differenze, misurate come distanze, tra le curve di durata e, successivamente, hanno riferito queste distanze a differenze espresse in termini di caratteristiche climatiche e del bacino.

Un metodo di raggruppamento dei bacini consiste nel delineare regioni fisse e contigue (Castellarin et al, 2004a; Mohamoud, 2008; Viola et al., 2011). Secondo tale approccio, si considera che aree contigue siano caratterizzate da condizioni climatiche, topografiche e geologiche simili e, conseguentemente, saranno simili la risposta idrologica dei bacini e le FDC. Ovviamente questa non è l'unico modus operandi in quanto un bacino può essere caratterizzato da processi che portano ad una curva di durata simile a quella di un altro bacino non necessariamente contiguo ad esso. Le analisi in termini di gruppi di bacini sembrano prevalere rispetto agli approcci basati sull'individuazione di indici di similitudine precedentemente trattati.

Diversi altri metodi sono stati proposti in letteratura per il raggruppamento di bacini. Ci sono algoritmi che lavorano direttamente sulle caratteristiche del bacino attraverso la definizione di una misura di distanza (Ganora et al., 2009; Sauquet e Catalogne, 2011) mentre altri metodi di raggruppamento sono basati sull'utilizzo di approcci non lineari.

In conclusione si può dire che il raggruppamento è di fondamentale importanza nella stima delle FDC poiché si riesce, in tal modo, a sopperire alla mancanza o insufficienza di dati di portata semplicemente andando a cercare corrispondenze tra le caratteristiche, intrinseche e climatiche, del bacino in esame e quelle dei gruppi che si hanno a disposizione.

## ***2.4 Modelli regionali fisicamente basati***

Individuare l'influenza dei fattori climatici (precipitazione, temperatura, irraggiamento, evaporazione potenziale) e delle caratteristiche del bacino (suolo, topografia, vegetazione, estensione areale, attività antropica) sulla forma della curva di durata rappresenta l'obiettivo fondamentale degli idrologi. Tale scopo può essere ottenuto attraverso degli approcci fisicamente basati che legano i flussi di acqua e di energia con lo stato del sistema (ovvero la capacità di immagazzinamento del bacino) e la sua risposta idrologica. Per essere più precisi, i modelli regionali basati su processi fisici necessitano di includere, come elemento fondamentale, la variabilità temporale delle precipitazioni, che sollecitano il corso d'acqua in esame, a tutte le scale temporali, estrapolate dalle osservazioni disponibili. Tali modelli devono descrivere come questa variabilità si propaghi lungo tutto il bacino e come, infine, si traduca in una curva di durata. In tal modo, questa classe di modelli, fornisce un' eccellente strumento per interpretare (o reinterpretare) e valutare i risultati derivanti dalle applicazioni di metodi di tipo statistico e, allo stesso modo, di valutare possibili cambiamenti indotti, sulle FDC, da modificazioni osservate o stimate dei parametri climatici o delle caratteristiche del bacino.

I lavori, nell'ambito della stima delle curve di durata, specialmente in bacini non strumentati, sono stati svolti tramite approcci di natura statistica ed empirica. L'approccio al problema tramite modelli fisicamente basati, invece, è da sempre meno utilizzato, senza dubbio a causa delle difficoltà nel congiungimento di tutti gli aspetti statistici e dinamici che caratterizzano la variabilità delle portate, specialmente in una scala temporale estesa, richiesto nel caso delle FDC.

Negli ultimi tempi, tuttavia, ci sono stati numerosi studi che hanno iniziato ad approcciarsi al problema della stima delle curve di durata in bacini non strumentati attraverso l'ausilio di modelli a base fisica. Il punto focale, fino ad ora in questo ambito, è stata l'individuazione dell'influenza delle caratteristiche climatiche e dei bacini sulle FDC tramite degli step molto simili a quelli usati nei lavori sull'individuazione della frequenza degli eventi di piena. Questi metodi non sono ancora così evoluti da poter essere usati al meglio nelle operazioni di stima, ma stanno dimostrando di essere abbastanza promettenti.

Al giorno d'oggi sono utilizzate due classi di modelli regionale che prevedono un approccio di natura fisica:

- Modelli di distribuzione derivata che si pongono come obiettivo quello di individuare i fattori, che controllano la curva di durata, tramite un approccio analitico o quasi analitico, in modo tale da dare un'idea sui processi all'interno del modello regionale, ricavati tramite metodi statistici, e che, dunque, possono migliorare la regionalizzazione;
- Modelli afflussi-deflussi continui che generano serie continue di deflussi tramite le quali le FDC possono essere costruite e che consentono studi di sensitività i quali, anche in questo caso, forniscono indicazioni sui processi all'interno dei modelli.

## ***2.5 Modelli regionali statistici***

I modelli regionali più utilizzati per la stima delle curve di durata in sezioni non strumentate sono quelli ad approccio statistico. Lo scopo di tali modelli è quello di stimare, con procedure statistiche, le FDC attraverso un'analisi delle curve empiriche di bacini con collocazione geografica prossima a quelli in esame e tramite un'analisi delle caratteristiche climatiche e dei bacini in esame stessi.

Il lavoro di tesi svolto ha avuto come oggetto proprio la valutazione dell'efficienza di una di queste tecniche, conosciuta come Topological Kriging, appartenente alla sottocategoria dei metodi geostatistici.

Tuttavia, prima di illustrare tale metodo, è opportuno ricordare uno dei primi metodi regionale ad approccio statistico, noto come metodo della portata indice, di seguito trattato.

Metodo della portata indice: Il metodo del deflusso indice prevede due diversi tipi di approcci:



- Approccio parametrico: utilizza modelli per rappresentare le curve di durata standardizzate parametrizzando il modello e regionalizzando i suoi parametri attraverso una regressione (LeBoutillier e Waylen, 1993a e 1993b, Castellarin et al., 2004a e 2007). L'approccio è generalmente implementato come segue: viene scelta una distribuzione di frequenza affidabile la quale è adottata come distribuzione di una particolare regione; i parametri della distribuzione sono stimati, a scala locale, per un bacino strumentato, localizzato nella regione in esame, tramite l'utilizzo delle osservazioni di portata; sono successivamente individuati dei modelli di regressione regionali per stimare gli stessi parametri della distribuzione sulla base delle caratteristiche climatiche e geomorfologiche del bacino in esame. Il regime di frequenza delle portate giornaliere non può essere descritto accuratamente da una distribuzione con meno di 4 parametri (LeBoutillier e Waylen, 1993a; Castellarin et al. 2004a e 2007; Archfield, 2009). Questa affermazione, tuttavia, entra in conflitto con la necessità pratica di avere un numero limitato di parametri per ridurre il livello di incertezza dovuto alla loro calibrazione. Un numero limitato di parametri, inoltre, aumenta la possibilità di assegnare un chiaro significato ad ognuno di essi (ad esempio posizione, scala e forma) e un basso numero di modelli multi - regressivi necessari durante la fase di regionalizzazione.
  
- Curva di durata normalizzata: standardizza la curva di durata tramite un indice di deflusso e si assume che la curva che ne deriva non vari all'interno dei bacini appartenenti alla stessa regione omogenea. A tale scopo sono necessarie due fasi: identificazione di gruppi di bacini strumentati che possono essere assunti omogenei in termini di FDC normalizzate; identificazione di un legge di allocazione per assegnare un bacino non strumentato ad una determinata regione.

Il metodo parametrico e quello della curva normalizzata, relativi al modello della portata indice, sono tra loro complementari. Il parametrico consente di modellare l'intera curva, dando come risultato un valore stimato del deflusso associato ad un preciso valore di percentuale di durata, ma molto spesso si rendono necessari più di 4 parametri per fittare al meglio la distribuzione dei valori osservati e la regionalizzazione di più di 3 parametri è molto complessa (Castellarin et al. 2007). Il vantaggio principale della curva di durata normalizzata (secondo approccio del metodo della portata indice) è quello di non necessitare di una funzione di distribuzione, ma l'identificazione di un gruppo omogeneo può essere più

importante. Inoltre, il deflusso indice (solitamente la portata media annuale) deve essere stimato in sezioni non strumentate.

## **2.6 Metodi geostatistici**

Una particolare sottocategoria di modelli regionali ad approccio statistico, utilizzati per la stima delle curve di durata in sezioni non strumentate, sono i metodi geostatistici. La Geostatistica studia i fenomeni naturali che si sviluppano su base spaziale a partire dalle informazioni derivanti da un loro campionamento. In particolare studia la variabilità spaziale dei parametri che descrivono i suddetti fenomeni, estraendone le regole in un quadro modellistico di riferimento e usandole per effettuare le operazioni volte a dare soluzione a specifiche problematiche riguardanti la caratterizzazione e la stima dei fenomeni stessi (Raspa e Bruno 1994a).

Il principale vantaggio dei metodi geostatistici è che essi sono i migliori stimatori lineari indistorti: *migliori* nel senso che l'errore quadratico medio è minimo; *lineare* nel senso che la stima è una media pesata dei dati nell'area in esame; *indistorta* nel senso che l'errore medio atteso è nullo (Journel e Hujibregts 1978). I metodi geostatistici si sono sviluppati nell'industria mineraria. Il problema principale consisteva nello stimare la percentuale di minerale (e l'incertezza ad essa associata) all'interno di un blocco roccioso utilizzando un campionamento puntuale della percentuale di minerale nell'area in esame. A questo proposito, le correlazioni spaziale tra coppie di punti vengono plottate in funzione della loro distanza Euclidea. Il grafico ottenuto in tal modo prende il nome di variogramma il quale è lo strumento che viene utilizzato per stimare la variabile nel punto del blocco roccioso di interesse (Journel e Hujibregts 1978).

Il problema nei bacini idrografici è abbastanza diverso. La principale differenza, rispetto al caso sopra citato della concentrazione di minerale nel blocco roccioso, è che i bacini sono organizzati in sottobacini e dunque, a differenza delle rocce minerarie, i bacini sono strutture annidate nei quali l'acqua segue un determinato percorso identificato dal reticolo idrografico. È evidente, dunque, che bacini a monte o a valle dovrebbero essere trattati diversamente da bacini vicini che non presentano una suddivisione in sottobacini. Di conseguenza, le distanze Euclidee non sono lo strumento più idoneo per la misura della distanza spaziale tra i bacini stessi. La stima delle variabili sul reticolo idrografico necessita di una topologia diversa dalla tradizione topologia Euclidea.

La maggior parte delle applicazioni geostatistiche sui bacini idrografici, fino ad ora, hanno nonostante tutto utilizzato la distanza Euclidea fra i corsi d'acqua esaminati, misurando tale distanza fra le stazioni idrometriche o fra i centroidi de bacini stessi (Daviau et al. 2000; Adamowski and Bocci, 2001; Eaton et al. 2002; Skøien et al. 2003; Merz e Blöschl 2005). Considerata l'evidente struttura annidata dei bacini è sorprendente che siano state effettuate così poche ricerche per estendere i concetti geostatistici alle applicazioni idrologiche. C'è però un'importante eccezione. Gottshalk (1993a,b) Sauquet et al., 2000 si sono occupati di questo aspetto. Gottshalk (1993a) sviluppò per primo un metodo per il calcolo della covarianza in una rete idrografica fluviale usandola per interpolazioni lungo la rete stessa. Sauquet et al. (2000) sviluppò ulteriormente questo metodo per effettuare mappature della portata annuale nella rete idrografica usando vincoli di bilancio idrico nelle procedure di stima.

## ***2.7 Top-Kriging***

Il metodo di stima utilizzato nel presente lavoro di tesi per ricostruire le curve di durata in cross-validazione (cfr. Capitolo 4) per 182 bacini localizzati nell'est degli Stati Uniti (cfr. Capitolo 3), prende il nome di Top-Kriging, un particolare metodo geostatistico proposto da Skøien, Merz e Blöschl nel 2006.

Ci sono due gruppi principali di variabili che controllano il deflusso:

- Il primo gruppo è costituito da variabili che sono continue nello spazio, e che includono precipitazione, evapotraspirazione e caratteristiche del suolo, che sono legate alla generazione locale delle portate. In ambito geostatistico la generazione delle portate è considerata un processo puntuale, ossia si assume che essa esista in ogni punto del territorio appartenente al bacino in esame (Wood e Sivapalan 1999). Analogamente, le altre variabili legate ai deflussi possono essere concettualizzate come processi puntuali continui su scala locale e, per la loro caratterizzazione, l'utilizzo di distanze Euclidee è appropriato. Le caratteristiche statistiche spaziali delle variabili puntuali possono essere rappresentate tramite il variogramma (Skøien et al. 2003).
- Il secondo gruppo è costituito da variabili legate al percorso della rete idrografica che sono influenzate dalla struttura dei bacini annidati dove la portata si accumula lungo il reticolo stesso. Variabili appartenenti a questo gruppo sono la portata media annuale,

le portate caratteristiche di media e di magra, la concentrazione di inquinanti, la torbidità e la temperatura dell'acqua. Queste variabili sono solo definite per punti sul reticolo idrografico e non possono essere rappresentate tramite distanze Euclidee, ma necessitano di una rappresentazione tramite metodi che rispecchiano la struttura annidata della rete idrografica.

Skøien et al. (2006) hanno proposto un metodo che combina questi due gruppi di variabili in una struttura geostatistica e che hanno chiamato Topological Kriging o Top-Kriging poiché è un metodo che tiene conto della topologia della rete idrografica e della struttura dei bacini annidati.

Nei metodi euclidei di Kriging (come l'Ordinary Kriging) il supporto, ovvero l'entità geometrica sulla quale la variabile regionalizzata  $z(\bar{x})$ , il cui valore dipende dalla localizzazione geografica, è definita o anche misurata, è di tipo puntuale. Un valore incognito  $\hat{z}(x_0)$  della variabile in posizione  $x_0$  può essere stimata come una media pesata delle variabili misurate nelle vicinanze:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2.1)$$

$\lambda_i$  è lo stimatore (o peso) della misura della variabile in posizione  $x_i$  e  $n$  è il numero delle misurazioni vicine usate nell'interpolazione. I pesi  $\lambda_i$  possono essere ricavati risolvendo il seguente sistema di kriging:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \chi_{ij} - \lambda_i \tau_i^2 + \lambda_i \chi_{0i} = \chi_{0i} & i=1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (2.2)$$

I  $\chi_{ij}$  si riferiscono al valore del variogramma fra le due osservazioni  $i$  e  $j$ .  $\tau$  è il parametro di Lagrange presente nel krigaggio ordinario e  $\tau_i^2$  rappresenta la varianza di stima della misura  $i$  (de Marsily 1986, Merz e Blöschl 2005).

Nel caso del Top Kriging, il supporto della variabile regionalizzata in esame non è più puntuale ma è definito da un'entità geometrica ad area non nulla che, nelle applicazioni idrologiche, può essere rappresentata dall'area del bacino. Indicando con  $A$  il supporto, una variabile puntuale  $z(\bar{x})$  può essere mediata su un'area come:

$$\bar{z}(A) = \frac{1}{A} \int_A w(\bar{x}) z(\bar{x}) d\bar{x} \quad (2.3)$$

dove  $\bar{z}$  è la variabile media spaziale e  $w(\bar{x})$  è una funzione dei pesi. Se esiste una motivazione per cui è possibile considerare la variabile conservativa, o approssimativamente conservativa, come fatto da Skøien et al. (2006), è possibile scrivere  $w(\bar{x})=1$ . Se si considera un supporto A ad area non nulla, la (2.2) rimane valida, ma il valore del variogramma fra le osservazioni deve essere ottenuto da una regolarizzazione (Cressie 1991). Assumendo l'esistenza di un variogramma puntuale  $\gamma_p$ , il valore del variogramma fra due aree  $A_1$  e  $A_2$  sarà:

$$\begin{aligned} \gamma_{12} &= 0.5 \times \text{Var}(z(A_1) - z(A_2)) \\ &= \frac{1}{A_1 A_2} \int \int_{A_1 A_2} \gamma_p(|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|) d\bar{x}_1 d\bar{x}_2 - 0.5 \times \left[ \frac{1}{A_1^2} \int \int_{A_1 A_1} \gamma_p(|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|) d\bar{x}_1 d\bar{x}_2 + \frac{1}{A_2^2} \int \int_{A_2 A_2} \gamma_p(|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|) d\bar{x}_1 d\bar{x}_2 \right] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dalla (2.4) si vede come al primo termine del secondo membro, rappresentante la varianza tra le due posizioni  $x_1$  e  $x_2$ , venga sottratta una quantità pari alla varianza interna ai rispettivi supporti, producendone, di fatto, una più bassa di quella della variabile puntuale.

La complessità di dover risolvere analiticamente integrali quadrupli porta, nella pratica, ad implementare uno schema di calcolo numerico a partire da una discretizzazione regolare dei supporti considerati. È importante tener conto che la maglia di discretizzazione delle aree deve essere la stessa, ma può anche capitare, specialmente nelle operazioni di stima di variabili idrometriche, di avere a che fare con bacini di estensioni areali che, abbracciando diversi ordini di grandezza, possono determinare una perdita di accuratezza soprattutto nei bacini più piccoli. Secondo quanto proposto da Skøien, viene fissata una griglia di base che per un determinato supporto, può essere ridefinita aumentando la risoluzione finché all'interno non si ha un numero minimo accettabile di punti di calcolo. Questa tecnica assicura che i punti usati per i supporti più grandi vengono riutilizzati nella discretizzazione di supporti più piccoli contenuti nei primi, com'è naturale se si tratta di sottobacini contenuti in bacini più grandi. Lo stesso autore propone per il calcolo della varianza regolarizzata del nugget (effetto pepita) tra due supporti di diversa area  $A_1$  e  $A_2$  l'espressione:

$$C_0(A_1, A_2) = 0.5 \left( \frac{C_{0_p}}{A_1} + \frac{C_{0_p}}{A_2} - \frac{2C_{0_p} \cdot \text{Meas}(A_1 \cap A_2)}{A_1 A_2} \right) \quad (2.5)$$

dove  $\text{Meas}(A_1 \cap A_2)$  rappresenta l'intersezione (area condivisa) tra le due aree  $A_1$  e  $A_2$  e possono manifestarsi due casi:

- Aree in sovrapposizione:  $\text{Meas}(A_1 \cap A_2) = \min\{A_1, A_2\}$
- Aree disgiunte:  $\text{Meas}(A_1 \cap A_2) = 0$

In conclusione si può affermare che nelle applicazioni geostatistiche ed in particolare in quelle idrologiche è possibile regolarizzare una variabile regionalizzata applicando una trasformazione lineare che consideri la non puntualità del supporto per poi procedere all'interpolazione finale che tiene conto dell'estensione areale e della mutua vicinanza, o sovrapposizione, dei bacini di cui si vuole effettuare la stima.

## ***2.8 Top-Kriging applicato al Total Negative Deviation (metodo TNDTK)***

Viene descritto di seguito, da un punto di vista teorico, il modello TNDTK la cui efficienza, nella stima delle curve di durata in sezioni non strumentate, è stata analizzata nella presente dissertazione.

### ***2.8.1 Total Negative Deviation (TND)***

La tecnica del Top-Kriging potrebbe essere applicata, in teoria, direttamente per interpolare i singoli valori di portata associati ad una determinata durata. Per cui, con un procedimento simile a quello adottato da Shu e Ouarda (2012), una stima regionale della FDC può essere ottenuta applicando consecutivamente il Top-Kriging per  $r$ -volte, dove  $r$  è il numero delle durate considerate per ottenere una rappresentazione accurata della curva (ad esempio 15-20 come suggerito sempre da Shu e Ouarda nel 2012); successivamente si ottiene la curva interpolando gli  $r$  valori di portata stimati.

Tuttavia ogni FDC è un risultato continuo derivante, come detto, dalle complesse interazioni tra condizioni climatiche e caratteristiche geomorfologiche del bacino. Ciò andrebbe perso del tutto o in parte con l'approccio appena illustrato; inoltre tale strategia non preserva una fondamentale proprietà delle curve di durata, ovvero la relazione di non decrescenza tra portata e durata (Pugliese et al. 2014).

Per questo motivo si è sviluppata una procedura di Top-kriging che regionalizzi l'intera FDC vista come un singolo elemento. In geostatistica occorre definire una "variabile regionalizzata" che esprime una caratterizzazione della variabilità spaziale dei fenomeni in

esame. Il Top-Kriging ha dimostrato di essere abbastanza affidabile nella determinazione di valori di portata indici per bacini non strumentati. Dunque, una possibile strategia è quella di identificare un valore indice che effettivamente riassume l'intera curva e determinare i valori  $\lambda_i$  del Top-Kriging relativi a questo punto. Tali valori possono poi essere utilizzati per mediare le FDC dei bacini vicini e per stimare le FDC del sito di interesse. Questo metodo di stima considera la FDC come un singolo elemento e l'interpolazione lineare rispetta la relazione di non decrescenza fra portata e durata.

Alcuni studi (ad esempio Sawicz et al. 2014) suggeriscono di usare la pendenza della curva di durata come indice complessivo per sintetizzare la curva stessa, ma Pugliese et al. (2014), a cui il presente lavoro fa riferimento, considerano la definizione di tale indice affetta da diversi gradi di soggettività (ad esempio una durata più alta o più bassa considerata per il calcolo della pendenza), e potrebbe essere difficile definirla in alcuni casi (ad esempio per deflussi effimeri o intermittenti).

Ganora et al. (2009) quantificano la diversità idrologica tra due bacini come l'area compresa fra le corrispondenti FDC empiriche standardizzate (ad esempio per il valor medio): due bacini con caratteristiche idrologiche simili mostreranno simili curve standardizzate e quindi un'area ridotta fra le curve, mentre bacini con comportamento idrologico radicalmente diverso avranno curve molto differenti e, di conseguenza, alti valori di area compresa tra le curve.

Seguendo tale idea, Pugliese et al. (2014) hanno proposto di riassumere l'intera FDC attraverso un parametro indicatore chiamato Total Negative Deviation, noto con l'acronimo di TND, e da qui il metodo TNDTK utilizzato nel presente lavoro e che indica l'applicazione del Top-kriging (TK) ai valori di TND. Esso è definito dalla deviazione negativa tra una FDC adimensionale (standardizzata per una portata di riferimento) e uno:

$$TND = \sum_{i=1}^m |q_i - 1| \Delta_i \quad (2.6)$$

dove  $q_i$  rappresenta l' $i$ -esimo valore di portata empirica adimensionale,  $\Delta_i$  è la metà dell'intervallo di frequenza fra il valore di portata  $i-1$  e quello  $i+1$  e la sommatoria include solo i valori degli  $m$  deflussi che sono inferiori a 1.

Le distinzioni fra gli aspetti idrologici dominanti nelle diverse stagioni, all'interno del medesimo bacino, possono essere individuate proprio tramite il TND. Bacini caratterizzati da una rapida risposta idrologica hanno curve di durata più ripide e, di conseguenza, un valore di TND maggiore; viceversa, a risposte idrologiche più lente, corrispondono FDC meno ripide e,

quindi, TND minori. Il TND è dunque un'importante parametro per l'individuazione della similitudine idrologica tra i bacini.

### ***2.8.2 Il MAF e Il MAP\* per la standardizzazione delle curve empiriche***

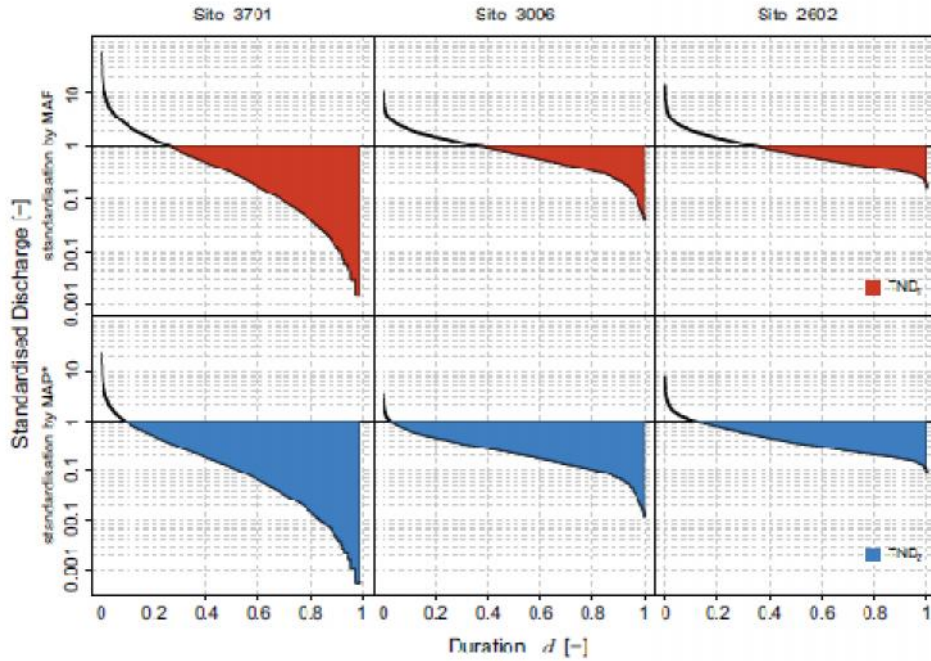
Come precisato in precedenza, il calcolo di tale indice necessita di una iniziale standardizzazione delle FDC. I metodi più usati, a tale scopo, sono:

- la normalizzazione per mezzo della media di lungo periodo, indicata con l'acronimo MAF, che rappresenta la metodologia tradizionale di standardizzazione delle curve di durata;
- la normalizzazione per mezzo dell'indice MAP\*, che è ricavato dal prodotto fra l'area del bacino in esame e la precipitazione media annuale (MAP).

L'idea, dietro la scelta delle due diverse procedure di standardizzazione delle curve di durata, deriva da due diverse finalità: la standardizzazione tramite MAF è il metodo tradizionale che viene utilizzato quando la regionalizzazione di un valore di portata indice è utilizzata per regionalizzare una FDC (Castellarin et al. 2004b; Ganora et al. 2009). Un approccio di questo tipo, necessita, come anticipato in precedenza, di un appropriato modello regionale per la stima dell'indice di deflusso in sezioni non strumentate (ad esempio un modello multi-regressivo). Infatti, una volta stimata la curva di durata normalizzata per un bacino non strumentato, la curva di durata dimensionale può essere ottenuta moltiplicando la curva adimensionale per la stima del MAF nel bacino di interesse, che è una fase critica e delicata dell'intero processo di regionalizzazione; la standardizzazione tramite MAP\* permette sia di ricavare le curve di durata adimensionali da usarsi nella regionalizzazione, che di stimare una curva dimensionale, che è quella che interessa ai fini pratici, semplicemente moltiplicando la curva adimensionale per il MAP e l'area del bacino.

La discriminante fra i due metodi risiede nel fatto che l'incertezza associata alla stima del MAP è, di solito, sensibilmente minore rispetto a quella associata alla stima del MAF in sezioni non strumentate, in virtù della maggiore disponibilità di dati di precipitazione e della maggiore accuratezza delle procedure geostatistiche nell'interpolazione di osservazioni puntuali (Brath et al.2003; Castellarin et al. 2004a).





**Figura 2.5** Curva di durata delle portate per tre bacini della regione Marche a comportamenti idrologici differenti. Nel pannello in alto le aree in rosso rappresentano il  $TND_1$  ricavato dalle curve standardizzate con MAF; il pannello sotto (aree blu) mostra invece i  $TND_2$  ricavati dalle curve standardizzate con il MAP\*. Tratta da Pugliese et al. (2014).

### 2.8.3 Stima delle curve di durata con il TNDTK

Per quanto riguarda il calcolo dei TND derivanti dalla standardizzazione, sia per il MAF che per il MAP\* è necessario tenere conto che la lunghezza dei campioni di osservazioni di portata generalmente varia passando da un bacino strumentato ad un altro. Per tal motivo, prima di applicare la (2.6), è necessario fissare una durata massima  $d_{max}$  da usarsi per calcolare i TND uniformemente per ciascun bacino. Pugliese et al. (2014), fissano il valore di  $d_{max}$  sulla base del bacino caratterizzato dalla lunghezza del campione di osservazioni minima all'interno dell'area analizzata. Per cui, indicando tale lunghezza con  $l_{min}$ , si avrà:

$$d_{max} = \frac{l_{min} \times 365}{l_{min} \times 365 + 1} \quad (2.7)$$

Una volta calcolato il TND relativo alle FDC empiriche, si applica il Top-Kriging e si risolve il sistema (2.2) ricavando una matrice dei pesi che può essere utilizzata per ricavare il valore dei TND in sezioni non strumentate, tramite l'applicazione della (2.3).

Pugliese et al. (2013), propongono, tuttavia, di utilizzare questa stessa matrice dei pesi per l'estrapolazione delle curve di durata adimensionali dei corrispondenti bacini. Per cui si ha:

$$\hat{\Psi}(x_0, d) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \Psi(x_i, d) \quad d \in (0,1) \quad (2.8)$$

dove  $\lambda_i$  sono i pesi del Top-kriging derivanti dall'interpolazione dei TND,  $\Psi(x_i, d)$  indica il valore che la curva di durata assume in corrispondenza del sito  $x_i$ , ovvero è una curva di durata (stagionale o annuale) in cui i quantili di portata sono divisi o per il MAF o per il MAP\*.  $\hat{\Psi}(x_0, d)$  esprime la curva di durata standardizzata stimata per il sito  $x_0$  nell'intero dominio delle durate.

Per ricavare la curva dimensionale è sufficiente moltiplicare la curva adimensionale per la portata di riferimento utilizzata (MAF stimato per la sezione non strumentata o MAP\*).

## ***CAPITOLO 3: AREA DI STUDIO***

Lo studio relativo all'efficienza del modello TNDTK, descritto nel Capitolo 2, nella stima di curve di durata percentili annuali e di lungo periodo su base stagionale tramite la tecnica geostatistica del Top-kriging, oggetto nella presente dissertazione, si è basato su dati idrometrici, geomorfologici e climatici di una vasta area, composta da 182 bacini degli Stati Uniti sud-orientali.

Nello specifico l'area di studio si estende su otto stati i cui dati impiegati sono stati forniti dal USGS (United States Geological Survey).

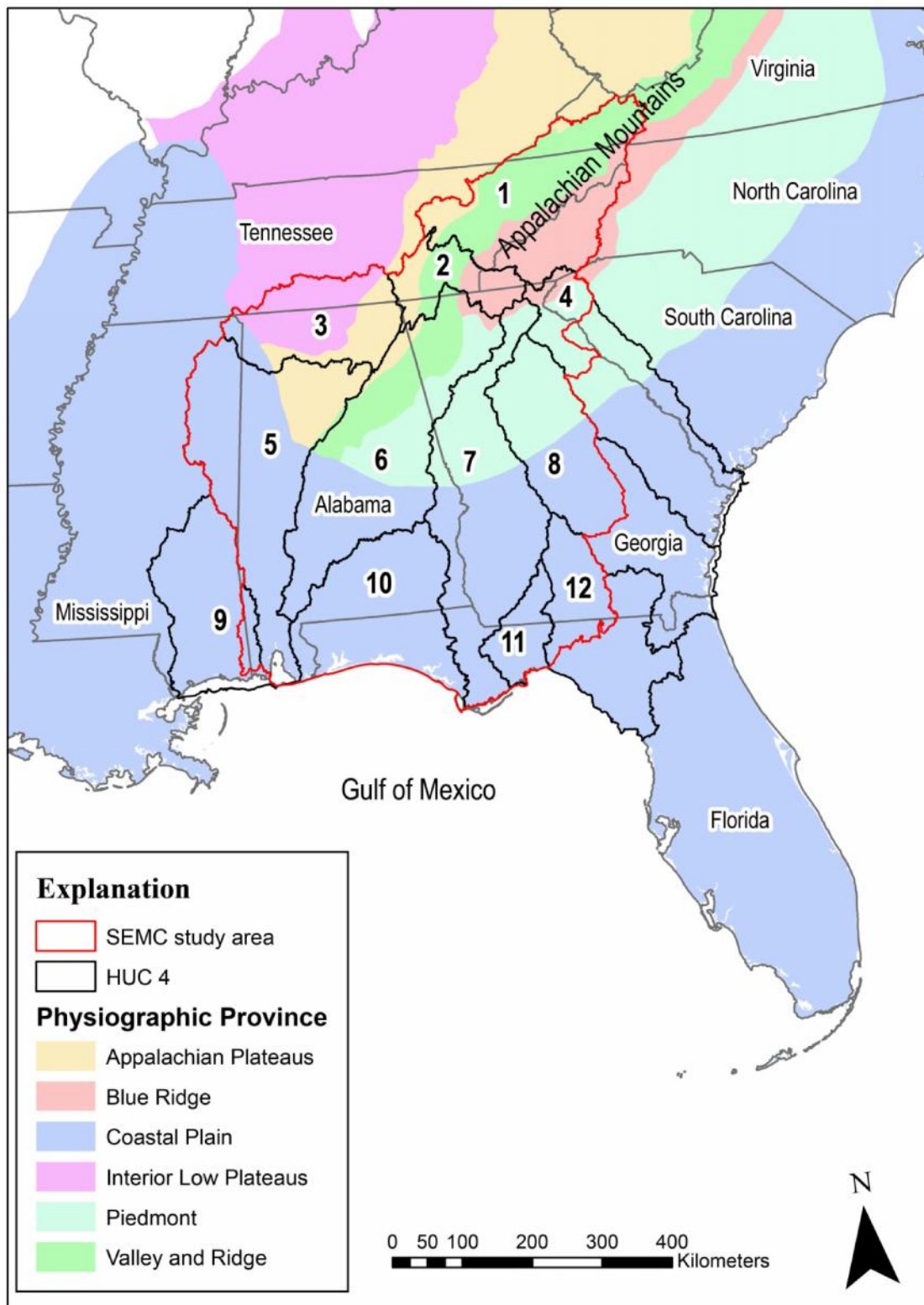
### ***3.1 Inquadramento geomorfologico***

L'area di studio copre, approssimativamente, 355000 km<sup>2</sup> di superficie e include, totalmente o parzialmente, i 12 sottobacini 4-digit Hydrologic Unit Code (HUC-4) in Alabama, Florida, Georgia, Mississippi, North Carolina, South Carolina, Tennessee, and Virginia (Figura 3.1).

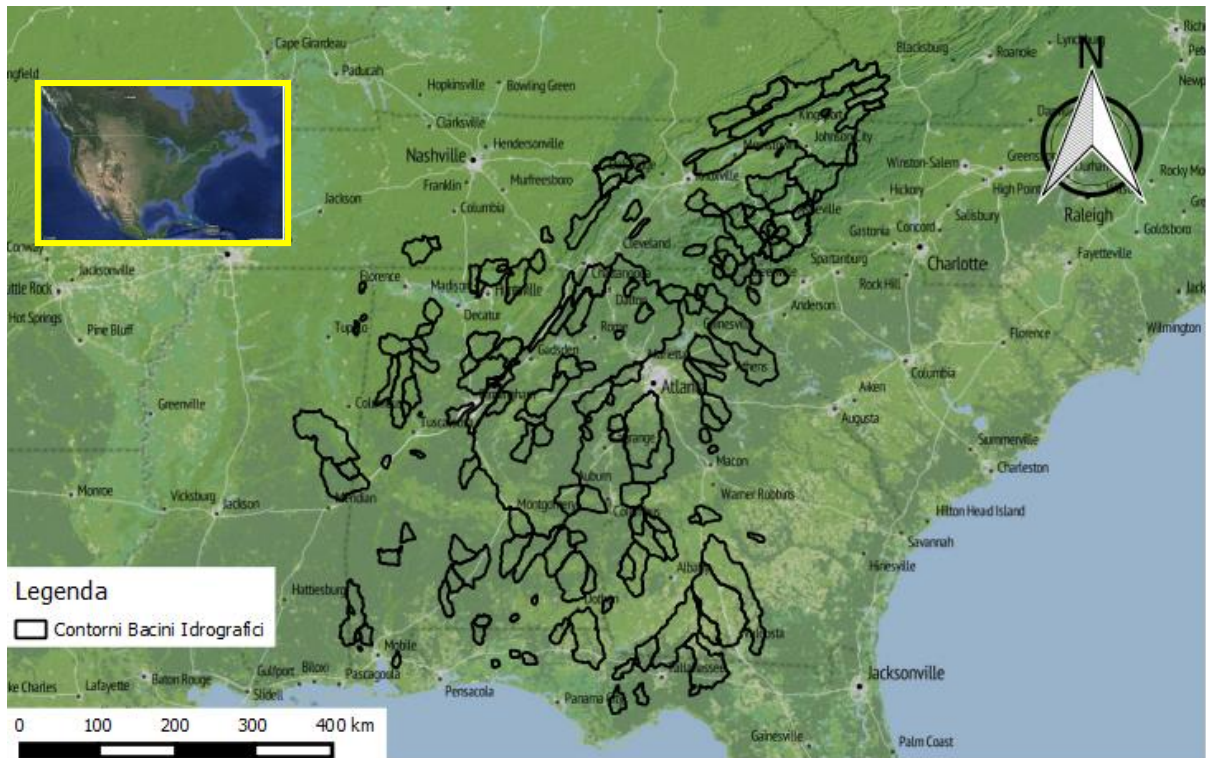
La maggior parte dei bacini dell'area di studio drena nel Golfo del Messico, compresi Alabama-Coosa-Tallapoosa, Apalachicola-Chattahoochee-Flint, Choctawhatchee-Escambia, Mobile-Tombigbee, Ochlockonee, Pascagoula, Suwannee e la parte centrale e settentrionale del bacino del Tennessee River, mentre i bacini dell' Altamaha e del Savannah River drenano nell'Oceano Atlantico



***Figura 3.1: Stati Uniti: Il cerchio rosso evidenzia l'area di studio***



*Figura 3.2: Stati Uniti sud-orientali: è evidenziata in rosso l'area contenente i bacini studiati nella presente dissertazione*



*Figura 3.3: Area di studio: sono riportati i contorni idrografici dei 182 bacini analizzati.*

Un'analisi del 2011 svolta dalla National Land Cover Database (NLCD; Jin et al., 2013) mostra che l'area di studio è costituita dal 49.4% di copertura forestale, 17.6% di terreni ad uso agricolo, 12.1% di boschi/cespugli e pascoli, 9% di terreni urbanizzati, 9% di terreni acquitrinosi, 2,5% di acque libere e 0.4% di terreno non coltivato.

L'area di studio è costituita da sei aree morfologiche: Appalachian Plateaus, Blue Ridge, Coastal Plain, Interior Low Plateaus, Piedmont, e Valley and Ridge. L' Appalachian e Interior Low Plateaus includono strati quasi orizzontali di rocce sedimentarie dell'età Mississippiana e Pennsylvaniana. Il Blue Ridge e Piedmont sono costituite prevalentemente da rocce cristalline appartenenti al Precambriano e Paleozoico. Il Valley and Ridge, come suggerito dal nome, è costituito da una serie di dorsali lineari orientate verso nord-est e di valli caratterizzate da una alternanza di letti di rocce sedimentarie del Paleozoico. Infine, il Coastal Plain è costituita da rocce sedimentarie e sedimenti non consolidati appartenenti al Cenozoico e al Mesozoico.

### **3.2 Dati climatici**

L'area di studio è caratterizzata, generalmente, da un clima caldo e umido con temperatura dell'aria che decresce all'aumentare della latitudine e della quota. La temperatura media annua assume valori compresi tra un massimo di circa 20°C, nella parte meridionale, ed un minimo

di circa 10°C nella parte settentrionale. La precipitazione media annuale cumulata è di 140 centimetri, con oscillazioni che variano da un minimo di 110 centimetri nella parte nordorientale del bacino del Tennessee River e un massimo di 180 centimetri all'intersezione tra Georgia, North Carolina, e South Carolina.

Generalmente i valori massimi di precipitazione sono registrati nella parte meridionale dell'area di studio vicino al Golfo del Messico e nella parte più a sud degli Appalachi, quelli minimi nella Georgia centrale e nella parte nordorientale dell'area di studio e quelli prossimi alla media nella parte occidentale.

Si riportano, di seguito, in Tabella 3.1, i valori medi, massimi, minimi, mediani, 25° e 75° percentili relativi alle principali variabili geomorfologiche e climatiche dei bacini appartenenti alla regione in esame:

<b>Statistiche</b>	<b>A [Km<sup>2</sup>]</b>	<b>PPT [cm]</b>	<b>T [°C]</b>	<b>ETP [cm]</b>
<b>Media</b>	979,91	147,33	15,35	846,12
<b>Valore minimo</b>	10,32	114,62	9,51	576,52
<b>Valore massimo</b>	39126,15	207,21	19,6	1042,33
<b>Mediana</b>	421,49	146,21	15,68	862,17
<b>25° Percentile</b>	152,38	135,83	13,1	753,53
<b>75° Percentile</b>	886,66	154,68	17,81	954,69

*Tabella 3.1: Statistiche relative alle principali caratteristiche dei bacini in esame: A=Area, PPT=Precipitazione, T=Temperatura, ETP=Evapotraspirazione potenziale.*

# ***CAPITOLO 4: METODO TNDTK PER LA STIMA DELLE CURVE DI DURATA PERCENTILI ANNUALI E STAGIONALI***

## ***4.1 Struttura dell'indagine***

Il presente lavoro di tesi ha valutato l'efficienza del metodo del TNDTK (cfr. Cap. 2) per la stima delle curve di durata percentili annuali e stagionali, espresse sia in termini dimensionali che adimensionali (ad esempio divise per la media annuale dei deflussi), associate ai 182 bacini trattati nel Capitolo 3, dedicato all'area di studio.

La struttura dell'indagine svolta può essere riassunta in quattro fasi principali:

- Calcolo dei TND a base annuale e stagionale che, come visto nel Capitolo 2, rappresentano indici che riassumono ottimamente l'intera curva di durata
- modellazione della struttura di correlazione spaziale, o della variabilità spaziale, di questo indice su tutta la regione attraverso il Top-kriging;
- utilizzo dello stesso modello di correlazione spaziale per stimare le curve di durata percentili e stagionali, pesando le FDC delle stazioni vicine tramite i pesi relativi ai TND propri delle percentili e delle stagionali e tramite i pesi dei TND delle curve di lungo periodo degli stessi bacini;
- confronto fra le due procedure di ricostruzione descritte nel punto precedente.

Come descritto nel Capitolo 2, vengono utilizzate, per il calcolo dei TND, sia una procedura di standardizzazione per il MAF (media di lungo periodo) che per il MAP\* (Prodotto tra area del bacino e precipitazione media annua).

## ***4.2 Analisi preliminari***

Il calcolo del TND ha necessitato, inizialmente, della ricostruzione delle curve di durata a partire dal database, riportante i dati di portata relativi ai bacini in esame, fornito dallo United States Geological Survey (USGS). Attraverso un programma di calcolo realizzato tramite il

software **R**, si è costruita una tabella indicante l'arco temporale in cui sono stati registrati i deflussi, espressi in  $\text{ft}^3/\text{s}$ , per ognuno dei 182 bacini appartenenti all'area di studio, e quindi la data di inizio e di fine delle osservazioni comprese fra l' 1 ottobre 1897 e il 30 settembre 2010 per un totale di 112 anni idrologici. Oltre alle suddette informazioni, la stessa tabella riporta le date iniziali e finali di eventuali periodi di interruzione delle misurazioni dei deflussi e il numero di giorni caratterizzante ognuno di essi.

Dalle informazioni ricavate dalla tabella precedentemente descritta, si è costruito un database riportante esclusivamente gli anni completi, per ciascun bacino, in termini di dati di portata (v. Appendice A). A tale scopo, non sono stati considerati gli anni che presentavano un numero di dati di portata mancanti (indicati col codice -9999) superiore a 14 o superiori a 5 se consecutivi.

Per costruire le curve di durata stagionale sono stati estrapolati, dal suddetto database, due gruppi di dati rappresentanti due diverse stagioni: la stagione autunnale - invernale comprendente i mesi che vanno da ottobre a marzo; la stagione primaverile - estiva comprendente i mesi che vanno da aprile a settembre (v. Appendice C).

Per la costruzione delle curve percentili sono stati eseguiti i seguenti step:

- utilizzo di un programma di calcolo sviluppato su **R** per dividere gli anni di osservazione di ciascun bacino (v. Appendice C);
- utilizzo della funzione `quantile` di **R** per calcolare i percentili  $p=0.1$ ,  $p=0.5$ ,  $p=0.9$  relativi a ciascun giorno dei vari anni di osservazione ottenendo, per ciascun bacino, un campione di 365 dati non realmente misurati, ma ipotetici. Infatti  $p=0.1$  si riferisce ad un anno ipotetico particolarmente secco;  $p=0.5$  si riferisce ad un anno tipico;  $p=0.9$  si riferisce ad un anno ipotetico particolarmente umido (v. Appendice C).

### ***4.3 Calcolo dei TND a base annuale e stagionale***

La procedura di standardizzazione tramite MAF e MAP\* è stata effettuata sia nel caso delle curve percentili annuali che nel caso delle curve stagionali. Nel caso delle curve stagionali, come precisato nel Capitolo 2, nel calcolo del TND è stato necessario tenere conto della diversa lunghezza dei vari campioni di osservazione e, al fine di uniformare il calcolo, si è fissata, come suggerito da Pugliese et al. (2013), una lunghezza di riferimento  $d_{max}$  relativa ai



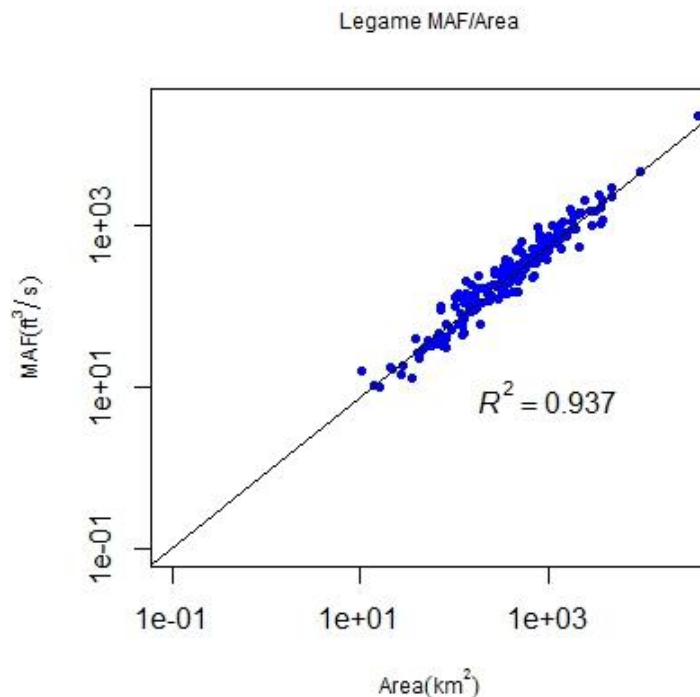
campioni caratterizzati dal numero minimo di dati, ovvero 8 anni: Big Creek at County Rd 63 chiuso vicino Wilmer (Alabama), French Broad River chiuso a Rosman (North Carolina) e Swannanoa River chiuso a Biltmore (North Carolina). Dunque, nel caso in esame si è ottenuto:

$$d_{\max} = \frac{8 \times 365}{8 \times 365 + 1} = 0.99966 \quad (4.1)$$

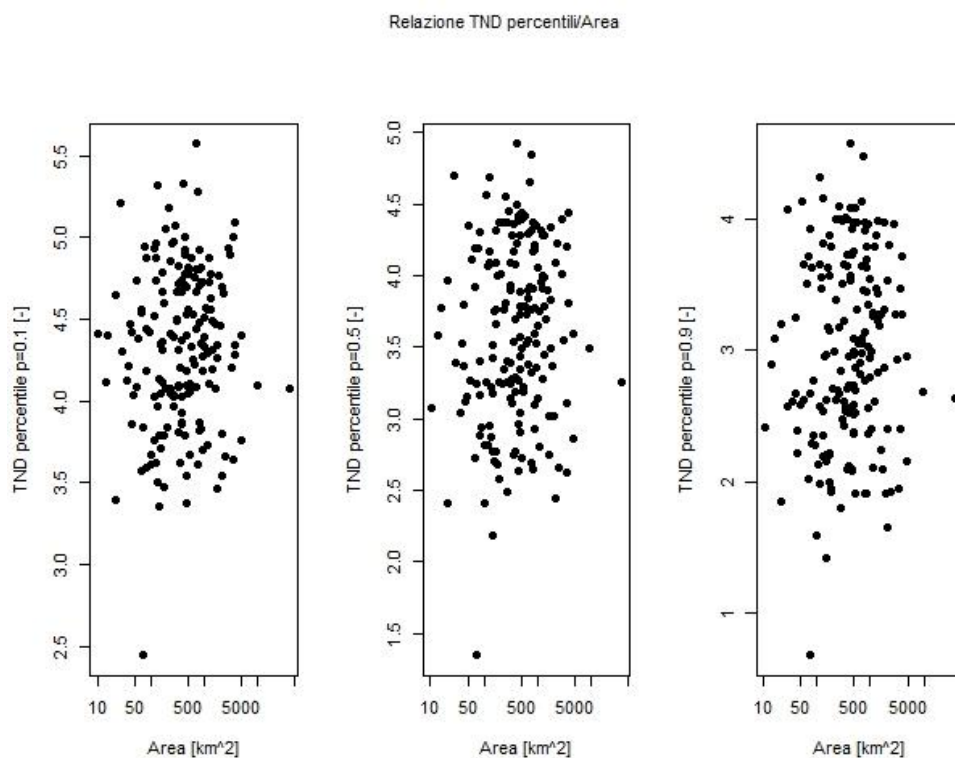
Per il calcolo dei TND percentili annuali si applica lo stesso procedimento sopra schematizzato (ma in questo caso i campioni tutti lunghezza pari a 365, per cui il  $d_{\max}$  calcolato con la (2.7) restituisce un valore pari a 0.99727 (v. Appendice C).

#### 4.3.1 Standardizzazione per MAF

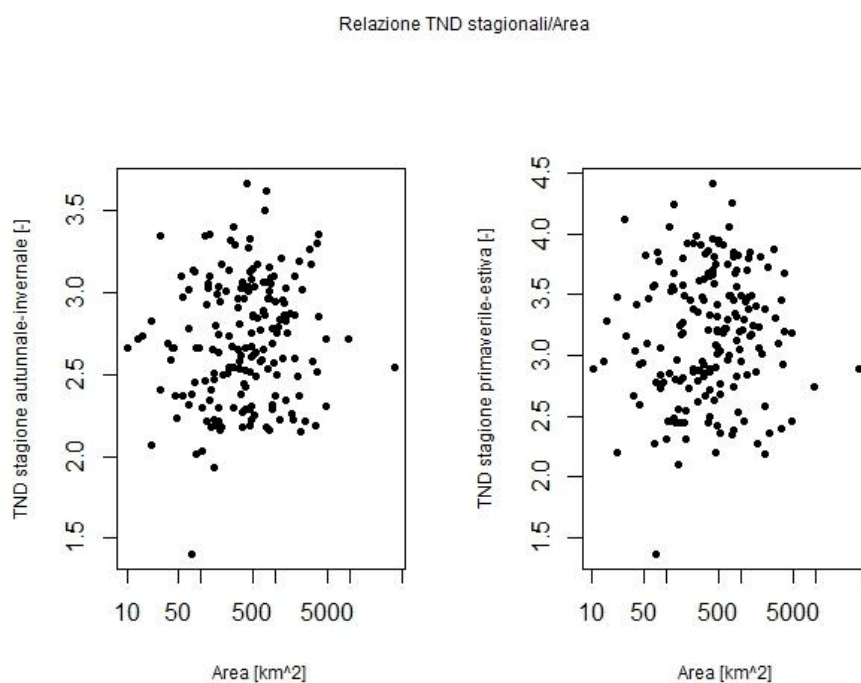
Come riportato nel Capitolo 1, l'utilizzo di curve di durata standardizzate ha il vantaggio fondamentale di poter mettere a confronto bacini molto diversi tra loro. Nel caso in esame, avendo a che fare con bacini molto eterogenei in termini di estensione, è necessario, per la calibrazione del modello, che il TND non presenti una dipendenza dall'area e che, quindi, la standardizzazione per il MAF rimuova tale dipendenza.



**Figura 4.1:** Legame, in scala bilogaritmica, tra la media di lungo periodo delle portate (MAF) per ciascun bacino dell'area di studio e la corrispondente area. Viene riportato, inoltre, il valore del quadrato del coefficiente di correlazione lineare ( $R^2$ ). La linea in nero rappresenta la bisettrice del primo quadrante.



**Figura 4.2:** Relazione fra i TND calcolati a partire dalle curve percentili annuali, relativi a ciascun bacino, e l'area dei bacini stessi. Rispettivamente, dal pannello di sinistra a quello di destra, si hanno i TND per  $p=0.1$ , per  $p=0.5$  e per  $p=0.9$ .

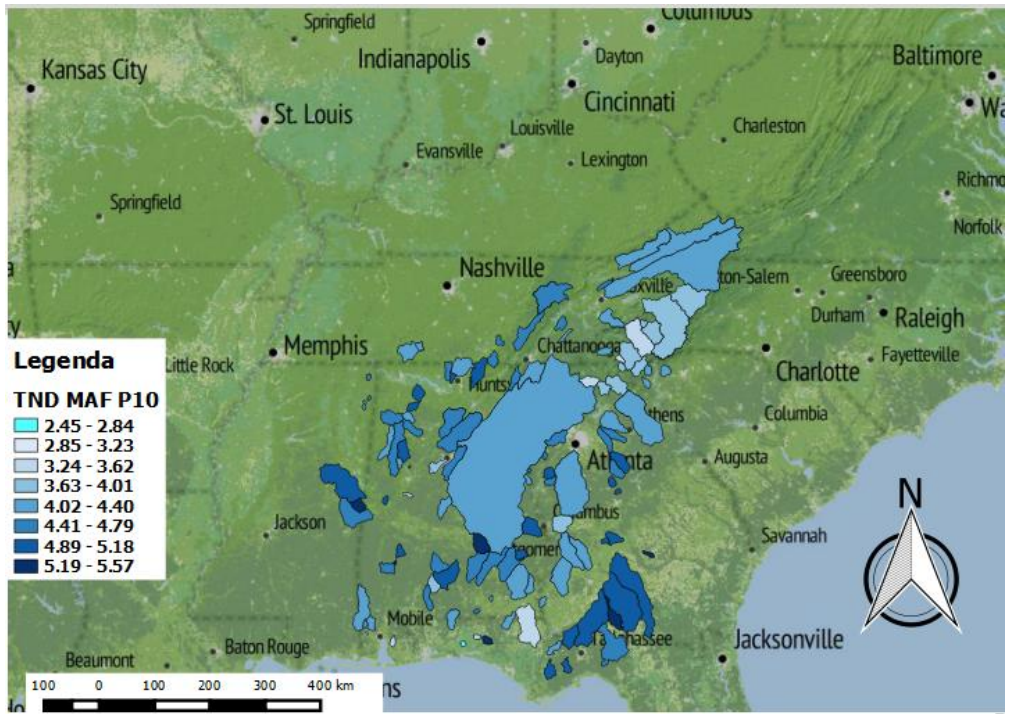


**Figura 4.3:** Relazione fra i TND calcolati a partire dalle curve di lungo periodo a base stagionale, relativi a ciascun bacino, e l'area dei bacini stessi. Nel pannello di sinistra sono riportati gli andamenti del TND relativi alla stagione autunnale-invernale, mentre in quello di destra i TND relativi alla stagione primaverile-estiva.

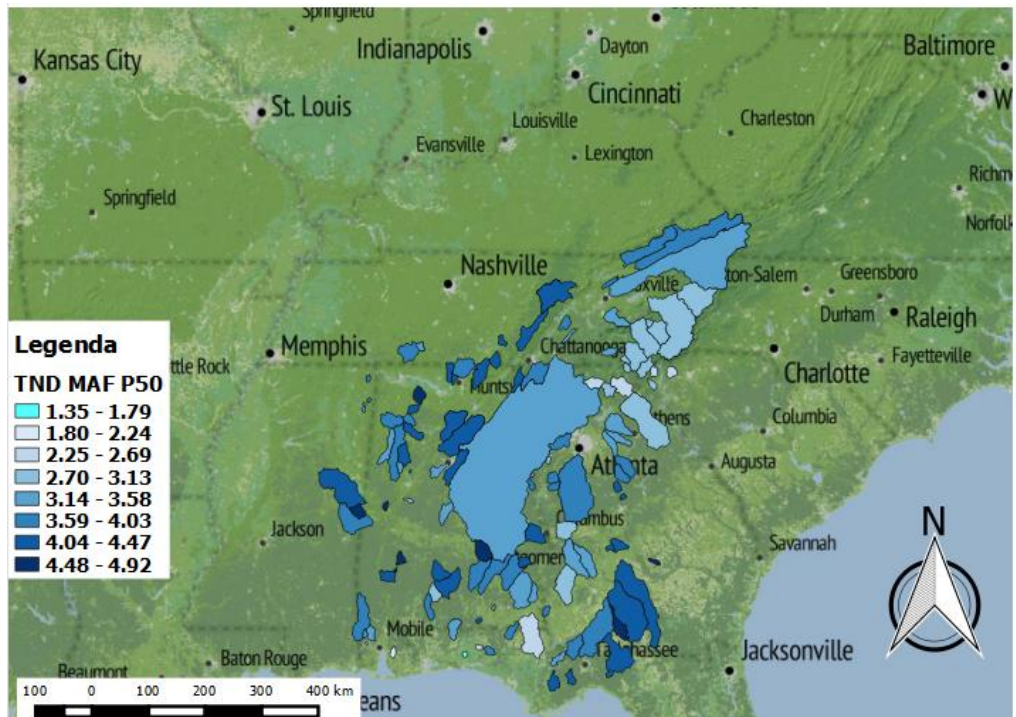
La Figura 4.1 mostra la netta linearità del legame fra il MAF e l'area per cui, la standardizzazione per tale valore medio di lungo periodo, comporta una perdita di dipendenza dei valori di portata, presenti nelle varie curve di durata di ogni bacino, dalla area dei bacini stessi. Ciò è, infatti, confermato dalle Figure 4.2 e 4.3 in cui viene messa in luce la relazione fra i TND, calcolati a seguito della standardizzazione per il MAF, e l'area del bacino. Si vede, chiaramente, come non sia più presente alcuna dipendenza dall'area e dunque, i valori di TND, non sono influenzati dall'estensione del bacino.

Il confronto tra le figure 4.2 e 4.3 mette inoltre in evidenza come, per i bacini in esame, le condizioni più di secca dei corsi d'acqua, ben sintetizzati dalle curve relative alla stagione primaverile-estiva e dalla curva annuale percentile  $p=0.1$ , presentino valori di TND tendenzialmente maggiori rispetto alle condizioni più umide rappresentate, invece, dalle curve relative alla stagione autunnale-invernale e dalla curva annuale percentile  $p=0.9$ . Come detto nel Capitolo 2, bacini caratterizzati da una risposta idrologica più rapida presentino TND più elevati; è possibile, quindi, che la risposta idrologica dei bacini sia più veloce durante i periodi di secca e, quindi, in particolar modo durante la stagione estiva. È inoltre interessante notare come l'interpretazione fisica di anno tipico della curva percentile mediana ( $p=0.5$ ) sia mantenuta anche nell'ambito dei TND; si vede, infatti, in Figura 4.2, come i valori di TND relativi alla percentile mediana siano pressappoco valori medi dei TND relativi alla percentile  $p=0.1$  e alla percentile  $p=0.9$ .

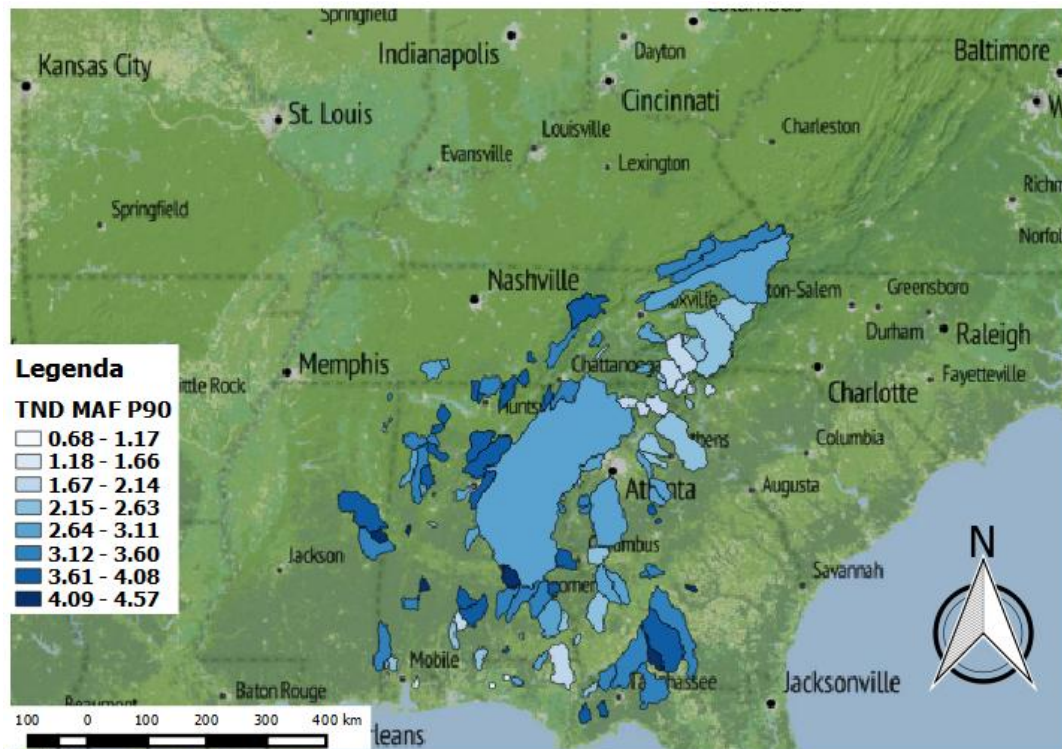
Alle pagine seguenti riportiamo l'andamento dei TND percentili e stagionali nell'area di studio in esame:



*Figura 4.4: Distribuzione dei valori di TND calcolati a partire dalle curve annuali con percentile 0.1 (P10) relativi alle curve di durata associate ai bacini dell'area di studio. La legenda mostra le classi di valori associando ad ognuno di essi un colore in una scala di blu.*



*Figura 4.5: Distribuzione dei valori di TND calcolati a partire dalle curve annuali con percentile 0.5 (P50) relativi alle curve di durata associate ai bacini dell'area di studio. La legenda mostra le classi di valori associando ad ognuno di essi un colore in una scala di blu.*

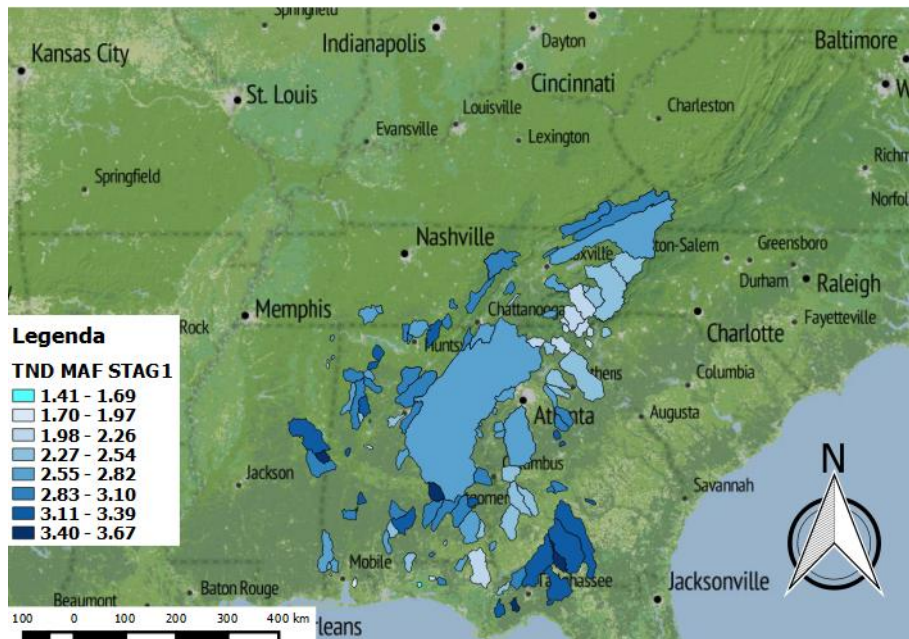


**Figura 4.6:** Distribuzione dei valori di TND calcolati a partire dalle curve annuali con percentile 0.9 (P90) relativi alle curve di durata associate ai bacini dell'area di studio. La legenda mostra le classi di valori associando ad ognuno di essi un colore in una scala di blu.

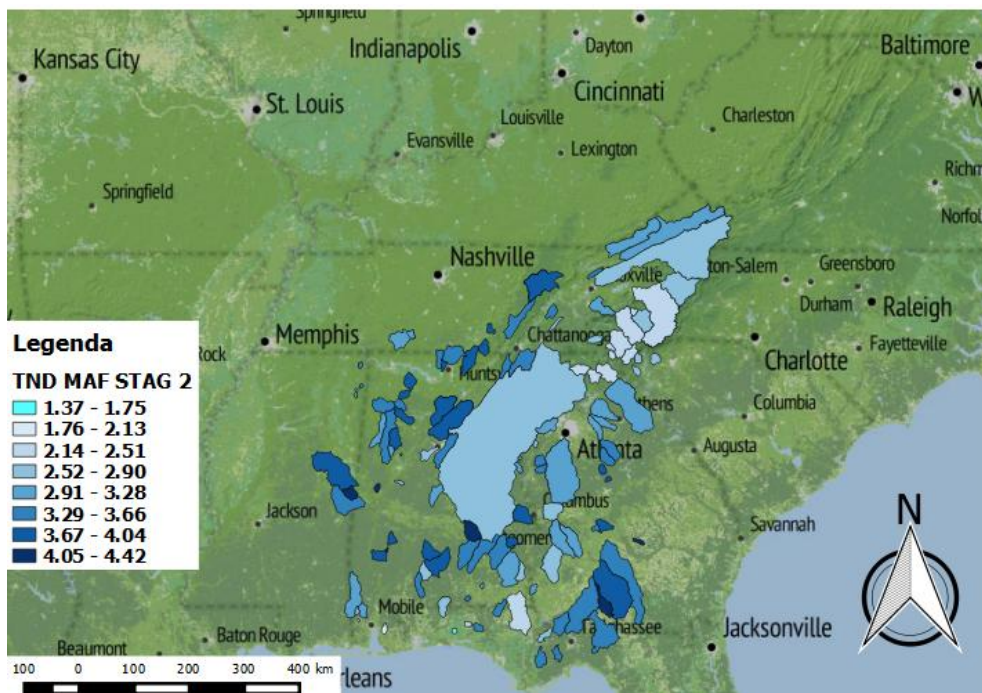
Le mappe in Figura 4.4, 4.5 e 4.6 mostrano un andamento piuttosto eterogeneo dei TND percentili a testimonianza delle elevate variabilità climatica e geomorfologica dei bacini dell'area in esame.

Le mappe in Figura 4.7 e 4.8 mostrano, invece, l'andamento dei TND relativi alle curve stagionali. Anche qui si notano un'elevata eterogeneità dei valori di tale indice di riferimento ed è evidente in questo caso, così come nel caso delle curve percentili, come il bacino dell'Alabama River, il più esteso dell'area, presenti valori di TND collocabili nella parte medio bassa dei rispettivi range di variazione.

In tutte e 5 le mappe si vede come i valori di TND più elevati sono quelli relativi alle curve dei bacini nella parte più a sud-est dell'area, in prossimità della Florida.



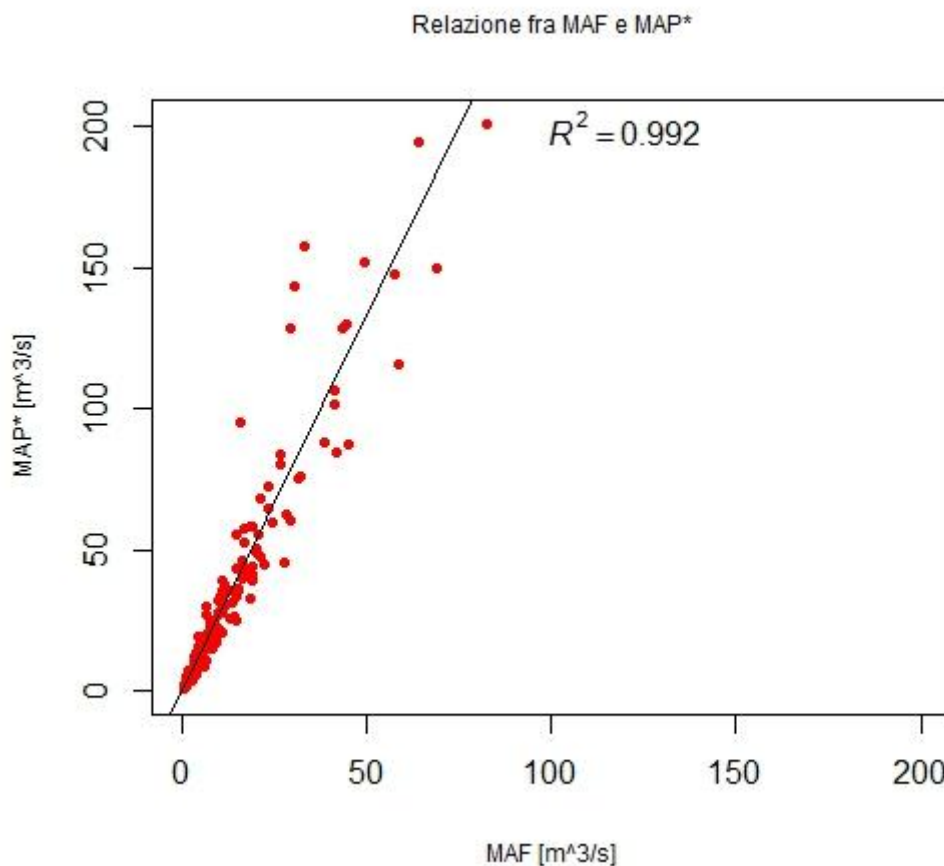
*Figura 4.7: Distribuzione dei valori di TND calcolati a partire dalle curve di durata relative alla stagione autunnale-invernale (Stag1) associate ai bacini dell'area di studio. La legenda mostra le classi di valori associando ad ognuno di essi un colore in una scala di blu.*



*Figura 4.8: Distribuzione dei valori di TND calcolati a partire dalle curve di durata relative alla stagione primaverile-estiva (Stag2) associate ai bacini dell'area di studio. La legenda mostra le classi di valori associando ad ognuno di essi un colore in una scala di blu.*

#### 4.3.2 Standardizzazione per MAP\*

L'entità delle precipitazioni che sollecitano i bacini è strettamente legata all'entità delle portate che defluiscono nei corsi d'acqua. È dunque lecito attendersi una correlazione abbastanza spinta tra il MAF e il MAP\*.



**Figura 4.9:** Correlazione fra il MAF e il MAP\* relativi ai bacini dell'area in esame. È riportato il quadrato del coefficiente di correlazione lineare ( $R^2$ ). La linea nera rappresenta la retta di regressione tra MAF e MAP\*.

La Figura 4.9 mostra un'evidente relazione di proporzionalità tra MAF e MAP\* dato che la maggior parte dei valori si dispongono lungo la retta di regressione. Tuttavia si può vedere come il MAP\* si mantenga circa due volte maggiore rispetto al MAF; questo può essere un indicatore del fatto che i bacini, appartenenti all'area di studio in esame, non presentino una risposta idrologica particolarmente rapida. Infine, si vede come si tenda a perdere la relazione di linearità, tra i due indici di deflusso di riferimento, all'aumentare della area del bacino. Ciò lo si evince dal fatto che, come visto in Figura 4.1, il MAF è strettamente dipendente dall'area

dei bacini e quindi un aumento di MAF presuppone un aumento della superficie del bacino stesso.

Il calcolo dei TND, in questo caso, ha presupposto la trasformazione della precipitazione media annuale, relativa a ciascun bacino in esame, in una portata espressa in m<sup>3</sup>/s. A tale scopo, è stata utilizzata la seguente relazione:

$$MAP^* = MAP \cdot A \cdot CF \quad (4.2)$$

dove  $A$  rappresenta l'area del bacino e  $CF$  è un fattore di conversione che permette di ottenere un valore di  $MAP^*$  espresso in m<sup>3</sup>/s. Nel nostro caso, essendo l'area espressa in m<sup>2</sup> e il  $MAP$  espresso in cm all'anno, si è ricavato:

$$FC = \frac{10^{-2}}{365 \times 24 \times 60 \times 60} = 3.171 \times 10^{-10} \quad (4.3)$$

Tale metodo di standardizzazione, anche se non prende in considerazione le osservazioni di portata, è comunque efficace sia per la relazione di linearità col MAF vista in Figura 4.4 che per la stretta dipendenza del  $MAP^*$  dall'area che permette, quindi, di rimuovere la dipendenza delle curve adimensionali e dei TND dall'estensione dei bacini.

#### **4.4 Leave-One-Out-Cross-Validation (LOOCV)**

Per poter valutare l'efficienza e l'affidabilità del modello TNDTK, è necessario applicarlo allo scopo di stimare i TND in sezioni nelle quali è possibile effettuare un confronto con corrispondenti quantità empiriche.

A tale scopo, sia per la stima dei TND percentili annuali che per quella dei TND stagionali, è stata utilizzata la procedura di cross-validazione *leave-one-out*, nota anche come procedura *jack-knife*, conosciuta con l'acronimo di LOOCV. Questa metodologia di validazione dei modelli consente di valutare l'accuratezza della stima simulando le condizioni non strumentate in ciascuno dei bacini della regione in esame. La procedura LOOCV si articola in 5 fasi (Pugliese et al. 2013):

- i variogrammi sperimentali e teorici sono calcolati usando il campione completo di TND;
- una delle stazioni strumentate, appartenente all'area di studio, chiamata  $s_i$ , viene rimossa dal gruppo delle 182 stazioni a disposizione;
- si applica il Top-kriging per la stima dei TND utilizzando le 181 stazioni rimaste;



- vengono stimati i valori del TND relativo alla stazione  $s_i$  utilizzando un vicinaggio, cioè un numero di stazioni vicine, pari a 5, 10, 20 e 50;
- Le fasi dalla 2 alla 4 sono ripetute 181 volte.

La tecnica LOOCV è stata, in questo lavoro, applicata al modello TNDTK, ma risulta idonea per qualunque metodo regionale che si propone di simulare condizioni non strumentate.

#### ***4.5 Efficienza di Nash & Sutcliffe***

Le procedure di calibrazione automatica dei modelli idrologici necessitano, sempre, l'individuazione di un criterio per la valutazione, automatica e quantitativa, della bontà delle simulazioni. A tale scopo vengono molto spesso utilizzate delle funzioni obiettivo che mettono in relazione, secondo metodologie più o meno differenti, le quantità osservate (nel nostro caso le curve di durata) con quelle stimate in sezioni non strumentate. Ad esse appartengono l'errore relativo medio e la sommatoria dei quadrati degli scarti che sono, generalmente, quelle più utilizzate.

Nell'ambito della modellistica idrologica è, però, molto usata un'altra funzione obiettivo che è quella che è stata presa a riferimento in questo lavoro per la valutazione dell'accuratezza dell'indagine. Tale funzione è chiamata Efficienza di Nash & Sutcliffe (NSE) (Nash e Sutcliffe 1970) definita dalla:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [x(t) - \hat{x}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [x(t) - \bar{x}]^2} \quad (4.4)$$

dove  $\bar{x}$  indica il valore medio dei dati osservati,  $x(t)$  è il valore osservato,  $\hat{x}(t)$  è il valore stimato e la quantità  $x(t) - \hat{x}(t)$  è chiamata scarto delle osservazioni. Essa è una funzione obiettivo illimitata inferiormente, ma che al massimo può valere 1 e se vale 1 il modello è perfetto. Da ciò si evince che per ottenere dei parametri ottimizzati, in tal caso, è necessario massimizzare tale funzione. Generalmente si dice che un modello è affidabile se  $NSE > 0.6$ . Esiste una corrispondenza biunivoca tra NSE e lo scarto quadratico medio (SSQ); infatti essi esprimono la stessa cosa con l'unica differenza che il valore di NSE, rispetto a quello di SSQ, è normalizzato tramite la varianza delle osservazioni (presente al denominatore).

Presentando al numeratore la somma degli scarti al quadrato, l'NSE tende ad enfatizzare errori grandi e, per tal motivo, si adatta bene a differenze tra portate di piena. Tuttavia è molto più difficile che un modello presenti una buona affidabilità per quel che riguarda le portate di magra e, a tale scopo, si è pensato di effettuare una trasformazione logaritmica dell'NSE ottenendo una nuova funzione obiettivo nota come LNSE, la quale enfatizza maggiormente gli errori piccoli:

$$LNSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [\log(x(t)) - \log(\hat{x}(t))]^2}{\sum_{t=1}^n \log[x(t) - \bar{x}]^2} \quad (4.5)$$

#### ***4.6 Interpolazione geostatistica dei TND e delle curve annuali e stagionali***

I valori empirici di TND (ovvero TND<sub>1</sub> ottenuto a seguito della standardizzazione delle portate per il MAF e TND<sub>2</sub> ottenuto a seguito della standardizzazione delle portate per il MAP\*), calcolati per ogni curva di durata associata ad ogni bacino, sono stati interpolati attraverso il Top-kriging, seguendo le indicazioni descritte da Skøien (2013), attraverso l'utilizzo di un insieme di funzioni di  $\mathbf{R}$  inclusi nel pacchetto `rtop`. Sia nel caso del TND<sub>1</sub> che in quello del TND<sub>2</sub>, e sia nel caso di valori ricavati da curve stagionali o da curve percentili annuali, l'applicazione del Top-kriging ha richiesto le medesime operazioni.

Il variogramma sperimentale, per ogni standardizzazione, è stato calcolato con la tecnica del "binned variogram" per la quale i punti campionati sono raggruppati in classi di distanze (bins) sotto l'ipotesi di isotropia, cioè sotto l'ipotesi che il variogramma non vari con la direzione. Il variogramma sperimentale è stato poi modellato con funzioni teoriche di diverso tipo:

- Modello esponenziale (Exp)
- Modello esponenziale moltiplicato per un modello frattale (Ex1) (Skøien et al. 2006)
- Modello gaussiano (Gau)
- Modello gaussiano moltiplicato per un modello frattale (Ga1)
- Modello sferico (Sph)
- Modello sferico moltiplicato per un modello frattale (Sp1)

Nel caso delle curve di lungo periodo e a base stagionale, per i 182 bacini appartenenti all'area di studio e per ognuno dei modelli teorici di variogramma, sono stati stimati i TND in cross-validazione (ovvero tramite la LOOCV) in modo da valutare il variogramma teorico che permetteva un'efficienza di stima (valutata in termini di NSE) maggiore.

risultati, per il TND1 e TND2, sono riportati nelle tabelle 4.1 e 4.2:

<i>Vic. 5</i>	<b>POR</b>	<b>STAG 1</b>	<b>STAG 2</b>	<i>Vic. 10</i>	<b>POR</b>	<b>STAG 1</b>	<b>STAG 2</b>
<b>EXP</b>	0.55	0.54	0.47	<b>EXP</b>	0.53	0.51	0.46
<b>EX1</b>	0.55	0.58	0.55	<b>EX1</b>	0.53	0.54	0.54
<b>GAU</b>	0.55	0.57	0.47	<b>GAU</b>	0.50	0.50	0.47
<b>GA1</b>	0.55	0.57	0.47	<b>GA1</b>	0.48	0.50	0.46
<b>SPH</b>	0.55	0.57	0.47	<b>SPH</b>	0.55	0.56	0.49
<b>SP1</b>	0.55	0.05	0.47	<b>SP1</b>	0.55	0.09	0.49

<i>Vic. 20</i>	<b>POR</b>	<b>STAG 1</b>	<b>STAG 2</b>	<i>Vic. 50</i>	<b>POR</b>	<b>STAG 1</b>	<b>STAG 2</b>
<b>EXP</b>	0.48	0.43	0.42	<b>EXP</b>	0.34	0.28	0.30
<b>EX1</b>	0.48	0.47	0.50	<b>EX1</b>	0.34	0.31	0.37
<b>GAU</b>	0.39	0.35	0.35	<b>GAU</b>	0.24	0.20	0.23
<b>GA1</b>	0.38	0.35	0.35	<b>GA1</b>	0.24	0.20	0.24
<b>SPH</b>	0.47	0.45	0.42	<b>SPH</b>	-0.21	0.28	0.30
<b>SP1</b>	0.47	0.02	0.42	<b>SP1</b>	0.32	-0.10	0.30

**Tabella 4.1:** Valori di NSE derivanti dalla stima in cross-validazione dei TND relativi alle curve di lungo periodo e stagionali standardizzate per il *MAF*. I 4 pannelli in cui la tabella è suddivisa mostrano l'andamento degli NSE per valori di vicinaggio pari a 5, 10, 20 e 50.

<i>Vic. 5</i>	<b>POR</b>	<b>STAG 1</b>	<b>STAG 2</b>	<i>Vic. 10</i>	<b>POR</b>	<b>STAG 1</b>	<b>STAG 2</b>
<b>EXP</b>	0.63	0.58	0.66	<b>EXP</b>	0.62	0.57	0.63
<b>EX1</b>	0.63	0.59	0.67	<b>EX1</b>	0.61	0.59	0.65
<b>GAU</b>	0.60	0.56	0.62	<b>GAU</b>	0.58	0.55	0.60
<b>GA1</b>	0.60	0.57	0.63	<b>GA1</b>	0.59	0.54	0.60
<b>SPH</b>	0.63	0.59	0.66	<b>SPH</b>	0.63	0.58	0.65
<b>SP1</b>	0.63	0.59	0.08	<b>SP1</b>	0.63	0.58	0.11

<i>Vic. 20</i>	<b>POR</b>	<b>STAG 1</b>	<b>STAG 2</b>	<i>Vic. 50</i>	<b>POR</b>	<b>STAG 1</b>	<b>STAG 2</b>
<b>EXP</b>	0.57	0.53	0.60	<b>EXP</b>	0.39	0.38	0.41
<b>EX1</b>	0.57	0.54	0.60	<b>EX1</b>	0.43	0.41	0.45
<b>GAU</b>	0.52	0.48	0.53	<b>GAU</b>	0.33	0.30	0.33
<b>GA1</b>	0.52	0.49	0.56	<b>GA1</b>	0.33	0.31	0.41
<b>SPH</b>	0.57	0.53	0.60	<b>SPH</b>	0.39	0.36	0.40
<b>SP1</b>	0.57	0.53	0.03	<b>SP1</b>	0.39	0.36	-0.38

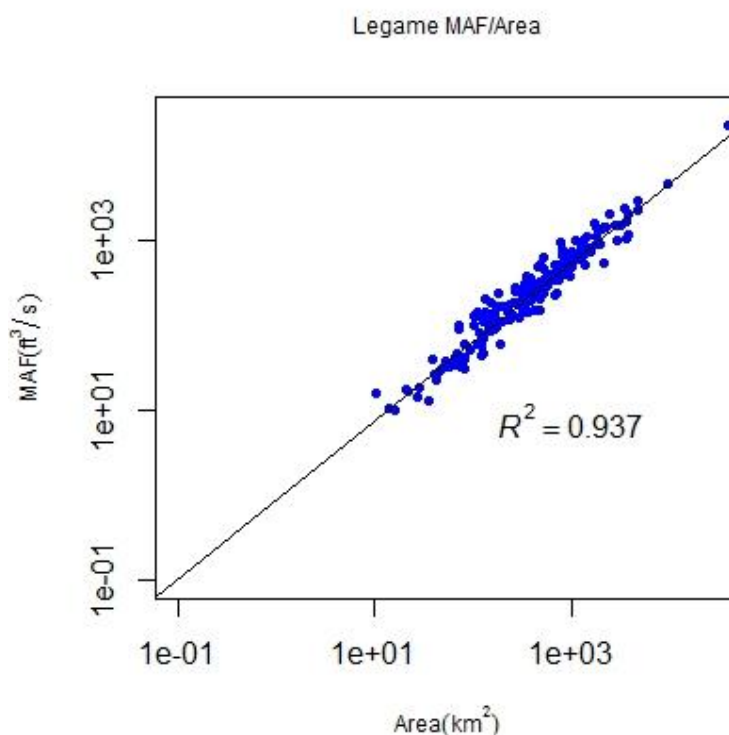
**Tabella 4.2:** Valori di NSE derivanti dalla stima in cross-validazione dei TND relativi alle curve di lungo periodo e stagionali standardizzate per il  $\underline{MAP}^*$ . I 4 pannelli in cui la tabella è suddivisa mostrano l'andamento degli NSE per valori di vicinaggio pari a 5, 10, 20 e 50.

Le tabelle 4.1 e 4.2 mostrano come, sia nel caso della standardizzazione effettuata con MAF che in quella effettuata col  $\underline{MAP}^*$ , si ottengono risultati migliori, in termini di NSE, con i modelli esponenziale, esponenziale/frattale e sferico, nonostante non si raggiungano mai valori di NSE di 0.7. Considerata la differenza solo alla seconda cifra decimale, risulta essere indifferente la scelta fra questi tre modelli teorici dal quale estrapolare la matrice dei pesi da utilizzarsi nella ricostruzione delle curve. Nel caso di studio in esame nella presente dissertazione, si è scelto di modellare il variogramma sperimentale con il modello esponenziale/frattale (Ex1) proposto da Skøien et al. (2006) in quanto, seppur di poco, fornisce le migliori prestazioni. Infine, essendo le curve percentili ricostruite a partire dalle curve di lungo periodo, si è adottato lo stesso modello teorico per la modellazione del variogramma sperimentale.

Terminata la stima in cross-validazione del TND col Top-kriging, si è ricavata la matrice dei pesi, una per ogni valore di vicinaggio, a partire dalla quali sono state ricostruite le curve adimensionali applicando la (2.8).

Per le curve di durata stagionale, a causa della diversa lunghezza dei campioni delle osservazioni relativi ad ogni bacino, si è resa necessaria una procedura di ricampionamento per rendere possibile il prodotto matriciale fra la matrice delle curve di durata empiriche e la matrice dei pesi, derivata dall'interpolazione spaziale dei TND tramite il Top-kriging. Shu e Ouara (2012) ritengono sufficiente alla rappresentazione di una curva di durata 15-20 punti. Per tal motivo, si è scelto un ricampionamento a 20 punti per garantire la stessa lunghezza ad ognuno dei 182 campioni di osservazioni corrispondenti ai bacini in esame (v. Appendice C). Il problema del ricampionamento non si presenta, ovviamente, nel caso delle curve percentili annuali poiché, per ognuno dei bacini, si ha, in tal caso, una lunghezza pari a 365 dei campioni delle osservazioni.

Per la ricostruzione delle curve dimensionali stagionali e annuali, a partire da quelle standardizzate per il MAF, è necessario stimare il valore di tale indice simulando, anche in questo caso, condizioni non strumentate tramite la cross-validazione. Anche per la stima del MAF si è adottata la tecnica del Top-kriging. Riprendiamo la Figura 4.1 che mostra il legame tra MAF ed area dei bacini in esame:



**Figura 4.1:** Legame, in scala bilogarithmica, tra la media di lungo periodo delle portate (MAF) per ciascun bacino dell'area di studio e la corrispondente area. Viene riportato, inoltre, il valore del quadrato del coefficiente di correlazione lineare ( $R^2$ ). La linea in nero rappresenta la bisettrice del primo-terzo quadrante.

Come per l'applicazione del Top-kriging al TND, anche per l'applicazione del TK al MAF è necessario standardizzare le medie di lungo periodo. Dall'analisi della Figura 4.1 si vede, come detto in precedenza, la fortissima linearità del legame tra il MAF e l'area. È possibile rappresentare tale correlazione attraverso la relazione:

$$MAF = a \cdot A^b + v \quad (4.5)$$

dove con  $A$  si è indicata l'area del bacino, con  $v$  il residuo del modello regressivo, con  $a$  e  $b$  i coefficienti del modello stesso, con un valore di  $b$  stimabile in 0.93 per l'insieme di 182 bacini di interesse. Per rimuovere la dipendenza del MAF dall'area del bacino i valori empirici di tale indice sono stati divisi per l'area del bacino corrispondente elevata alla  $b$ , come indicato nella relazione (4.6):

$$MAF_{s \tan d} = \frac{MAF}{A^{0.93}} \quad (4.6)$$

Essendo invece il MAP\* dipendente solo dalla precipitazione e dall'area del bacino, non necessita di una stima per le sezioni non strumentate, considerata la maggiore disponibilità dei dati di afflusso meteorico.

Moltiplicando le curve di durata adimensionali per i due indici di deflusso utilizzati, MAF stimato e MAP\*, specifici per ogni bacino in esame, sono state ricavate le curve dimensionali sia stagionali che annuali. I risultati ottenuti sono riportati nel Capitolo 5.

## ***CAPITOLO 5: PRESENTAZIONE DEI RISULTATI***

Nel presente capitolo vengono illustrati i risultati ottenuti a seguito dell'applicazione della tecnica del Top-kriging per la stima della curve di durata stagionali e percentili annuali, in cross-validazione, relative ai 182 bacini dell'area di studio in esame (cfr. Capitolo 3).

Nel Paragrafo 5.1 vengono riportati i risultati, in termini di NSE, derivanti dall'applicazione del Top-kriging per la stima dei TND delle curve di durata, in cross-validazione, associate ai bacini analizzati e il confronto grafico fra i TND osservati e stimati con tale metodo. Nel Paragrafo 5.2 sono riportate le efficienze di Nash&Sutcliffe (cfr. Cap. 4) relative all'applicazione del Top-kriging per la stima dei MAF di ciascun bacino in cross validazione necessario per la ricostruzione delle curve dimensionali e il confronto grafico fra i MAF osservati e stimati. Nel Paragrafo 5.3 e nel Paragrafo 5.4 sono riportati i risultati ottenuti nella stima delle curve annuali e stagionali rispettivamente. Per ognuna delle due classi di curve trattate è presentato un confronto tra le prestazioni del modello che stima le FDC attraverso i pesi ricavati dall'applicazione del metodo TK ai TND annuali e stagionali, e le prestazioni del modello che stima le stesse FDC tramite i pesi ottenuti, dall'applicazione delle medesime procedure, ai TND relativi alle curve osservate di lungo periodo (Bononi, 2014). Tale confronto è effettuato dall'analisi di tabelle che riportano i valori di NSE ed LNSE relativi alle stime e tramite i seguenti i grafici:

- Grafici a dispersione stime-osservazioni: illustrano la relazione esistente fra le curve osservate e stimate per entrambi i metodi sopra illustrati. Si riportano le curve stimate a vicinaggio 5 perché, come si vedrà in seguito, tale valore di vicinaggio fornisce i risultati migliori.
- Scarti complessivi fra le stime: evidenziano le differenze di errori commessi dai due metodi di stima utilizzati applicando la formulazione analoga a quella proposta in Ganora et al. (2009):

$$u_{\text{mod}} = \sum_{k=1}^p |q_{k,emp} - \hat{q}_{k,mod}| \quad (5.1)$$

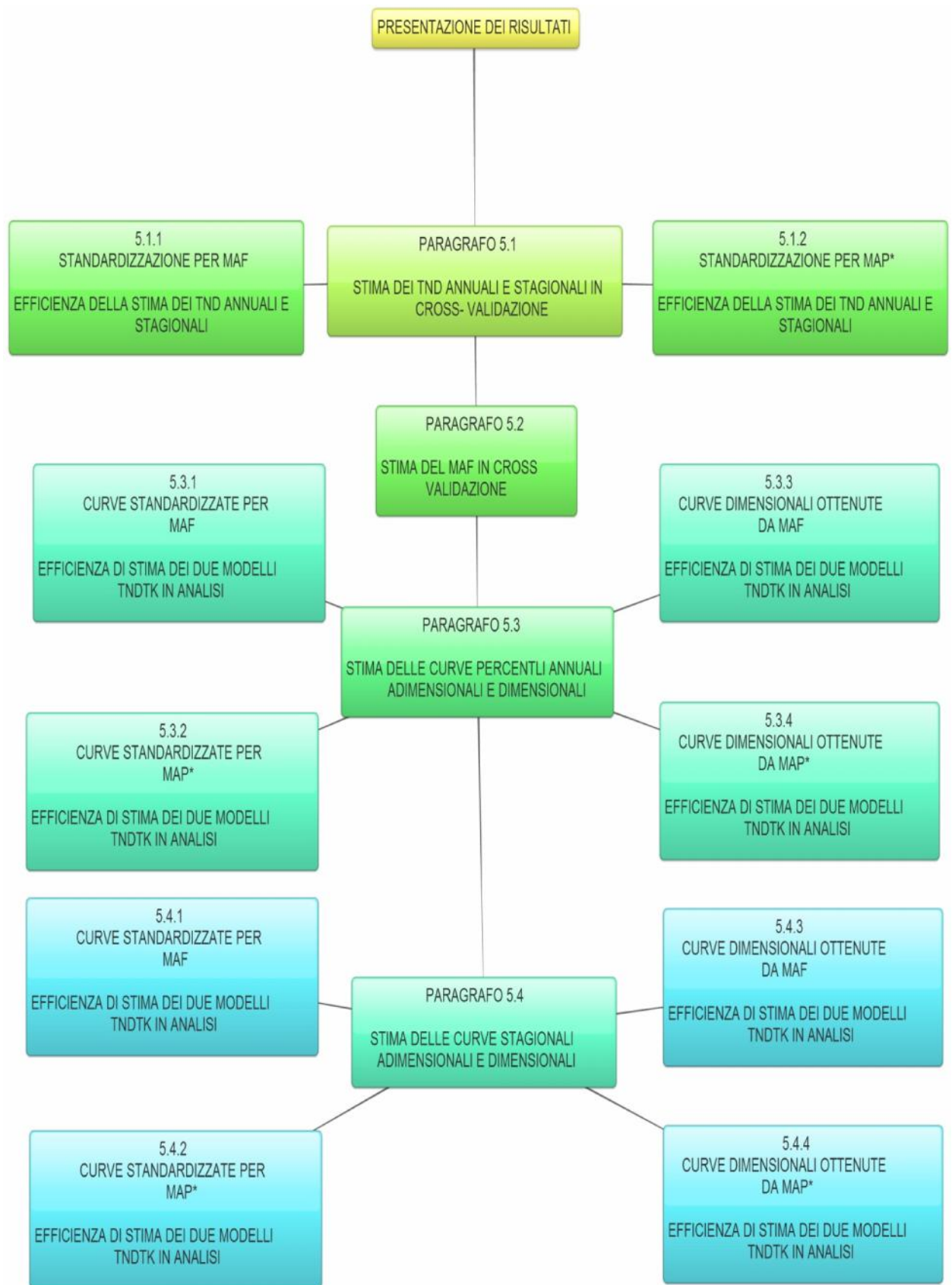
dove  $p$  è il numero di valori di portata delle FDC e  $q_{k,emp}$  e  $q_{k,mod}$  sono i valori empirici e stimati di portata.

- Curve durata-errore: evidenziano la mediana dell'errore commesso dal modello utilizzato e la distribuzione degli errori relativi entrambi in funzione della durata. Sono riportate tre bande comprendenti il 60% l'80% e il 95% degli errori commessi.

Il Paragrafo 5.5 mostra alcuni esempi di confronto fra curve di durata, empiriche e stimate con entrambi i metodi, di particolari bacini. Dal Paragrafo 5.1 al 5.4 viene sempre fatta una distinzione fra la standardizzazione col MAF e col MAP\* e fra le corrispondenti curve dimensionali.

Alla pagina seguente, per una migliore comprensione, è riportata una mappa concettuale che spiega la suddivisione del presente capitolo:





**Mapa concettuale 5.1:** *Suddivisione in paragrafi del Capitolo 5. L'efficienza dei modelli TNDTK nelle ricostruzione delle curve è riportata nei paragrafi 5.3 e 5.4 rispettivamente per le curve percentili e per le curve stagionali.*

## 5.1 Stima dei TND annuali e stagionali in cross-validazione

### 5.1.1 Standardizzazione con MAF

$N_{max}$	STAG 1	STAG 2	$N_{max}$	STAG 1	STAG 2
<b>5</b>	0.542	0.553	<b>5</b>	0.529	0.535
<b>10</b>	0.514	0.538	<b>10</b>	0.497	0.519
<b>20</b>	0.436	0.501	<b>20</b>	0.421	0.483
<b>50</b>	0.281	0.373	<b>50</b>	0.262	0.356

(a) NSE (b) LNSE

**Tabella 5.1:** *Pannello (a):* NSE valutati sulla base della stima dei TND delle FDC (standardizzate con MAF) relativa alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50, utilizzando il modello Ex1 per la modellazione del variogramma sperimentale; *Pannello (b):* LNSE valutati sulla base della stima dei TND delle FDC relative alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50, utilizzando il modello Ex1 per la modellazione del variogramma sperimentale.

Dall'analisi della Tabella 5.1 si vede come l'efficienza del modello, nella stima del TND in cross-validazione, sia leggermente migliore per la stagione primaverile - estiva e che, tale efficienza, diminuisca all'aumentare del vicinaggio. Tale considerazione è evidenziabile sia dall'analisi dell'NSE che dall'analisi dell'LNSE.

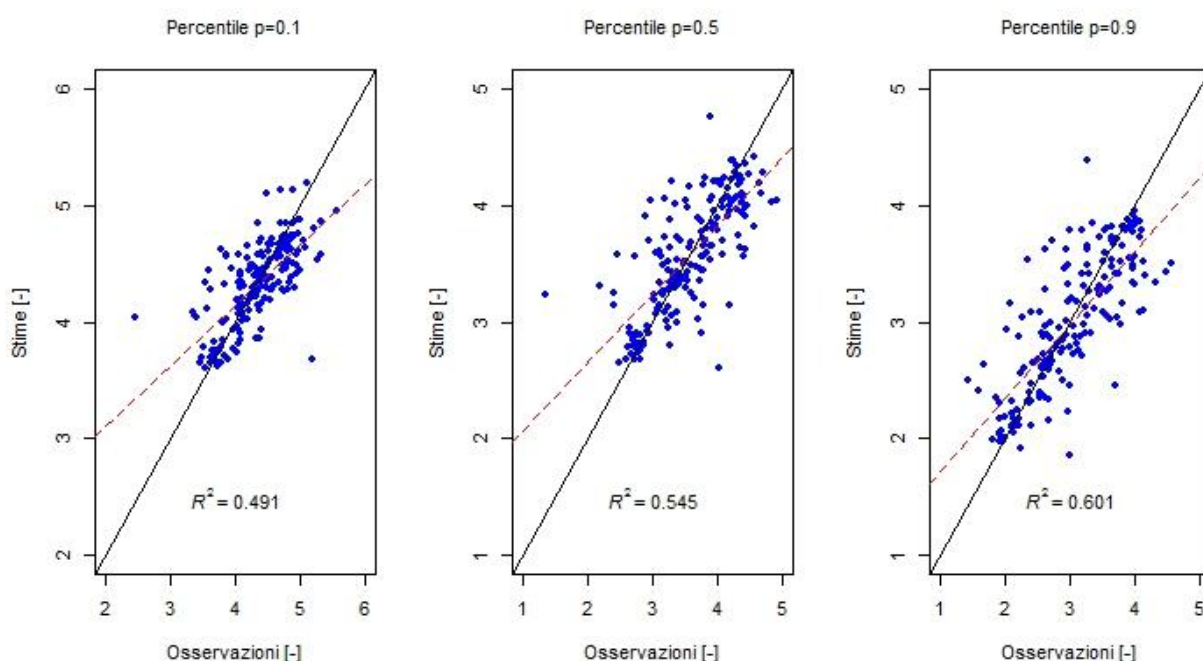
$N_{max}$	P10	P50	P90	$N_{max}$	P10	P50	P90
<b>5</b>	0.491	0.545	0.602	<b>5</b>	0.476	0.505	0.552
<b>10</b>	0.449	0.528	0.571	<b>10</b>	0.433	0.488	0.521
<b>20</b>	0.397	0.479	0.512	<b>20</b>	0.386	0.447	0.467
<b>50</b>	0.284	0.342	0.323	<b>50</b>	0.269	0.312	0.367

(a) NSE (b) LNSE

**Tabella 5.2:** *Pannello (a):* NSE valutati sulla base della stima dei TND delle FDC (standardizzate con MAF) percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50, utilizzando il modello Ex1 per la modellazione del variogramma sperimentale; *Pannello (b):* LNSE valutati sulla base della stima dei TND delle FDC percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50, utilizzando il modello Ex1 per la modellazione del variogramma sperimentale.

La Tabella 5.2 mostra come l'applicazione del Top-kriging per la stima dei TND percentili annuali in cross-validazione risulti più efficace nel caso della simulazione di anni particolarmente umidi ( $p=0.9$ ) e meno efficace nel caso della simulazione di un anno particolarmente secchi ( $p=0.1$ ). Anche in questo caso, si nota un peggioramento dell'efficienza all'aumentare del vicinaggio, sia on termini di NSE che di LNSE.

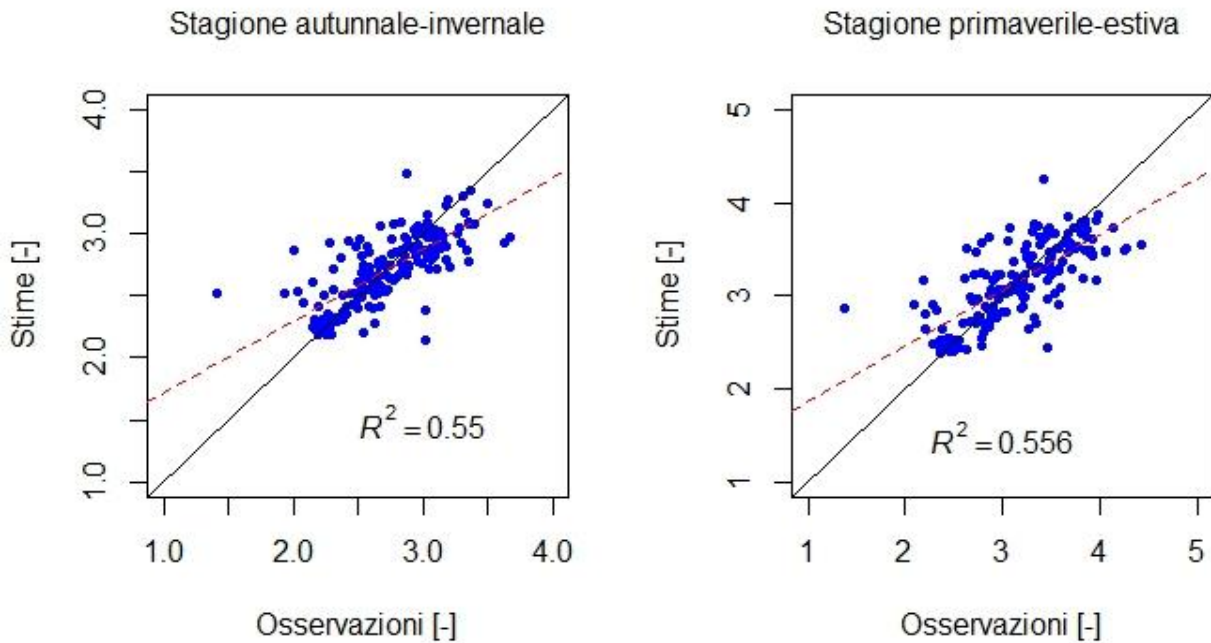
La relazione che intercorre fra i TND osservati e stimati è riportata nelle Figure 5.1 e 5.2, sia per curve di durata stagionali che per curve di durata percentili annuali, per un valore di vicinaggio pari a 5, che come detto, risulta essere il migliore.



**Figura 5.1:** Correlazione fra i TND percentili annuali osservati e stimati a seguito della standardizzazione per il MAF. La linea tratteggiata rappresenta la retta di regressione, mentre la linea continua rappresenta la bisettrice del primo quadrante. È riportato, in ognuno dei pannelli, il valore del quadrato del coefficiente di correlazione lineare  $R^2$ .

La Figura 5.1 evidenzia come i risultati in termini di NSE ed LNSE, presentati in Tabella 5.2, siano confermati dall'andamento di  $R^2$ , il quale tende ad aumentare all'aumentare della probabilità di non superamento. Tuttavia si vede come per  $p=0.1$  ci sia un maggior addensamento dei valori di TND lungo la bisettrice del primo quadrante, rispetto agli altri TND percentili. Verosimilmente la presenza di alcuni punti, particolarmente mal stimati, ha provocato importanti abbassamenti sia di NSE che di  $R^2$ .

La Figura 5.2 evidenzia un'efficienza quasi identica della stima dei TND stagionali in cross-validazione. Le leggere differenze che incontriamo, sia in termini di NSE che di  $R^2$ , sono probabilmente dovute ad una tendenza leggermente maggiore che ha il modello nel sottostimare i TND relativi alla stagione autunnale - invernale.



**Figura 5.2:** Correlazione fra i TND stagionali osservati e stimati a seguito della standardizzazione per il MAF. La linea tratteggiata rappresenta la retta di regressione, mentre la linea continua rappresenta la bisettrice del primo quadrante. È riportato, in ognuno dei pannelli, il valore del quadrato del coefficiente di correlazione lineare  $R^2$ .

### 5.1.2 Standardizzazione con MAP\*

$N_{max}$	STAG 1	STAG 2	$N_{max}$	STAG 1	STAG 2
<b>5</b>	0.595	0.667	<b>5</b>	0.577	0.635
<b>10</b>	0.568	0.626	<b>10</b>	0.558	0.594
<b>20</b>	0.535	0.598	<b>20</b>	0.529	0.568
<b>50</b>	0.409	0.450	<b>50</b>	0.401	0.421

a) NSE

(b) LNSE

**Tabella 5.3:** *Pannello (a): NSE valutati sulla base della stima dei TND delle FDC(standardizzate con MAP\*) relativa alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50, utilizzando il modello Ex1 per la modellazione del variogramma sperimentale; Pannello (b): LNSE valutati sulla base della stima dei TND delle FDC relative alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50, utilizzando il modello Ex1 per la modellazione del variogramma sperimentale.*

Anche nel caso della Tabella 5.3, relativa alla standardizzazione tramite il MAP\*, si vede come sia i valori dell'NSE che dell'LNSE subiscano un'importante diminuzione (di circa il 20%) passando da un vicinaggio pari a 5 ad uno pari a 50. In questo caso è più evidente, rispetto a quanto visibile dalla tabella 5.1, un'efficienza maggiore nella stima dei TND relativi alla stagione primaverile-estiva, sia in termini di NSE che di LNSE.

$N_{max}$	P10	P50	P90	$N_{max}$	P10	P50	P90
<b>5</b>	0.596	0.650	0.663	<b>5</b>	0.569	0.612	0.616
<b>10</b>	0.577	0.612	0.621	<b>10</b>	0.552	0.573	0.573
<b>20</b>	0.533	0.581	0.589	<b>20</b>	0.512	0.545	0.543
<b>50</b>	0.430	0.438	0.436	<b>50</b>	0.412	0.403	0.392

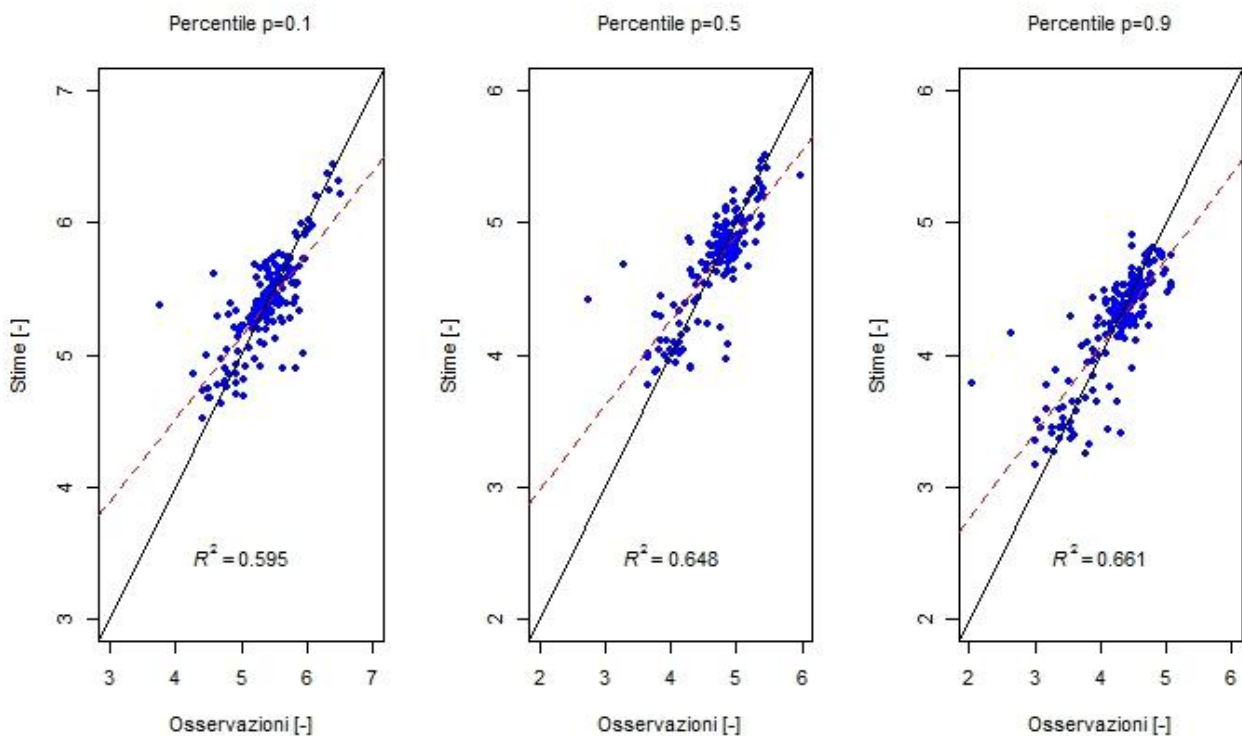
(a) NSE

(b) LNSE

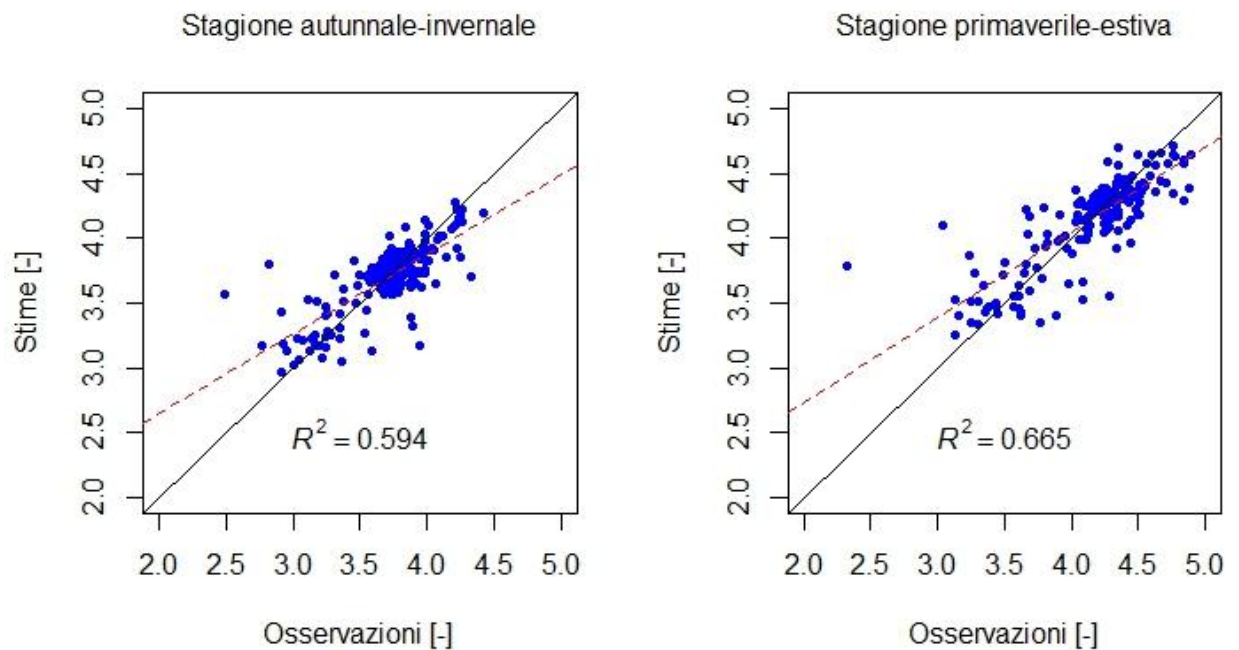
**Tabella 5.4:** *Pannello (a): NSE valutati sulla base della stima dei TND delle FDC(standardizzate con MAP\*) percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50, utilizzando il modello Ex1 per la modellazione del variogramma sperimentale; Pannello (b): LNSE valutati sulla base della stima dei TND delle FDC percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50, utilizzando il modello Ex1 per la modellazione del variogramma sperimentale.*

Come nel caso delle efficienze relative alle standardizzazioni per il MAF in Tabella 5.2, anche in Tabella 5.4 si nota come l'applicazione del Top-kriging per la stima dei TND percentili annuali in cross-validazione risulti più efficace nel caso della simulazione di anni particolarmente umidi e meno efficace nel caso della simulazione di anni particolarmente secchi. Confermata è anche la tendenza di peggioramento dell'efficienza all'aumentare del vicinaggio.

La Figura 5.3 mostra come, nonostante evidenti errori nella procedura di stima, i TND relativi alla P90 presentino un valore di  $R^2$  maggiore a causa di una maggiore addensamento dei valori attorno alla retta di regressione. Anche in questo caso, così come in Figura 5.1, si vede come i valori di TND relativi alle curve P50 assumano valori maggiori rispetto alla curva P10 e P90.



**Figura 5.3:** Correlazione fra i TND percentili osservati e stimati a seguito della standardizzazione per il MAP\*. La linea tratteggiata rappresenta la retta di regressione, mentre la linea continua rappresenta la bisettrice del primo-terzo quadrante. È riportato, in ognuno dei pannelli, il valore del quadrato del coefficiente di correlazione lineare  $R^2$ .



**Figura 5.4:** Correlazione fra i TND stagionali osservati e stimati a seguito della standardizzazione per il MAP\*. La linea tratteggiata rappresenta la retta di regressione, mentre la linea continua rappresenta la bisettrice del primo-terzo quadrante. È riportato, in ognuno dei pannelli, il valore del quadrato del coefficiente di correlazione lineare  $R^2$ .

Anche la Figura 5.4, come la Figura 5.2, evidenzia un comportamento quasi identico del modello nella stima dei TND relativi alle due stagioni in esame. Da tale figura è inoltre evidente come i valori di TND della stagione primaverile-estiva siano leggermente superiori, oscillando in un range compreso tra 3 e 5, mentre quelli relativi alla stagione autunnale-invernale oscillino in un range compreso tra 2.5 e 4.5.

## 5.2 Stima del MAF in cross-validazione

Si riportano di seguito i valori dell'NSE calcolato a seguito della stima delle media di lungo periodo (MAF) di ogni bacino in cross-validazione, usate per ricostruire le curve dimensionali annuali e stagionali in sezioni non strumentate.

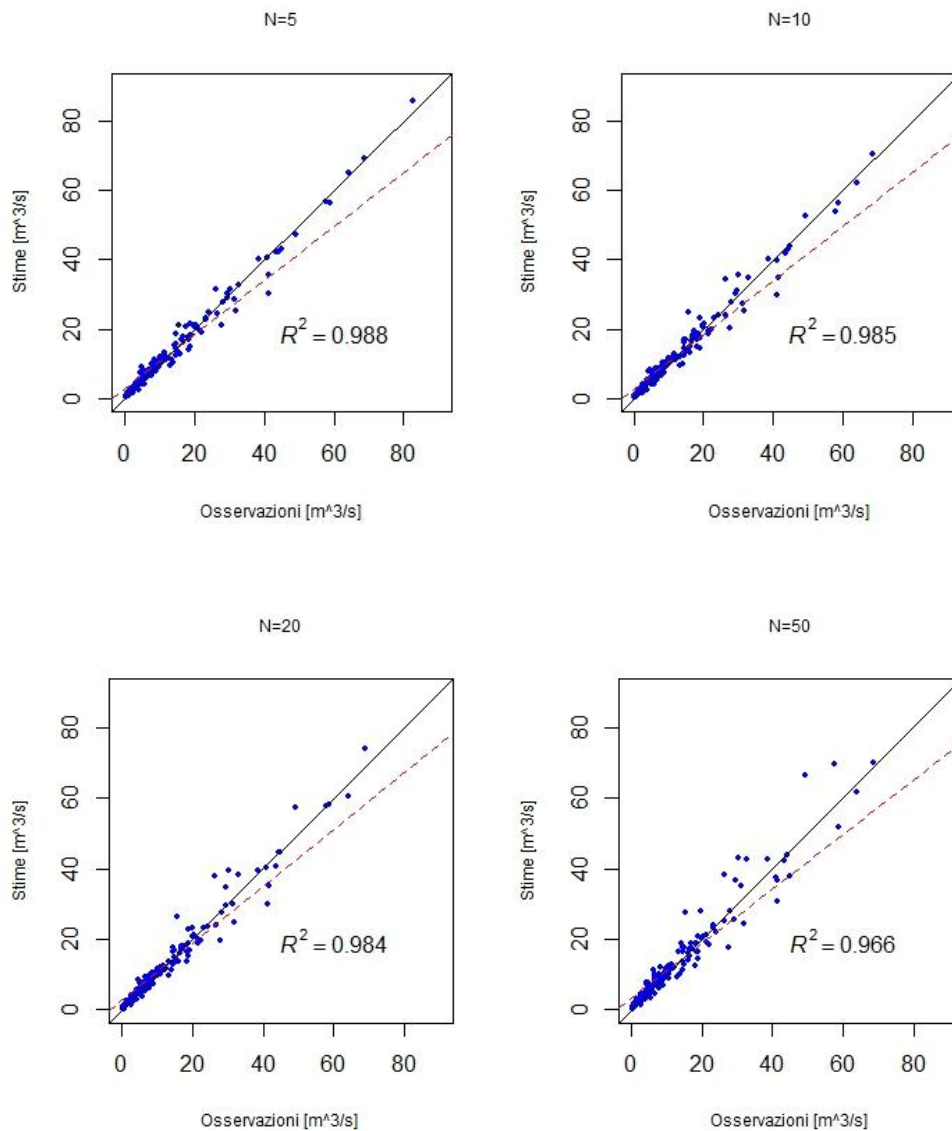
<b>N<sub>max</sub></b>	<b>NSE</b>
<b>5</b>	0.944
<b>10</b>	0.942
<b>20</b>	0.942
<b>50</b>	0.926

*Tabella 5.5: NSE relativo alla stima del MAF in cross-validazione tramite la tecnica del Top-kriging. Sono stati utilizzati i valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) 5, 10, 20 e 50 e il modello Ex1 per la modellazione del variogramma sperimentale.*

Il peggioramento dell'NSE all'aumentare del vicinaggio, sempre visibile nei casi dei TND illustrati nel paragrafo 5.1, è presente, anche se in modo meno accentuato, anche nella stima del MAF. L'efficienza migliore la si ha considerando un vicinaggio pari a 5 e i corrispondenti 182 valori stimati saranno quelli utilizzati per la ricostruzione delle curve di durata, annuali e stagionali, dimensionali.

La figura 5.5 mostra un forte legame lineare, in particolar modo a vicinaggio 5, tra il MAF stimato e il MAF osservato. Si vede inoltre come la maggior parte dei bacini sia caratterizzata da un valore medio delle portate comprese fra 10 e 20 m<sup>3</sup>/s. Tali valori molto bassi di portata impediscono di vedere nel grafico alcuni bacini caratterizzati da valori di portata molto elevati (a differenza di quanto visto in Figura 4.1 riportata in scala bilogarithmica); il valore massimo del MAF osservato è infatti pari a 665.146 m<sup>3</sup>/s in corrispondenza del bacino dell'Alabama River chiuso a Montgomery che rappresenta il bacino più esteso dell'area in esame.





**Figura 5.5:** Legame tra il MAF osservato e il MAF stimato con la tecnica del Top-kriging applicata con valori di vicinaggio  $N$  pari a 5, 10, 20 e 50. È riportato, in ognuno dei pannelli, il valore del quadrato del coefficiente di correlazione lineare  $R^2$ . La linea nera rappresenta la bisettrice del primo quadrante, mentre la linea tratteggiata rappresenta la retta di regressione.

### 5.3 Stima delle curve percentili annuali

#### 5.3.1 Standardizzazione per MAF

(a) NSE								
$N_{max}$	P10	P50	P90	$N_{max}$	P10-POR	P50-POR	P90-POR	
5	0.894	0.916	0.902	5	0.894	0.916	0.902	
10	0.894	0.917	0.901	10	0.895	0.917	0.902	
20	0.892	0.915	0.899	20	0.894	0.914	0.899	
50	0.884	0.903	0.889	50	0.884	0.903	0.888	
(b) LNSE								
$N_{max}$	P10	P50	P90	$N_{max}$	P10-POR	P50-POR	P90-POR	
5	0.741	0.817	0.888	5	0.738	0.818	0.888	
10	0.714	0.800	0.881	10	0.716	0.799	0.881	
20	0.686	0.781	0.87	20	0.688	0.780	0.869	
50	0.652	0.747	0.847	50	0.646	0.747	0.847	

**Tabella 5.6:** *Pannello (a): NSE relativi alla stima delle FDC, standardizzate con MAF, percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. Pannello (b): LNSE relativi alla stima delle FDC, standardizzate per il MAF, percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. In entrambi i pannelli a sinistra si hanno gli NSE relativi alle curve adimensionali ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND annuali; a destra si hanno gli NSE relativi alle curve adimensionali ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND di lungo periodo (POR).*

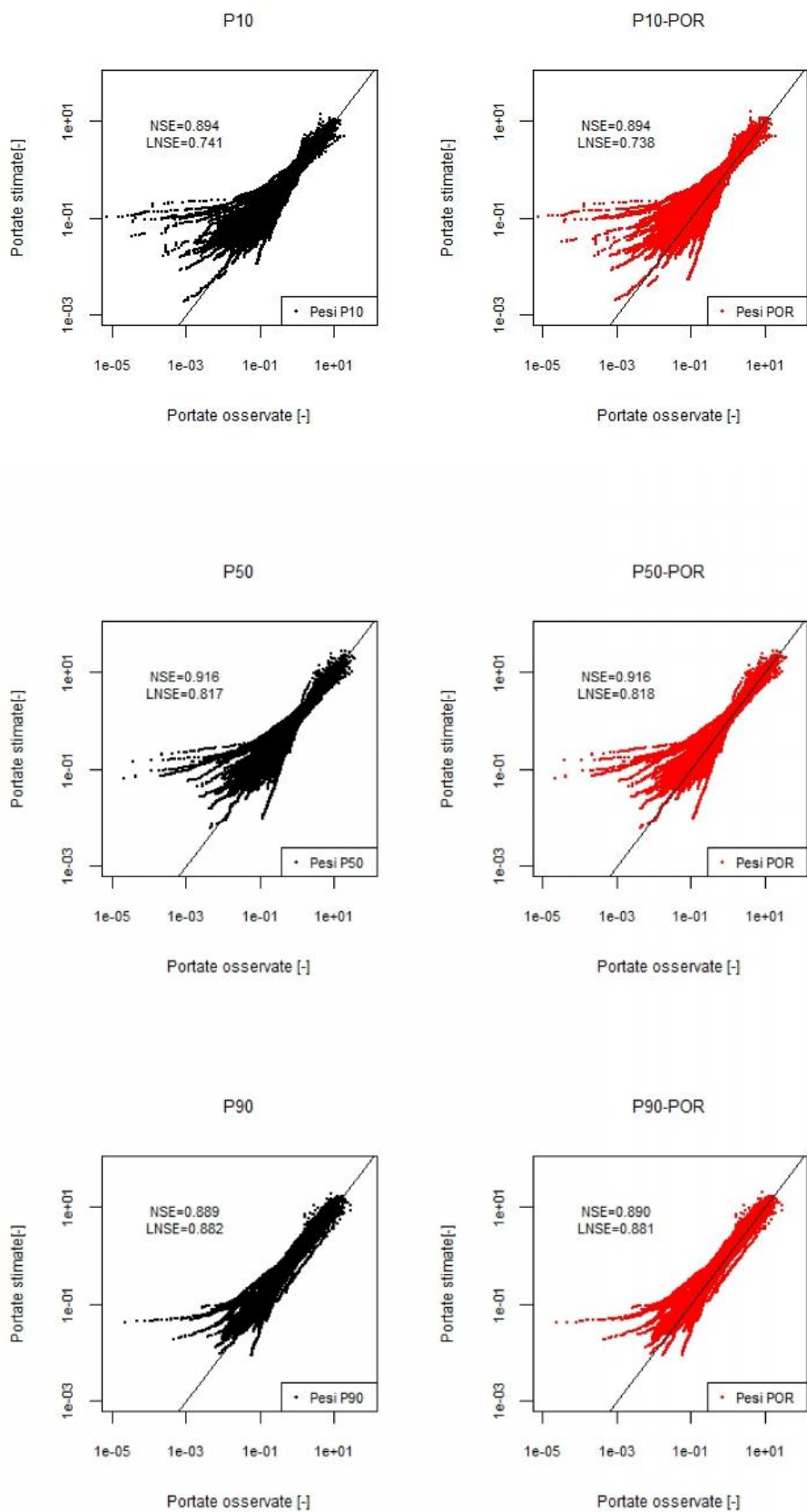
Dall'analisi della Tabella 5.6 si vede come, sia in termini di NSE che di LNSE, la ricostruzione della curva di durata mediana relativa ad un ipotetico anno idrologicamente tipico (P50), standardizzata per il MAF, presenti l'efficienza di stima massima. Tuttavia le differenze, sempre in termini di efficienza di stima valutata con NSE ed LNSE, tra le tre curve percentili in esame (P10, P50, P90) sono molto ridotte e, come nel caso dei TND, i valori di tali indici prestazionali si riducono all'aumentare del vicinaggio; in questo caso, tuttavia, non si ha più il notevole abbattimento (di circa il 20%), che si aveva nell'applicazione del Top-kriging ai TND, passando da vicinaggio 5 vicinaggio 50. Infine si vede come l'utilizzo di pesi derivanti dall'applicazione del Top-kriging ai TND annuali e l'utilizzo di pesi derivanti

dall'applicazione del Top-kriging ai TND di lungo periodo (POR), per la ricostruzione delle curve percentili adimensionali, restituisca risultati pressappoco identici, in particolare in termini di NSE.

Le Figura 5.6, rappresentante i diagrammi a dispersione relativi al confronto fra le FDC standardizzate per il MAF osservate e stimate a vicinaggio 5, riportata alla pagina seguente, rende ancora più evidente quanto visto nella Tabella 5.6; si osserva, infatti, come per ogni valore di vicinaggio i due diversi metodi di stima utilizzati portino a risultati praticamente identici.

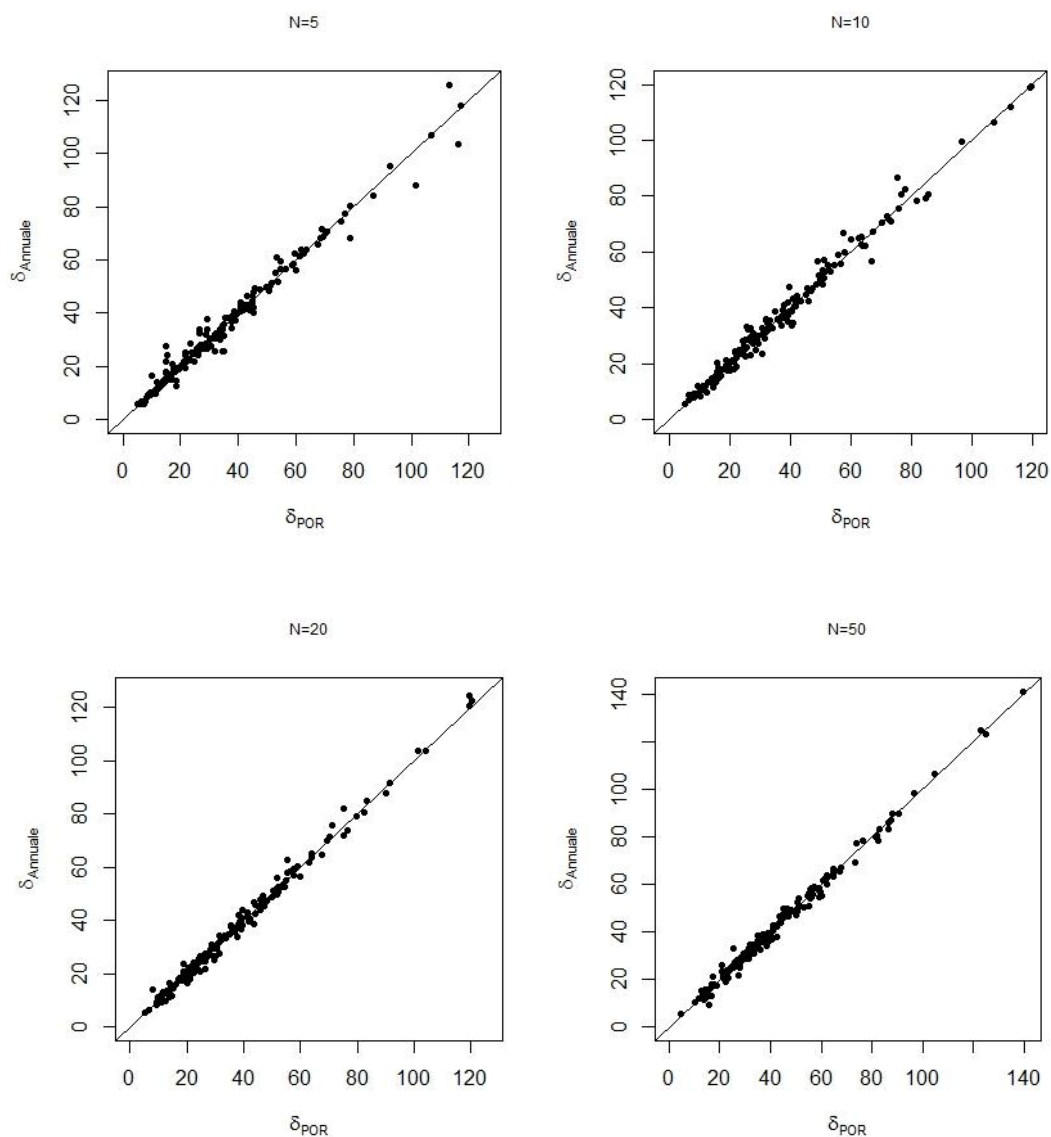
Si vede, inoltre, come gli errori di stima siano notevolmente più accentuati in corrispondenza di valori bassi di portata adimensionale e come questi ultimi siano più evidenti a seguito dell'applicazione dei due modelli TNDTK per la stima della curva P10 e meno evidenti nell'applicazione degli stessi modelli per la stima della P90. Per tutte e tre le curve si vede, invece, come i valori elevati di portata standardizzata siano ben ricostruiti.

### Curve percentili a vicinaggio 5



*Figura 5.6: Confronto fra le curve percentili osservate e standardizzate per il MAF a vicinaggio 5.*

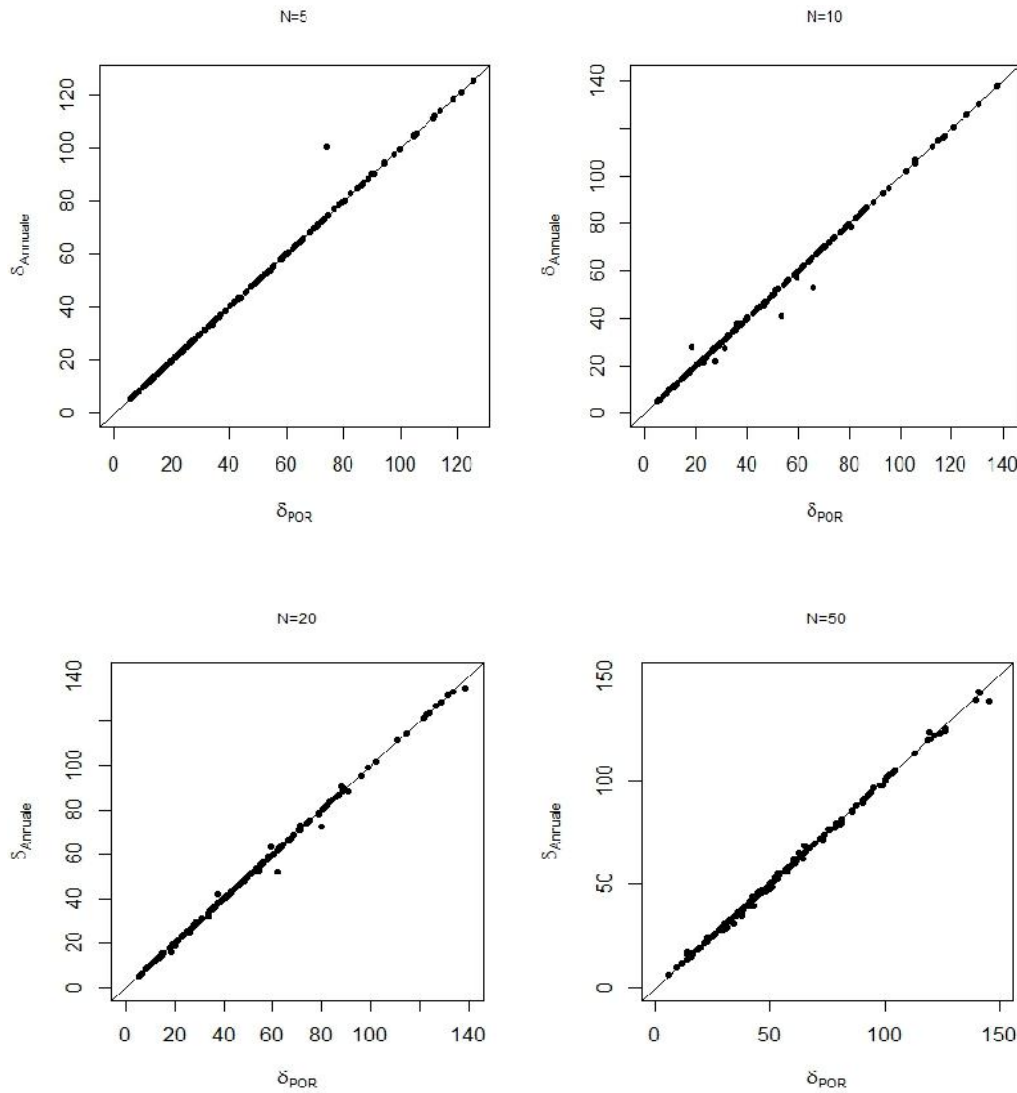
Si riportano di seguito i grafici relativi al confronto fra le efficienze dei due modelli utilizzati nella stima delle tre curve percentili annuali in esame in termini di errore complessivo come proposto da Ganora et al. (2009).



**Figura 5.7:** Confronto fra i due metodi di stima delle P10 adimensionali in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.

La Figura 5.7 mostra che la maggiore discrepanza tra i due metodi utilizzati per la stima della curva P10 adimensionale, relativa ad un anno particolarmente secco, la si ha a vicinaggio 5 anche se viene confermata la tendenza dei due modelli ad avere le medesime prestazioni. A

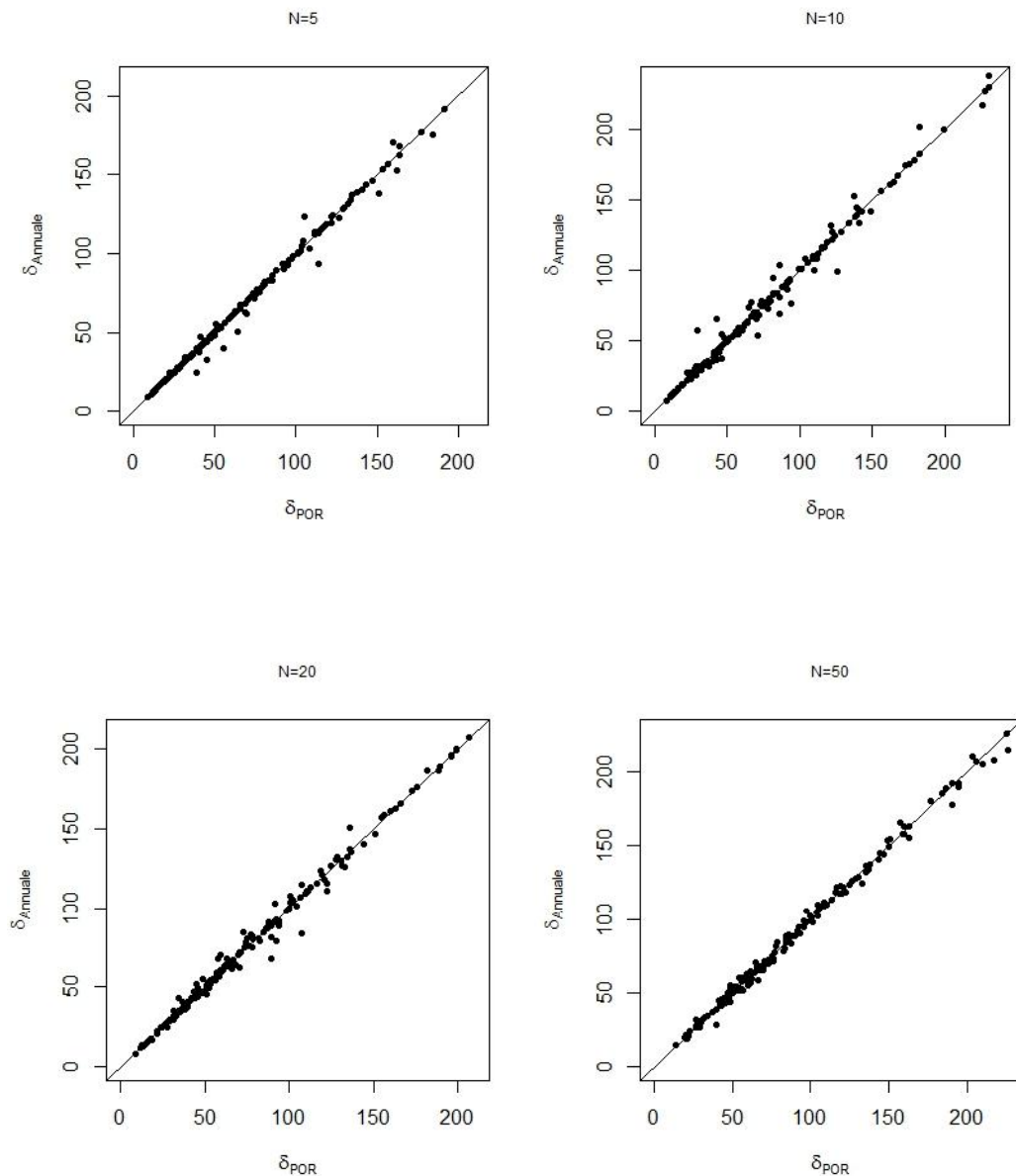
vicinaggio 5 si osservano tre bacini dell'area di studio in esame per i quali, l'utilizzo dei pesi derivanti dall'applicazione del Top-kriging ai TND di lungo periodo provochi errori sensibilmente maggiori nella stima delle FDC standardizzate per il MAF, rispetto al modello che utilizza i pesi derivanti dall'applicazione del TK ai TND annuali.



**Figura 5.8:** Confronto fra i due metodi di stima delle P50 adimensionali in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.

Anche per la stima della curva P50 adimensionalizzata per il MAF si conferma, dalla Figura 5.8, la quasi uguaglianza, in termini di errore commesso e quindi in termini di efficienza, delle

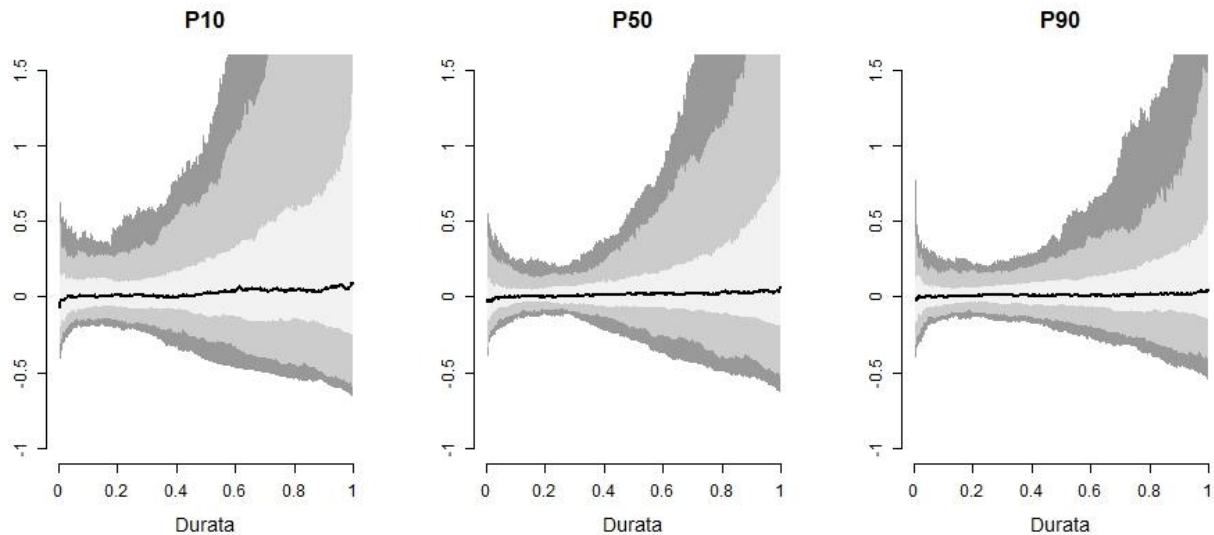
due diverse applicazioni del modello TNDTK. È molto interessante notare come, a vicinaggio 5, gli errori siano identici fatta eccezione per un unico bacino che presenta un errore, nel modello che utilizza i TND annuali, decisamente maggiore (quasi il doppio). A vicinaggio 50 i due modelli producono pressappoco gli stessi errori mentre, a vicinaggio 10 e 20, è possibile notare rispettivamente 4 e 2 bacini con errore legato al modello che utilizza i TND di lungo periodo sensibilmente maggiore.



**Figura 5.9:** Confronto fra i due metodi di stima delle P90

Dalla Figura 5.9 si evince che, anche se per la P90 è ancora una volta confermato il fatto che i due metodi di stima presentino efficienze simili, in questo caso le differenze tra gli errori commessi da entrambi sono più marcate.

Considerata la quasi uguaglianza in termini di errore fra i due metodi, si riportano le curve errori-durate solamente per le FDC adimensionalizzate per il MAF ricostruite coi pesi relativi ai TND annuali.



**Figura 5.10:** Stima delle FDC percentili annuali adimensionalizzate con MAF attraverso pesi derivanti dal krigaggio dei TND annuali a vicinaggio 5: P10 (destra), P50 (centro), P90 (sinistra); curve errore-durata che riportano il profilo della mediana (linea nera) e delle bande contenenti il 60%, l'80% e il 95% degli errori relativi rappresentate, rispettivamente, dalle tonalità gradualmente più chiare di grigio.

La Figura 5.10 mostra come l'andamento della mediana dell'errore (curva nera) oscilli intorno allo zero per le tre curve percentili in esame a testimonianza del fatto che il modello è indistorto. Si evidenzia, inoltre, come già testimoniato dalla Tabella 5.6 in termini di NSE ed LNSE, come gli errori maggiori siano commessi nella stima della curva P10 e ciò lo si evince dal maggiore spessore delle bande d'errore in Figura 5.13. In tutti e tre i casi si nota come gli errori siano molto più marcati in corrispondenza di durate elevate (prossime a 1).



### 5.3.2 Standardizzazione per MAP\*

(a) NSE

$N_{max}$	P10	P50	P90	$N_{max}$	P10-POR	P50-POR	P90-POR
5	0.875	0.905	0.889	5	0.874	0.905	0.890
10	0.872	0.905	0.890	10	0.873	0.906	0.892
20	0.868	0.905	0.891	20	0.871	0.905	0.890
50	0.855	0.895	0.886	50	0.858	0.896	0.819

(b) LNSE

$N_{max}$	P10	P50	P90	$N_{max}$	P10-POR	P50-POR	P90-POR
5	0.745	0.819	0.882	5	0.743	0.819	0.881
10	0.709	0.789	0.866	10	0.715	0.791	0.867
20	0.676	0.766	0.851	20	0.677	0.765	0.850
50	0.635	0.724	0.819	50	0.626	0.723	0.886

**Tabella 5.7:** *Pannello (a): NSE relativi alla stima delle FDC percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90), standardizzate con MAP\*, in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. Pannello (b): LNSE relativi alla stima delle FDC, standardizzate per il MAP\*, percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. In entrambi i pannelli a sinistra si hanno gli NSE relativi alle curve adimensionali ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND annuali; a destra si hanno gli NSE relativi alle curve adimensionali ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND di lungo periodo (POR).*

La Tabella 5.7 mette in evidenza come, anche nella ricostruzione delle curve standardizzate per il MAP\*, la curva mediana P50, rappresentativa di anni idrologicamente tipici, presenti un'efficienza migliore in termini di NSE, mentre, ragionando in termini di LNSE, la ricostruzione migliore la si ha per la P90, rappresentativa di anni particolarmente umidi. Anche tramite questo processo di standardizzazione, l'efficienza dei due modelli TNDTK utilizzati è pressoché identica sia in termini di NSE che di LNSE e, anche in questo caso, si nota una perdita di affidabilità all'aumentare del vicinaggio, fatta eccezione per gli NSE relativi alla P50 che risultano quasi uguali o del tutto uguali per i vicinaggi 5, 10 e 20.

Curve percentili a vicinaggio 5

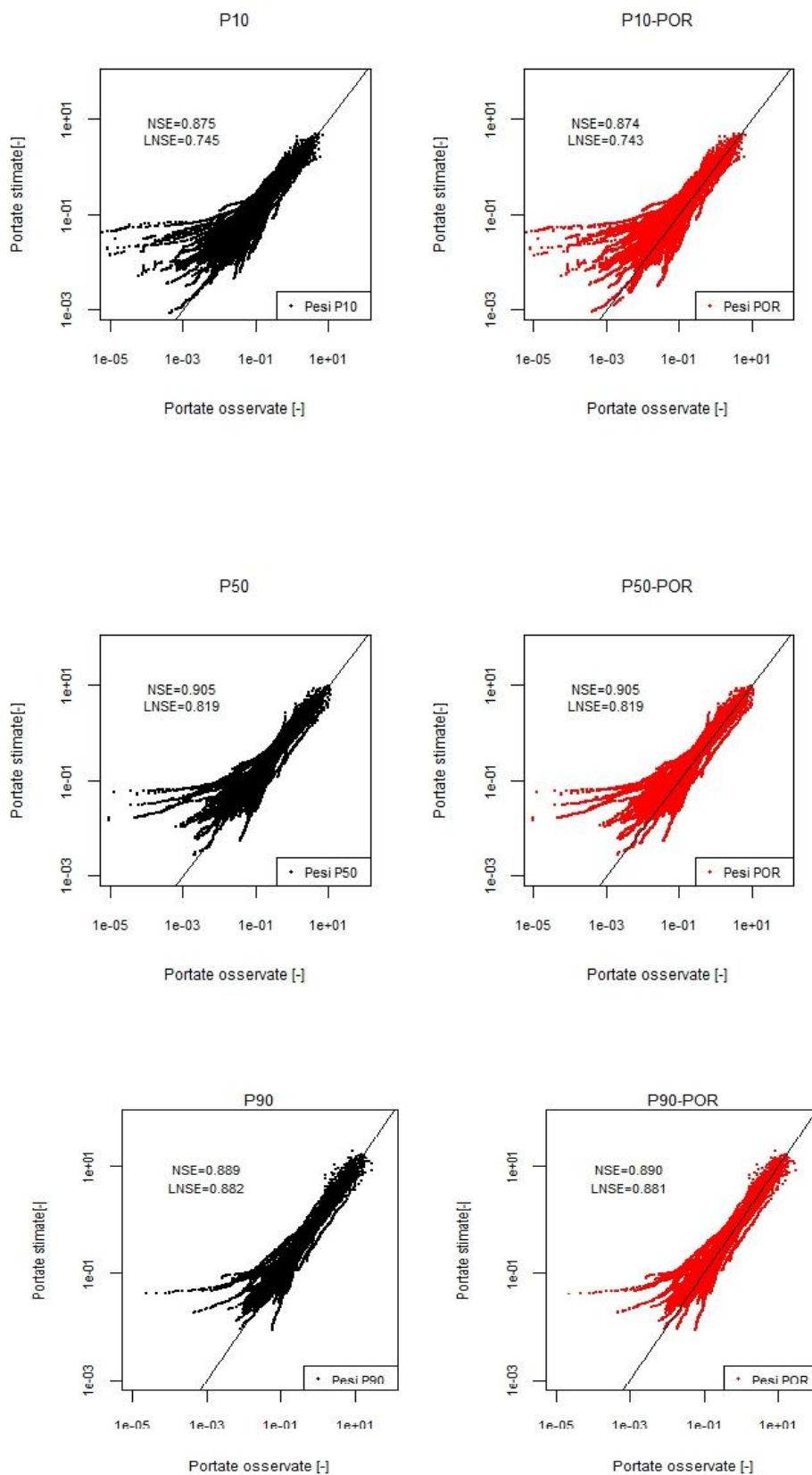
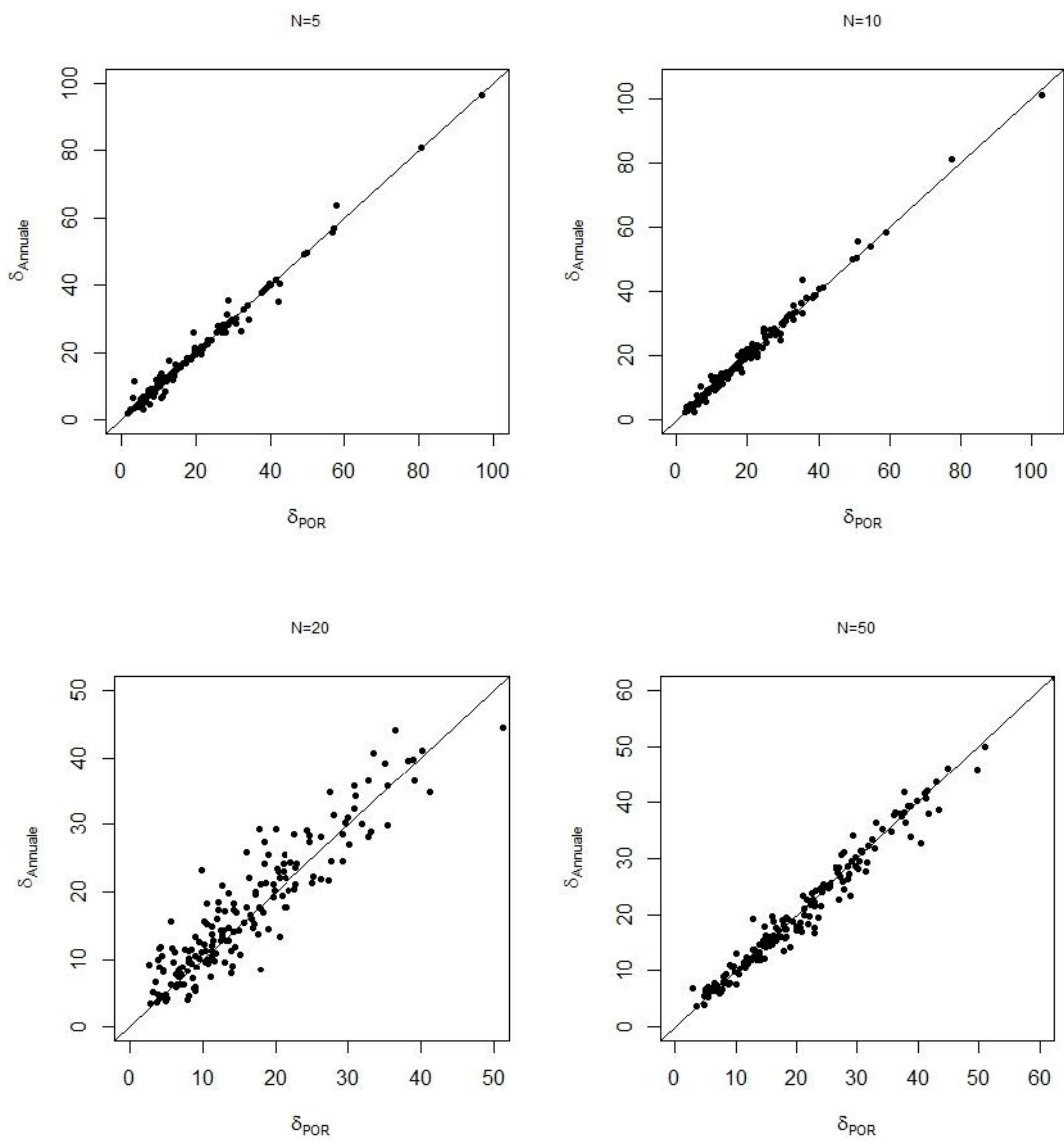


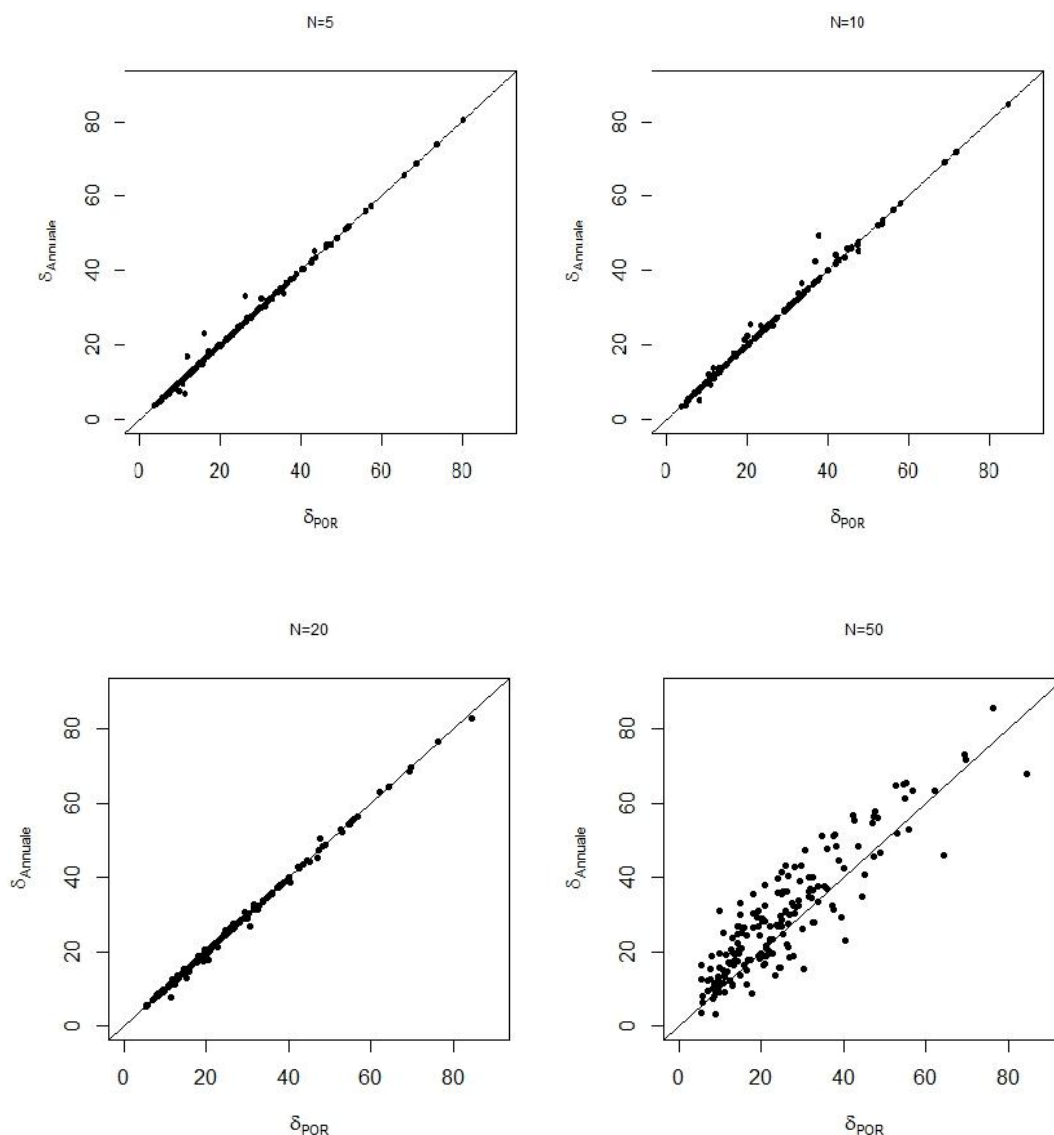
Figura 5.11 : FDC percentili adimensionalizzate per il  $MAP^*$  stimate e osservate a vicinaggio 5

La Figura 5.11 conferma il fatto che si abbia lo stesso livello di efficacia dei due modelli TNDTK in esame, nel ricostruire le curve adimensionali, anche utilizzando il  $MAP^*$  come valore di deflusso di riferimento. Come nel caso delle curve standardizzate per il MAF, anche in questo caso si vede come il modello non sia particolarmente affidabile nella stima di valori bassi di deflusso e ciò è particolarmente accentuato nel caso della curva P10.

La Figura 5.12, di seguito riportata, relativa al confronto fra le efficienze dei due modelli utilizzati nella stima delle tre curve percentili annuali in esame, adimensionalizzate per il  $MAP^*$ , in termini di errore complessivo come proposto da Ganora et al. (2009), mostra come i due metodi TNDTK utilizzati producano errori particolarmente simili, nella stima della curva P10 adimensionalizzata per il  $MAP^*$ , a vicinaggio 5 e 10. Gli errori, invece sono più differenziati per i due valori di vicinaggio più grandi e, in particolar modo, a vicinaggio 20 dove sono pochi i valori che si dispongono lungo la bisettrice del primo-terzo quadrante. Tuttavia, sia per vicinaggio 20 che 50, non si ha un risultato netto su quale dei due modelli porti ad un scarto complessivo tra osservazioni e stime minore.

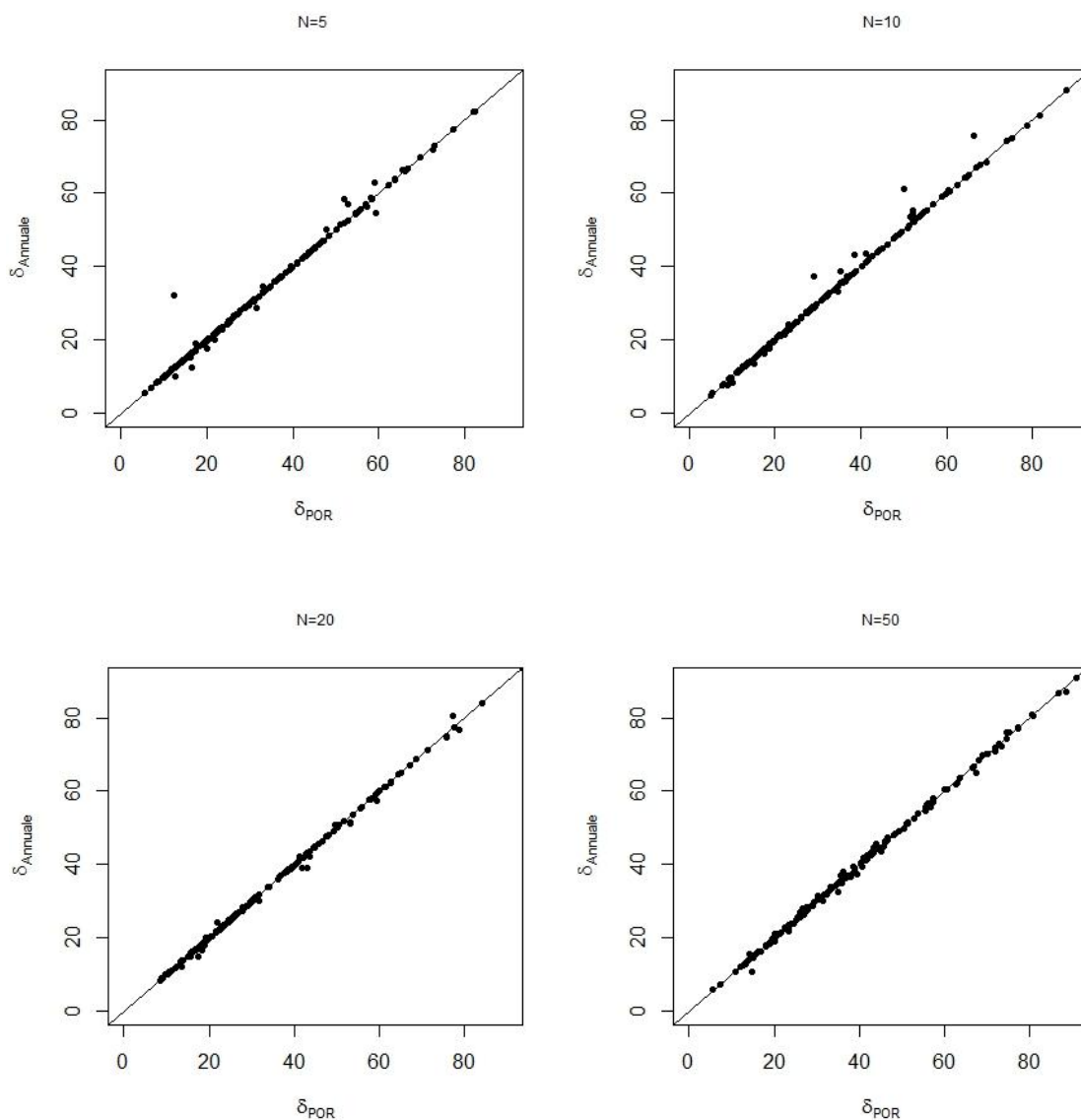


**Figura 5.12:** Confronto fra i due metodi di stima delle P10 adimensionaizzate per il MAP\* in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.



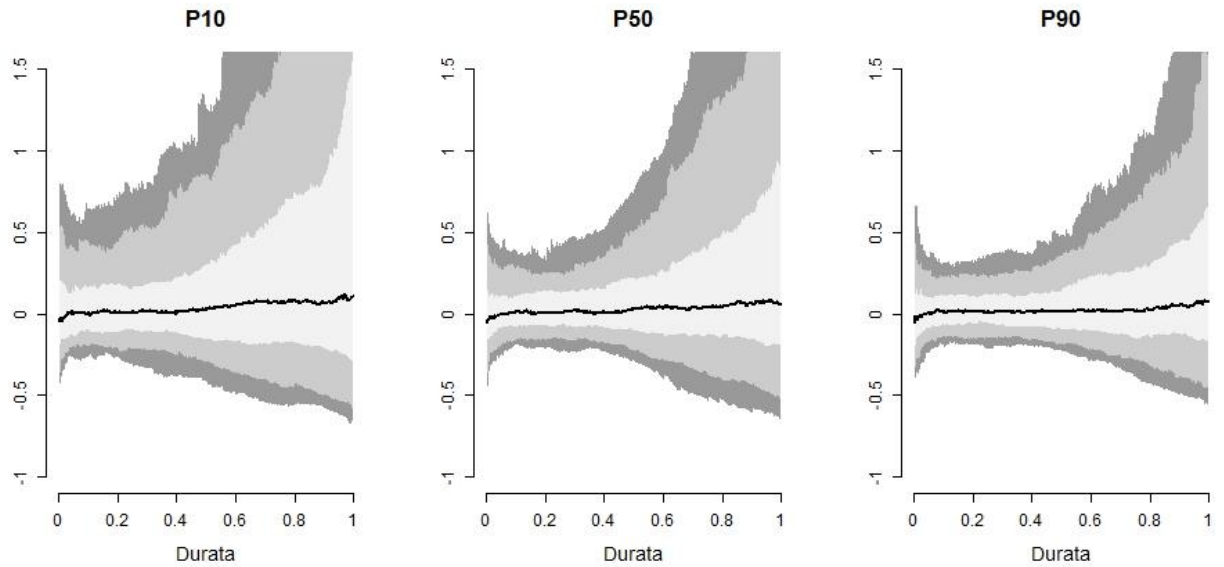
**Figura 5.13:** Confronto fra i due metodi di stima delle P50 adimensionaizzate per il MAP\* in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.

La Figura 5.13 mostra come, così come per la standardizzazione per il MAF, i modelli TNDTK presentino errori cumulati praticamente identici nella ricostruzione della P50 a vicinaggio 5, 10 e 20 anche se è visibile una maggiore discrepanza rispetto alla Figura 5.11. Discorso totalmente diverso va fatto per la stima a vicinaggio 50: si vede, dalla Figura 5.13, come, per la maggior parte dei 182 bacini dell'area di studio, i due modelli abbiano una differenza di errori molto più elevata, con una leggera tendenza ad errori maggiori per il modello che usa i pesi relativi all'applicazione del Top-kriging ai TND annuali.



**Figura 5.14:** Confronto fra i due metodi di stima delle P90 adimensionaizzate per il MAP\* in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.

Nel caso della ricostruzione della curva P90 adimensionaizzata per il MAP\*, la Figura 5.14 mostra come i modelli si comportino praticamente allo stesso modo, in termini di errori, nel caso dei vicinaggi 20 e 50. Per i vicinaggi 5 e 10 si evidenziano gli stessi risultati con, rispettivamente, 1 e 3 bacini che presentano una curva di durata ricostruita con un errore maggiore abbastanza evidente nel caso di modello del Top-kriging applicato ai TND annuali. Si riportano, di seguito, le curve errori-durate per le FDC adimensionaizzate per il MAP\* ricostruite con il modello TK applicato ai TND annuali.



**Figura 5.15:** Stima delle FDC percentili annuali adimensionalizzate con  $MAP^*$  attraverso pesi derivanti dal krigaggio dei TND annuali a vicinaggio 5: P10 (destra), P50 (centro), P90 (sinistra); curve errore-durata che riportano il profilo della mediana (linea nera) e delle bande contenenti il 60%, l'80% e il 95% degli errori relativi rappresentate, rispettivamente, dalle tonalità gradualmente più chiare di grigio.

La Figura 5.15 mostra, anche in questo caso, come l'andamento della mediana dell'errore (curva nera) oscilli intorno allo zero per le tre curve percentili in esame con una tendenza a crescere positivamente più accentuata per la P10. Si evidenzia, inoltre, come già testimoniato dalla Tabella 5.7 in termini di NSE ed LNSE, come gli errori maggiori siano commessi nella stima della curva P10 e ciò lo si evince dal maggiore spessore delle bande d'errore in Figura 5.15. In tutti e tre i casi si nota, come visto nel caso di curve standardizzate con MAF, come gli errori siano molto più marcati in corrispondenza di durate elevate (prossime a 1).

### 5.3.3 Curve dimensionali ricavate dal MAF stimato

(a) NSE							
$N_{max}$	P10	P50	P90	$N_{max}$	P10-POR	P50-POR	P90-POR
5	0.918	0.845	0.646	5	0.903	0.844	0.646
10	0.901	0.816	0.509	10	0.917	0.816	0.578
20	0.847	0.736	0.532	20	0.849	0.737	0.529
50	0.874	0.745	0.489	50	0.866	0.739	0.491
(b) LNSE							
$N_{max}$	P10	P50	P90	$N_{max}$	P10-POR	P50-POR	P90-POR
5	0.869	0.915	0.956	5	0.867	0.916	0.956
10	0.855	0.907	0.953	10	0.856	0.907	0.953
20	0.841	0.898	0.945	20	0.842	0.898	0.948
50	0.824	0.883	0.94	50	0.821	0.883	0.94

**Tabella 5.8:** *Pannello (a): NSE relativi alla stima delle FDC dimensionali, ricavate dal MAF stimato, percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. Pannello (b): LNSE relativi alla stima delle FDC, ricavate dal MAF stimato, percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. In entrambi i pannelli a sinistra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND annuali; a destra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND di lungo periodo (POR).*

Il passaggio da curve adimensionali a dimensionali, a seguito della moltiplicazione per il MAF stimato col Top-kriging a vicinaggio 5, provoca, come riscontrabile dalla Tabella 5.8, un ribaltamento dell'efficienza in termini di NSE. Si vede, infatti, come la ricostruzione della curva dimensionale P10 sia quella, fra le tre percentili in esame, che presenti valori di NSE sensibilmente maggiori; esse risultano, sempre nel caso della P10, maggiori di circa il 10% rispetto alla stima della P50 e di circa il 30% rispetto alla P90. In termini di LNSE, è invece confermata la maggiore efficienza di entrambi i modelli nella ricostruzione della curva P90. Confermate sono anche la diminuzione dell'efficienza all'aumentare del vicinaggio, fatta eccezioni per i valori di NSE relativi ai vicinaggi 20 e 50 relativi alla curva mediana, e la pressoché medesima affidabilità dei due modelli TNDTK nella ricostruzione delle curve.



L'abbattimento dell'efficienza, in termini di NSE, relativa alla P90 dimensionale non è, a prima vista, riscontrabile dall'andamento dei grafici a dispersione riportate in Figura 5.16 (v. pagina seguente), considerato l'elevato addensamento dei valori lungo la bisettrice del primo quadrante, fatta eccezione per i valori più bassi di portata che, comunque, presentavano difficoltà nella ricostruzione anche nel caso delle curve adimensionali. Si può però notare come i 4 valori di portata più elevati si dispongano sensibilmente al di sopra della bisettrice del primo quadrante, a testimonianza di una loro sovrastima a seguito dell'applicazione di entrambi i modelli TNDTK in esame. Per quanto riguarda l'LNSE, i grafici a dispersione in Figura 5.16 confermano quanto visto in Tabella 5.8, ovvero un'efficienza maggiore per la P90 e minore per la P10, visibile, in quest'ultima, dalla minore disposizione dei valori attorno alla bisettrice del primo quadrante per valori di portata bassi.

Curve percentili a vicinaggio 5

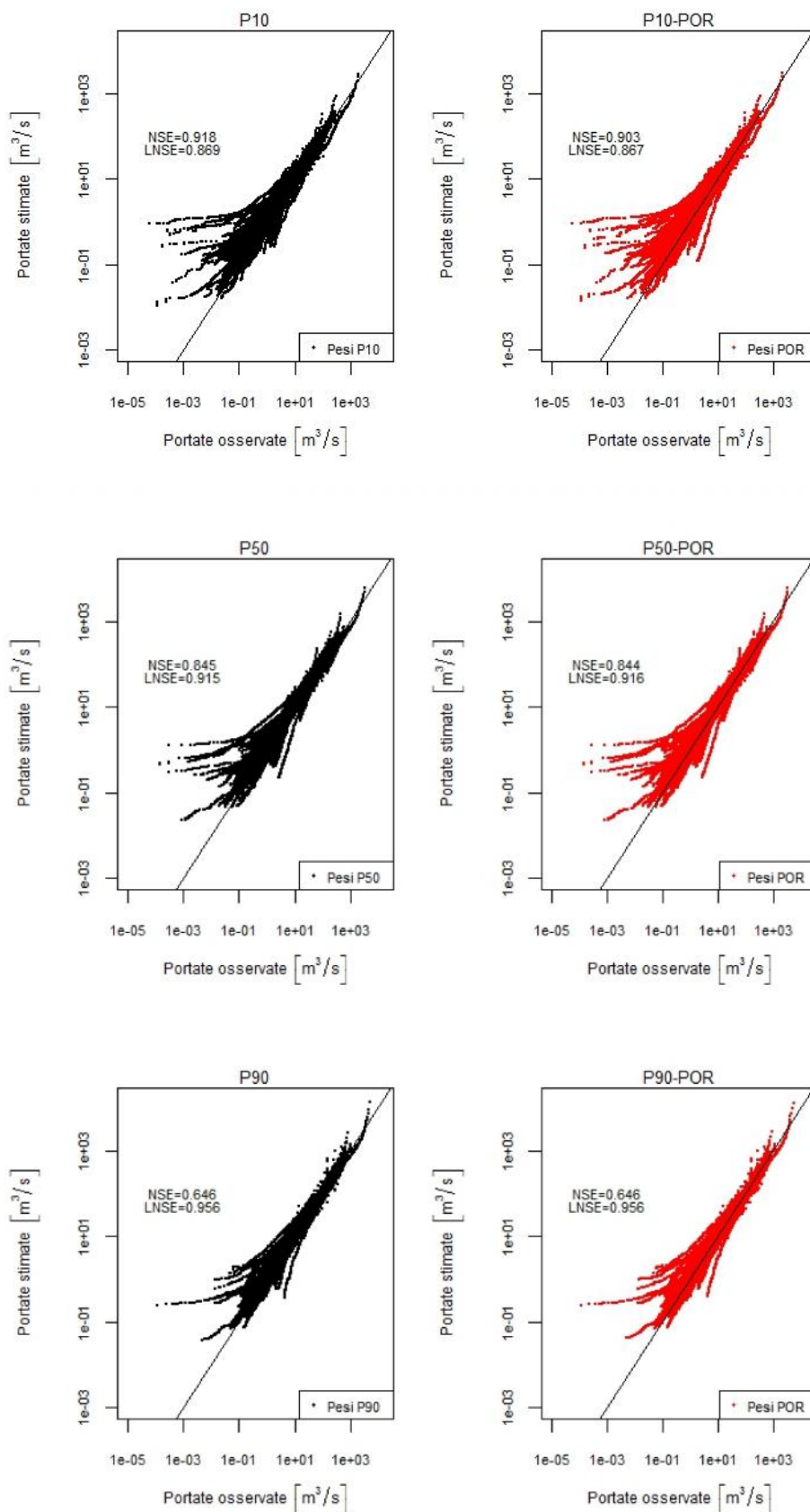
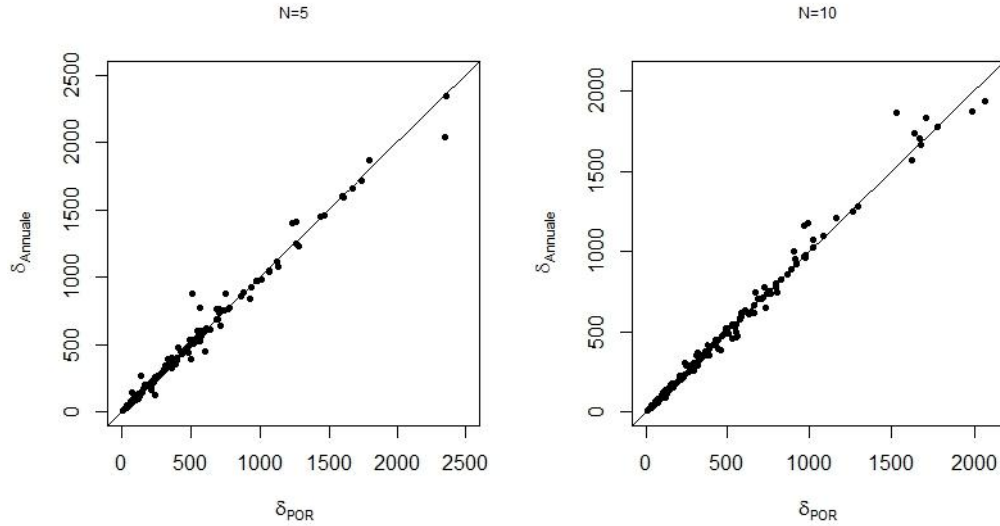
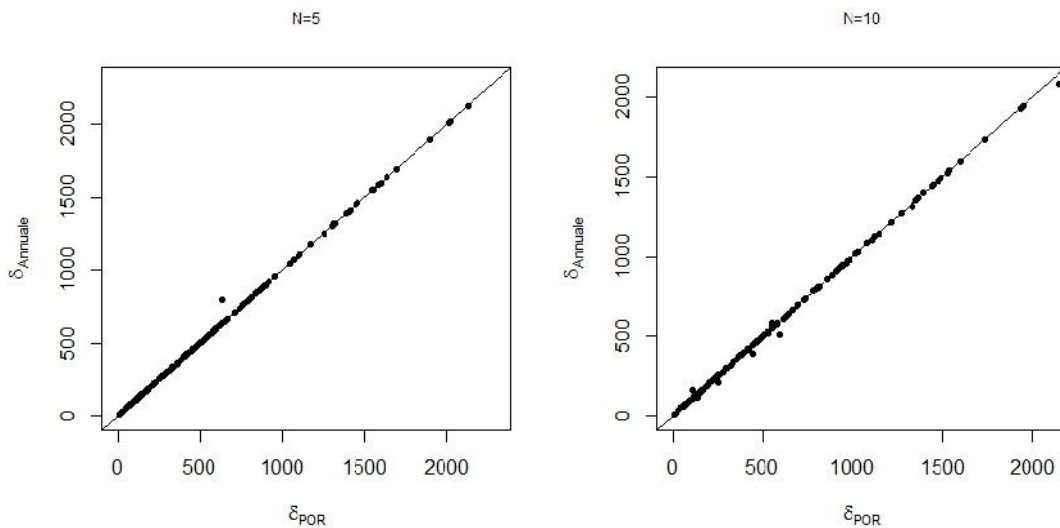


Figura 5.16 : FDC percentili dimensionali ricavate dal MAF stimato stimate e osservate a vicinaggio

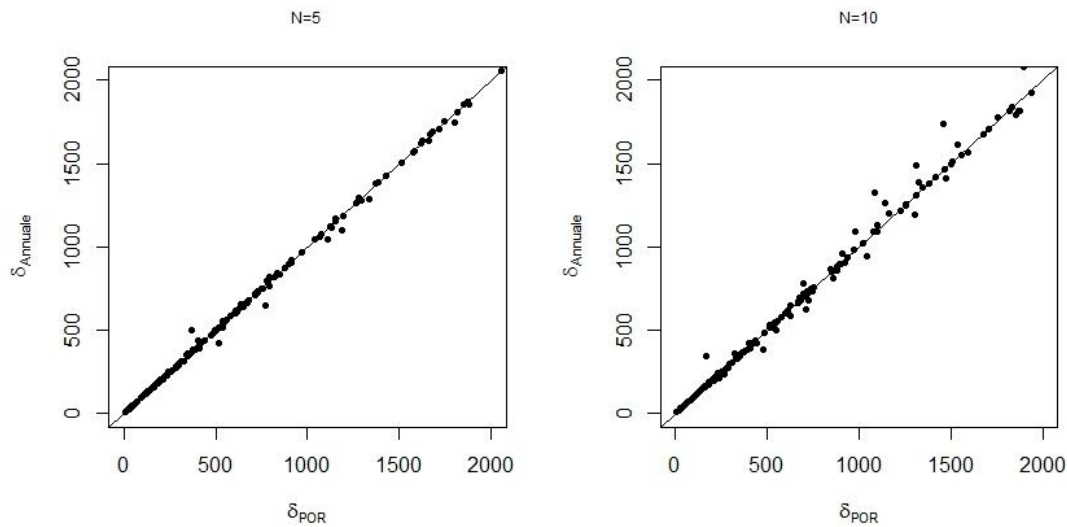
Si riportano di seguito i grafici relativi al confronto fra le efficienze dei due modelli utilizzati nella stima delle tre curve percentili annuali in esame, rese dimensionali tramite il MAF stimato, in termini di errore complessivo come proposto da Ganora et al. (2009).



**Figura 5.17:** Confronto fra i due metodi di stima delle P10 dimensionali tramite il MAF stimato a vicinaggio 5 e 10 in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $\epsilon_{\text{POR}}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\epsilon_{\text{Annuale}}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.



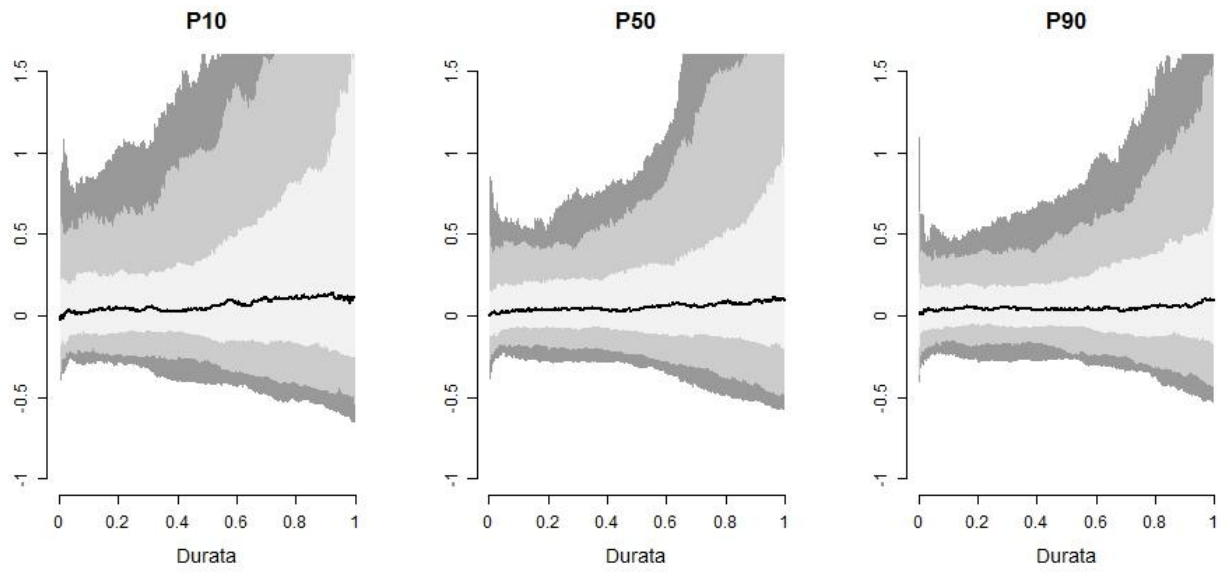
**Figura 5.18:** Confronto fra i due metodi di stima delle P50 dimensionali tramite il MAF stimato a vicinaggio 5 e 10 in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $\epsilon_{\text{POR}}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\epsilon_{\text{Annuale}}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.



**Figura 5.19:** Confronto fra i due metodi di stima delle P90 dimensionali tramite il MAF stimato a vicinaggio 5 e 10 in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.

Le figure 5.17, 5.18, 5.19 evidenziano come il passaggio da curve percentili standardizzate per il MAF a curve dimensionali tramite il MAF stimato col Top-kriging in cross validazione abbia un effetto di riduzione delle differenza di errori tra i due modelli TNDTK proposti, come riscontrabile dal confronto con le Figure 5.7, 5.8 e 5.9.

La Figura 5.20, rappresentante le curve durata-errore per il metodo TK applicato ai TND per il valore 5 di vicinaggio mostra come, a dispetto di quanto visto nella Tabella 5.8, i due modelli TNDTK utilizzati per la ricostruzione delle curve percentili dimensionali generino maggiori errori nella stima della P10 e minori in quella della P90. È confermata, anche in questo caso, la tendenza dei modelli a commettere errori maggiori all'aumentare della durata.



**Figura 5.20:** Stima delle FDC percentili annuali dimensionali ricavate dal MAF attraverso pesi derivanti dal krigaggio dei TND annuali a vicinaggio 5: P10 (destra), P50 (centro), P90 (sinistra); curve errore-durata che riportano il profilo della mediana (linea nera) e delle bande contenenti il 60%, l'80% e il 95% degli errori relativi rappresentate, rispettivamente, dalle tonalità gradualmente più chiare di grigio.

### 5.3.4 Curve dimensionali ricavate dal MAP\*

(a) NSE

$N_{max}$	P10	P50	P90	$N_{max}$	P10-POR	P50-POR	P90-POR
5	0.920	0.858	0.660	5	0.915	0.858	0.660
10	0.898	0.809	0.605	10	0.898	0.809	0.604
20	0.848	0.707	0.480	20	0.845	0.707	0.479
50	0.872	0.758	0.528	50	0.865	0.758	0.526
Modello Ex1				(b) LNSE			
$N_{max}$	P10	P50	P90	$N_{max}$	P10-POR	P50-POR	P90-POR
5	0.859	0.908	0.949	5	0.858	0.908	0.949
10	0.840	0.893	0.942	10	0.843	0.894	0.943
20	0.822	0.882	0.936	20	0.823	0.881	0.935
50	0.798	0.86	0.922	50	0.794	0.862	0.922

**Tabella 5.9:** Pannello (a): NSE relativi alla stima delle FDC dimensionali, ricavate dal MAP\*, percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. Pannello (b): LNSE relativi alla stima delle FDC, ricavate dal MAP\*, percentili annuali  $p=0.1$  (P10),  $p=0.5$  (P50),  $p=0.9$  (P90) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. In entrambi i pannelli a sinistra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND annuali; a destra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND di lungo periodo (POR).

Anche per le curve percentili dimensionali ottenute a partire dal MAP\* si vede come ci sia un ribaltamento di efficienza, in termini di NSE, rispetto alle corrispondenti curve adimensionali (cfr. Paragrafo 5.3.2). Infatti, la P10 adimensionale, che presentava un'efficienza minore in termini di NSE, adesso, come si vede dalla Tabella 5.9, in termini dimensionali, presenta il valore massimo di NSE fra le curve in esame. Confermati sono, ancora una volta, l'uguaglianza fra i due modelli TNDTK utilizzati in termini di prestazione, la diminuzione dell'efficienza all'aumentare del vicinaggio e gli LNSE crescenti all'aumentare del valore di percentile considerato. Dal confronto con la tabella 5.8 si vede, infine come le curve percentili dimensionali ricavate dal MAP\* siano ricostruite con un'efficienza migliore delle corrispondenti dimensionali ricavate dal MAF.

In Figura 5.21, riportata alla pagina seguente, si veda come, anche nel caso delle curve percentili dimensionali ricavate dal MAP\*, la riduzione di circa il 30% in termini di NSE, passando dalla P10 alla P90, evidenziata in Tabella 5.9, non sia riscontrabile nei grafici a dispersione, anche se appare ancora una volta evidente la sovrastima dei valori più alti di portata. La diminuzione in termini di LNSE al decrescere del valore del percentile è, anche in questo caso, confermato dalla presenza di una minore disposizione dei valori, corrispondenti a portate basse, intorno alla bisettrice del primo quadrante.

Curve percentili a vicinaggio 5

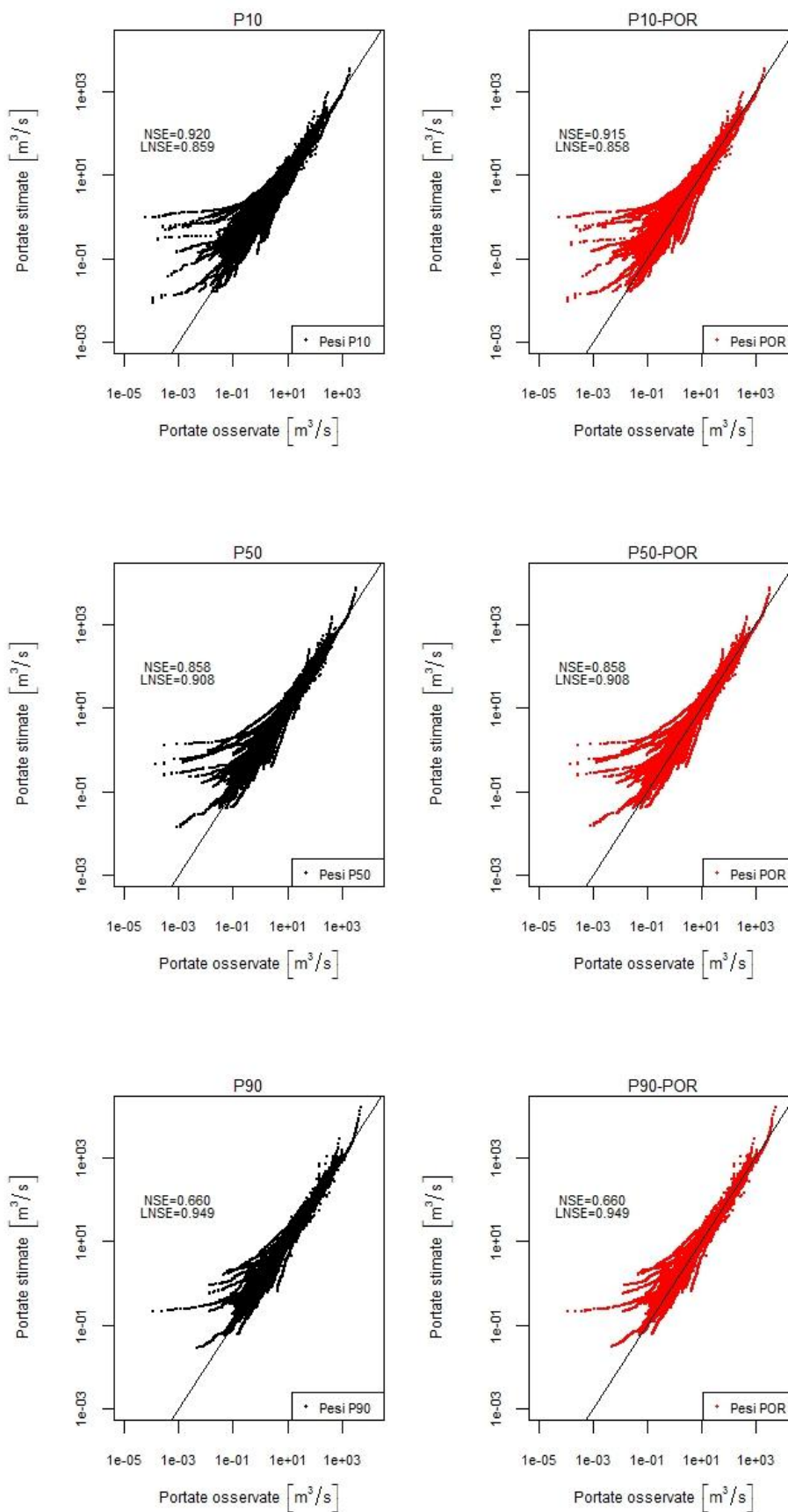
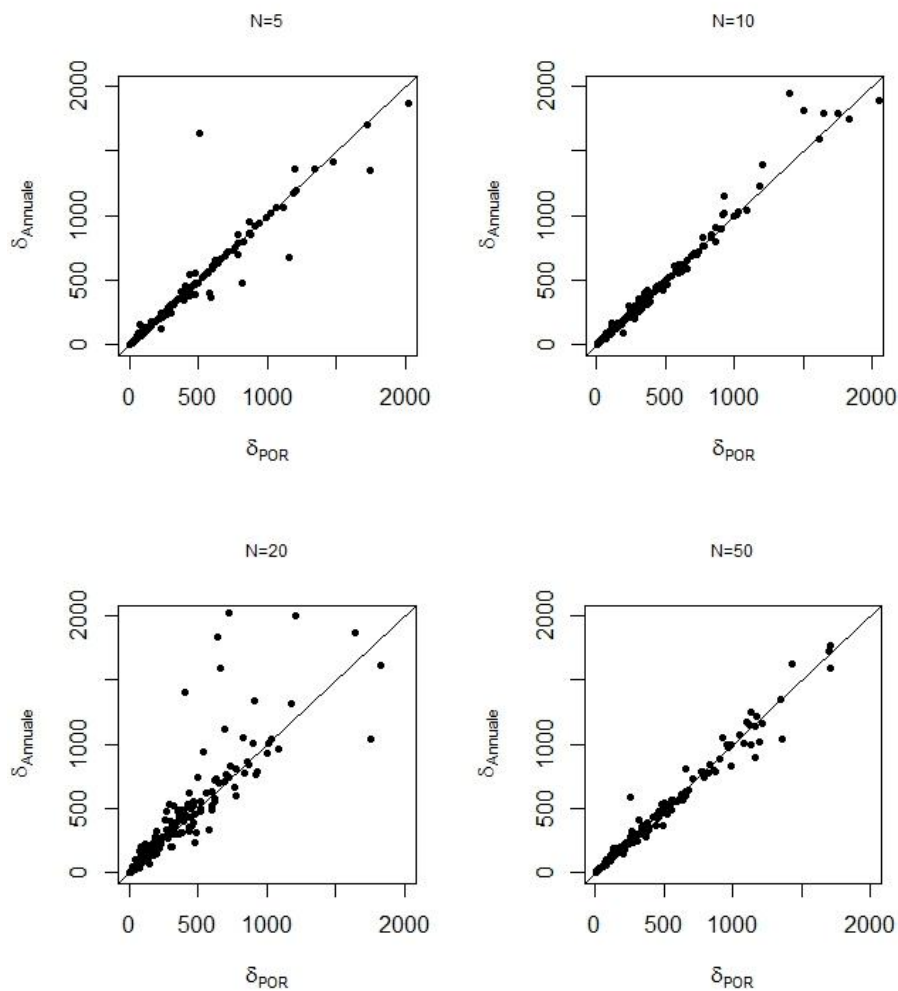


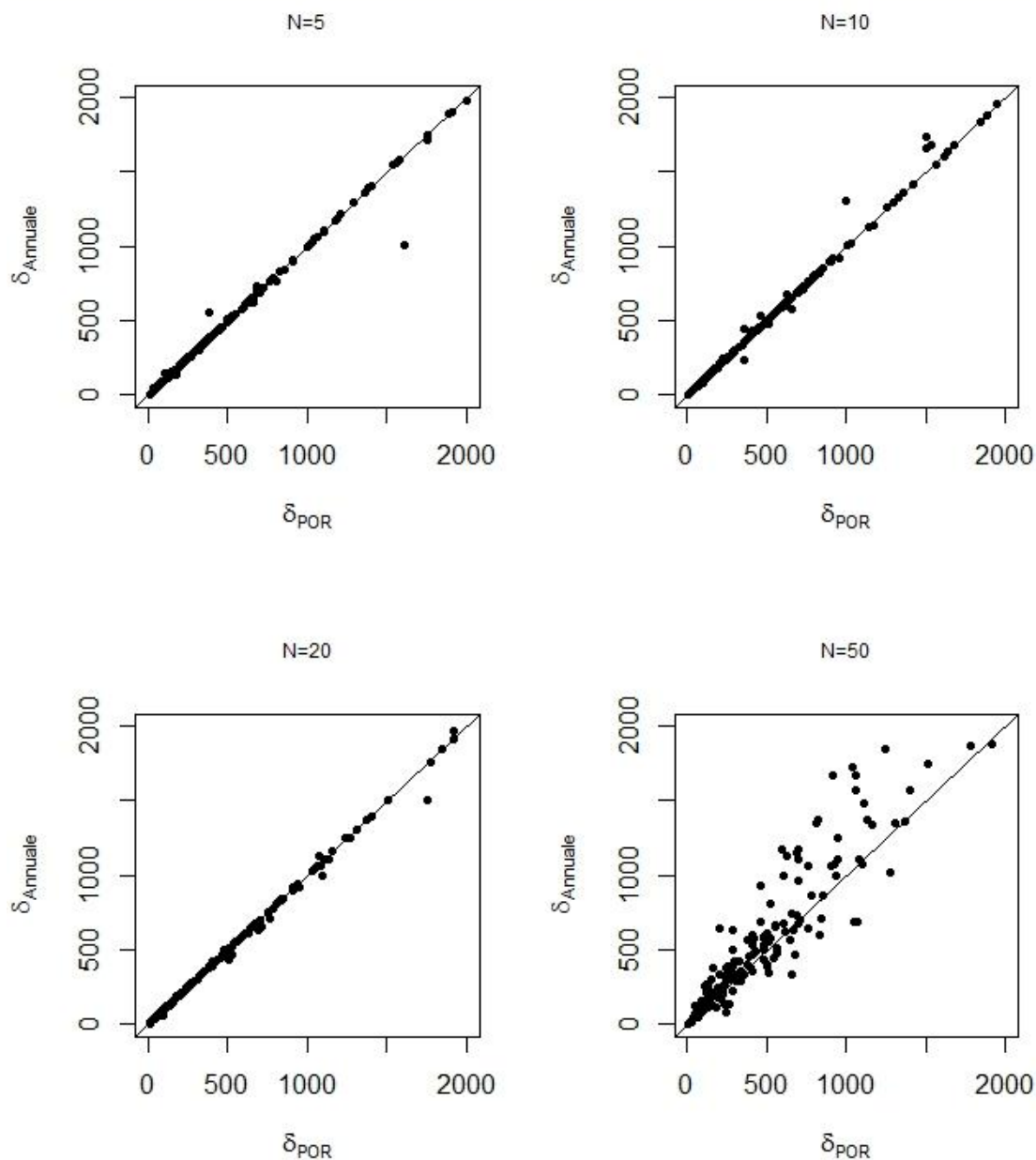
Figura 5.21: FDC percentili dimensionali, ricavate dal MAP\*, stimate e osservate a vicinaggio 5



La Figura 5.22, di seguito riportata, rappresentante il confronto fra le efficienze dei due modelli utilizzati nella stima delle tre curve percentili annuali in esame, rese dimensionali tramite il  $MAP^*$ , in termini di errore complessivo come proposto da Ganora et al. (2009), mostra come la curva P10 dimensionale, ricostruita a partire dal  $MAP^*$ , presenti nella maggior parte dei casi errori molto simili tra i due modelli TNDTK in esame, ma a differenza della corrispondente adimensionale e delle P10 ricavate a partire dal MAF stimato, ci sono diversi bacini che presentano errori nell'applicazione del metodo del Top-kriging ai TND annuali anche doppiamente superiori rispetto all'applicazione dello stesso metodo ai TND di lungo periodo; ciò è riscontrabile in particolare a vicinaggio 20.



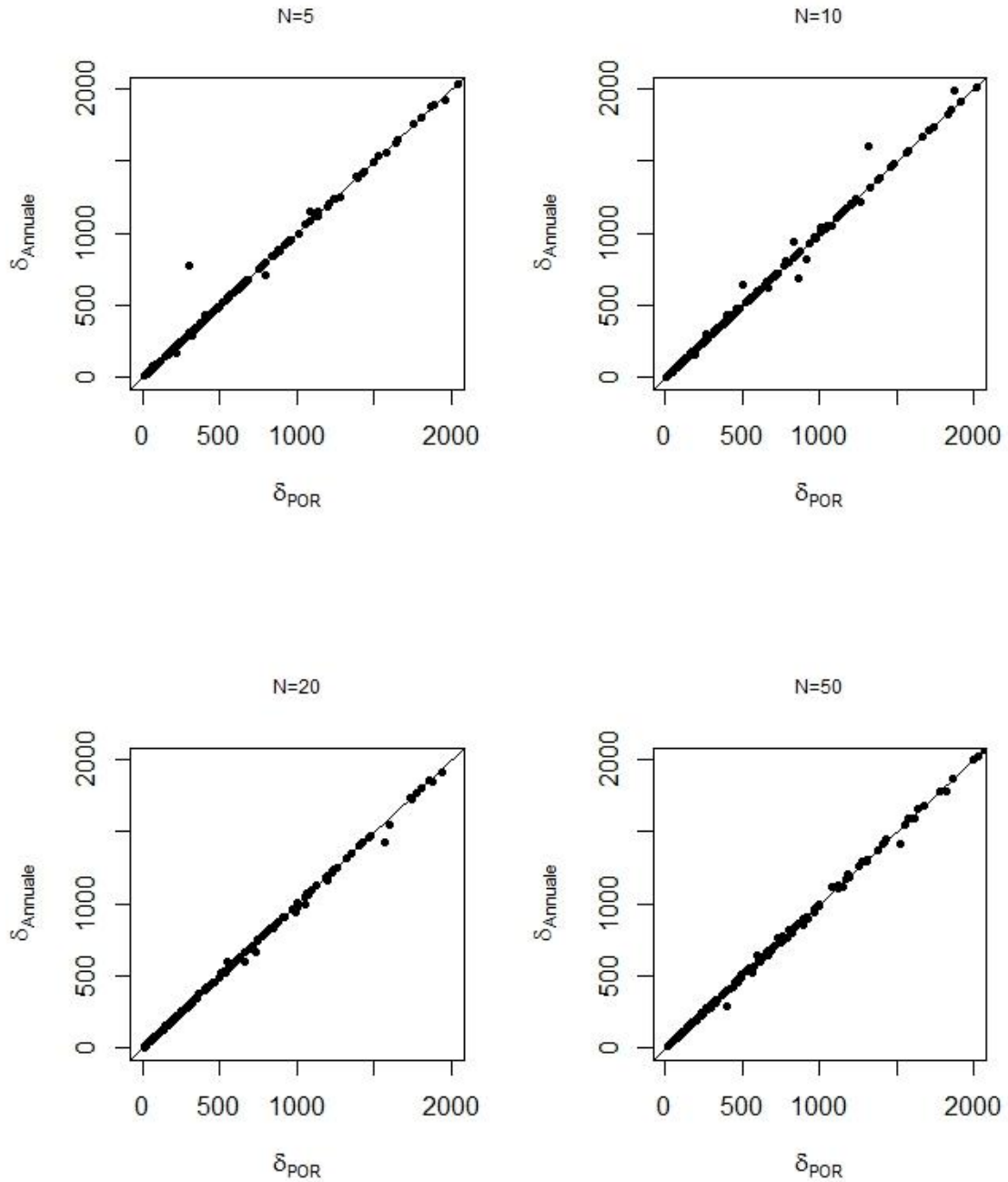
**Figura 5.22:** Confronto fra i due metodi di stima delle P10 dimensionali ricavate dal  $MAP^*$  in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $u_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $u_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.



**Figura 5.23:** Confronto fra i due metodi di stima delle P50 dimensionali ricavate dal MAP\* in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $\delta_{\text{POR}}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{\text{Annuale}}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.

L'applicazione dei due modelli TNDTK per la costruzione delle curve P50 dimensionali ricavate dal MAP\*, come illustrato in Figura 5.23, conferma la tendenza ad avere errori di

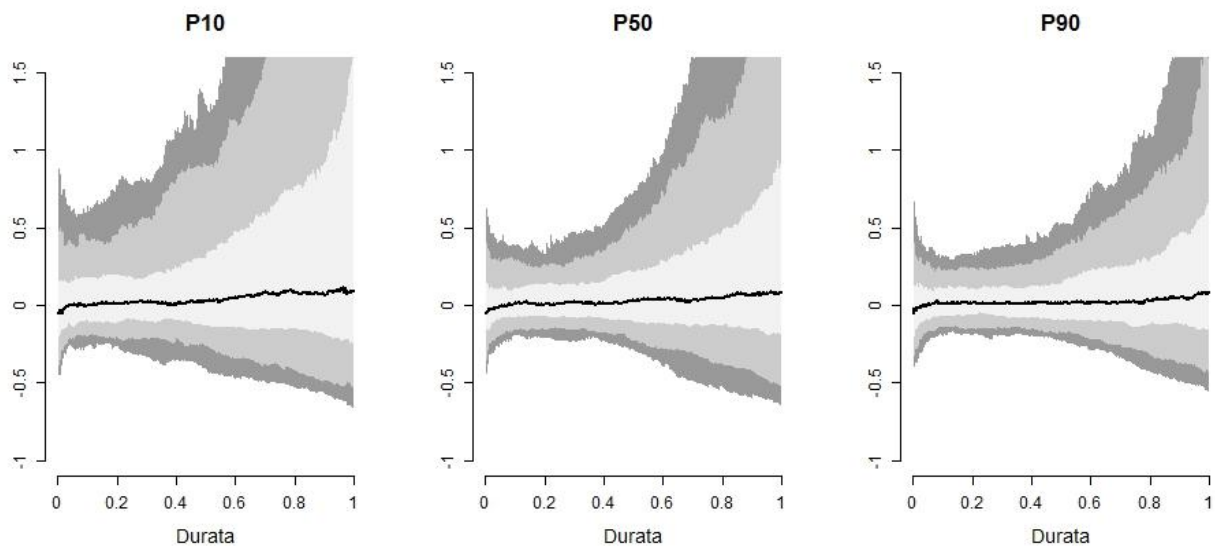
stima molto simili, fatta eccezione per l'applicazione a vicinaggio 50 dove si ha una tendenza ad avere errori maggiori nel caso del modello del Top-kriging applicato ai TND annuali.



**Figura 5.24:** Confronto fra i due metodi di stima delle P90 dimensionali ricavate dal MAP\* in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $u_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $u_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.

Nel caso della P90, come visibile dalla Figura 5.24, i due modelli presentano errori di stima praticamente analoghi a tutti i vicinaggi, in particolare a 20 e 50.

Riportiamo, di seguito, le curve durata - errori sempre relativi al metodo TNDTK applicato ai TND annuali a vicinaggio 5:



**Figura 5.25:** Stima delle FDC percentili annuali dimensionali ricavate dal MAF attraverso pesi derivanti dal krigaggio dei TND annuali a vicinaggio 5: P10 (destra), P50 (centro), P90 (sinistra); curve errore-durata che riportano il profilo della mediana (linea nera) e delle bande contenenti il 60%, l'80% e il 95% degli errori relativi rappresentate, rispettivamente, dalle tonalità gradualmente più chiare di grigio.

Si vede, anche in questo caso, l'entità maggiore degli errori commessi nel caso della ricostruzione della P10 e l'aumento dell'errore all'aumentare della durata.

## 5.4 Stima delle curve stagionali

Nel presente paragrafo riportiamo i risultati ottenuti nella stima delle curve stagionali, adimensionali e dimensionali, seguendo la stessa impostazione del paragrafo 5.3 sulle curve percentili annuali.

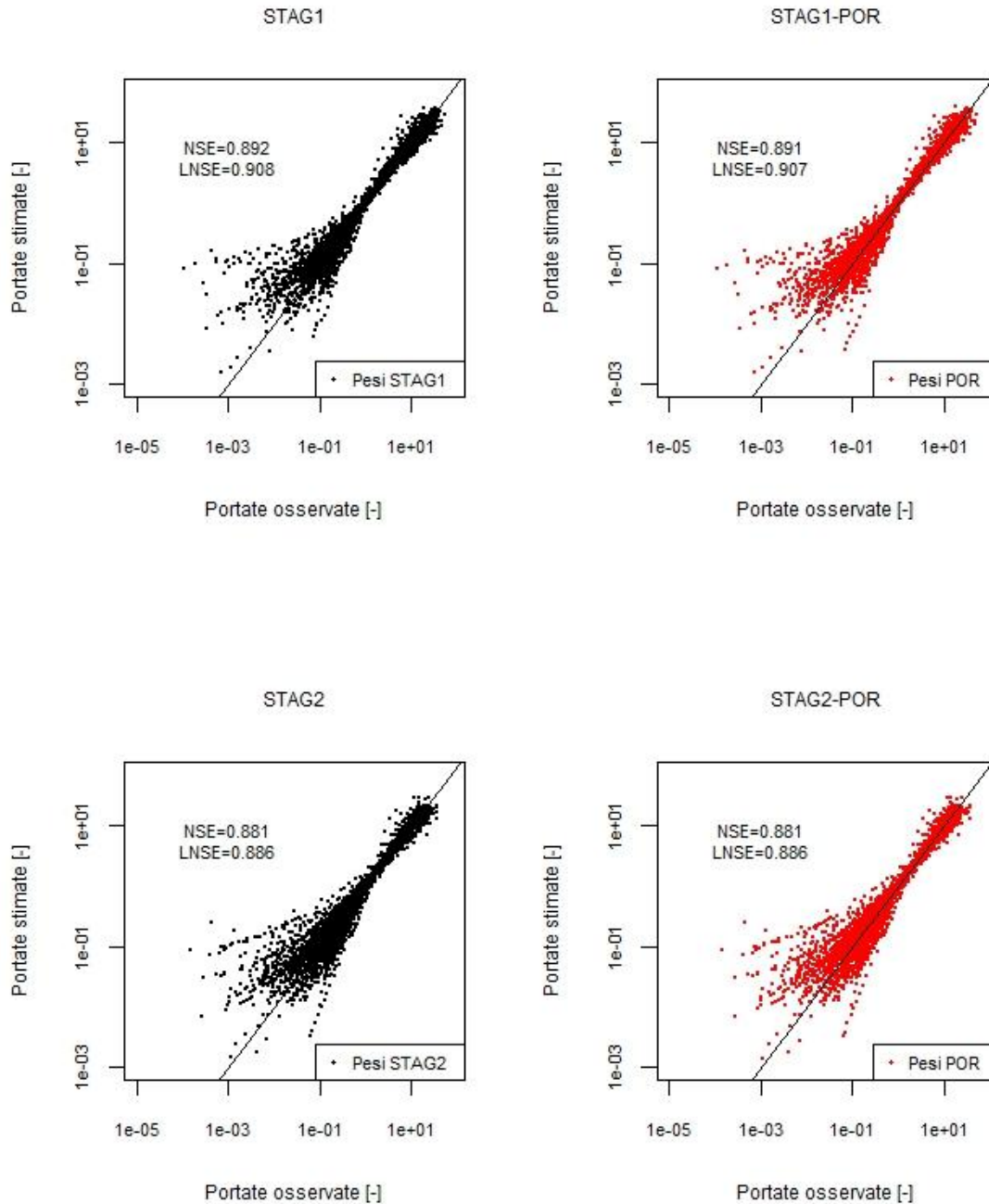
### 5.4.1 Standardizzazione per MAF

(a) NSE					
$N_{\max}$	STAG 1	STAG 2	$N_{\max}$	POR-STAG 1	POR-STAG 2
<b>5</b>	0.892	0.881	<b>5</b>	0.891	0.881
<b>10</b>	0.89	0.886	<b>10</b>	0.89	0.886
<b>20</b>	0.885	0.886	<b>20</b>	0.885	0.886
<b>50</b>	0.871	0.881	<b>50</b>	0.87	0.88
(b) LNSE					
$N_{\max}$	STAG 1	STAG 2	$N_{\max}$	POR-STAG 1	POR-STAG 2
<b>5</b>	0.908	0.886	<b>5</b>	0.907	0.886
<b>10</b>	0.897	0.877	<b>10</b>	0.897	0.876
<b>20</b>	0.884	0.864	<b>20</b>	0.884	0.864
<b>50</b>	0.866	0.846	<b>50</b>	0.866	0.844

**Tabella 5.10:** *Pannello (a): NSE relativi alla stima delle FDC relative alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2), standardizzate con MAF, in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{\max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. Pannello (b): LNSE relativi alla stima delle FDC relative alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2), standardizzate per il MAF, in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{\max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. In entrambi i pannelli a sinistra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND stagionali; a destra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND di lungo periodo (POR).*

La Tabella 5.10 mostra efficienze di stima delle FDC stagionali standardizzate per il MAF, sia in termini di NSE che di LNSE, molto elevate. In particolare si vede che la Stagione 1 (autunnale-invernale) è ricostruita in modo leggermente più affidabile della Stagione 2 (primaverile-estiva). Come visto per le percentili, anche in questo caso si ha una diminuzione dell'efficienza all'aumentare del vicinaggio e una affidabilità pressoché uguale tra i due modelli TNDTK utilizzati.

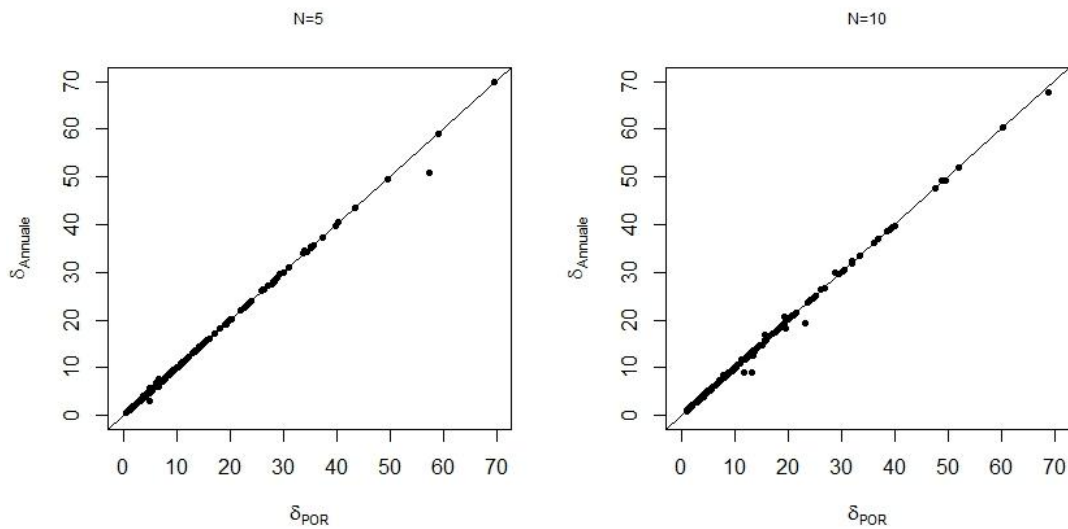
## Curve stagionali a vicinaggio 5



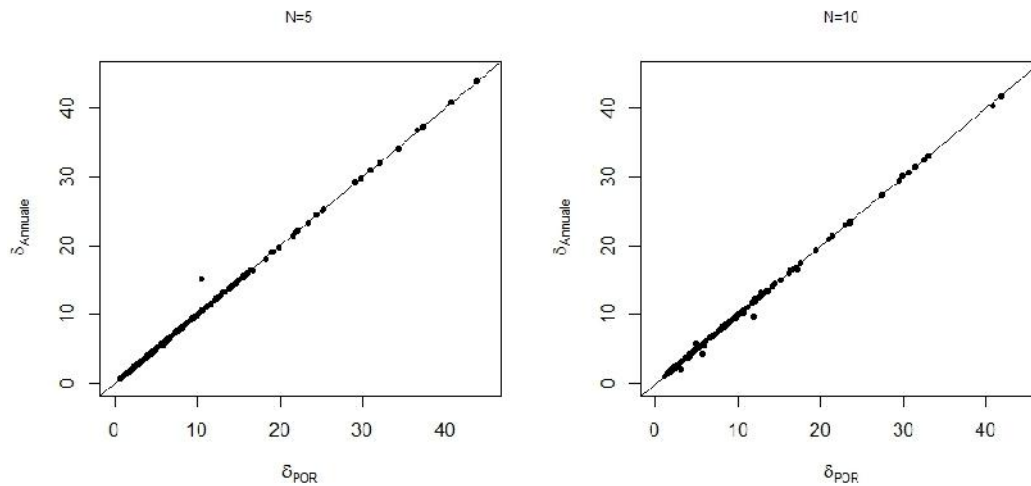
*Figura 5.26 : FDC stagionali, standardizzate per il MAF, stimate e osservate a vicinaggio 5*

I grafici riportati in Figura 5.26, mostrano una sostanziale uguaglianza in termini di ricostruzione delle curve di durata stagionali adimensionalizzate per il MAF. Si vede come vengano meglio stimate i valori grandi dei quantili di portata rispetto a quelli bassi e ciò lo si vede da una minore addensamento di tali valori sulla bisettrice del primo quadrante.

Le Figure 5.27 e 5.28 mostrano il confronto fra le efficienze dei due modelli utilizzati nella stima delle due curve stagionali standardizzate per il MAF, in termini di errore complessivo come proposto da Ganora et al. (2009). Si vede come, sia per la Stagione 1 che per la Stagione 2 i due metodi risultino essere equivalenti in termini di errori di stima commessi, fatta eccezione per pochissimi bacini visualizzabili specialmente a vicinaggio 5. I grafici a vicinaggio 20 e 50 non sono riportati perché del tutto analoghi a quelli relativi ai vicinaggi 5 e 10.

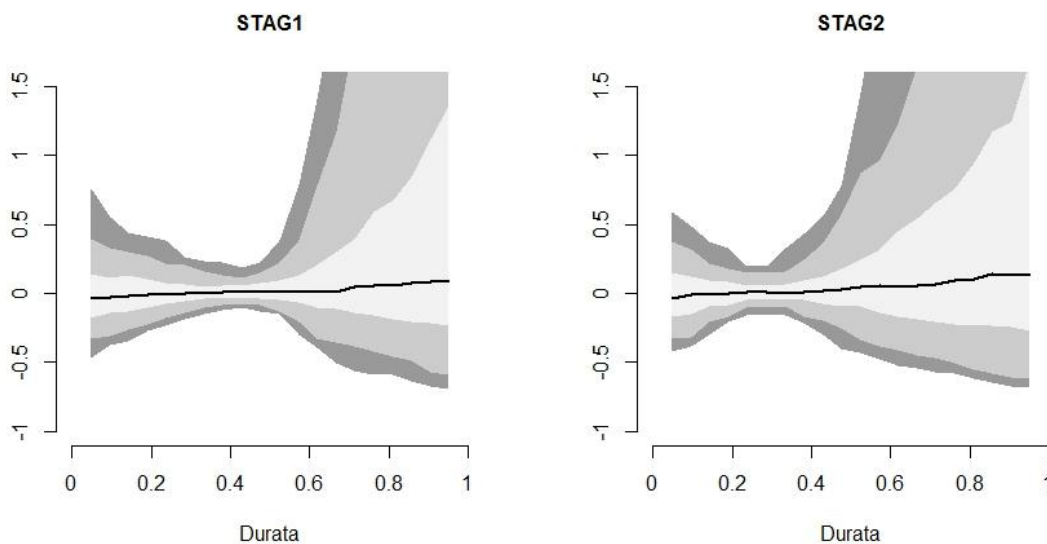


**Figura 5.27:** Confronto fra i due metodi di stima delle FDC-STAG1 standardizzate per il MAF in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.



**Figura 5.28:** Confronto fra i due metodi di stima delle FDC-STAG2 standardizzate per il MAF in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali

Riportiamo, ora, le curve durate-errori relative al vicinaggio 5 per il modello TK applicato ai TND a annuali:



**Figura 5.29:** Stima delle FDC stagionali adimensionalizzate con MAF attraverso pesi derivanti dal krigaggio dei TND annuali a vicinaggio 5: Stagione 1 (destra); Stagione (2) sinistra. Curve errore-durata che riportano il profilo della mediana (linea nera) e delle bande contenenti il 60%, l'80% e il 95% degli errori relativi rappresentate, rispettivamente, dalle tonalità gradualmente più chiare di grigio.



Il grafico in Figura 5.29 mostra che gli errori commessi nella stima della FDC della stagione 2 sono leggermente maggiori rispetto a quelli commessi nella stima della FDC della stagione 1. Inoltre si vede come gli errori aumentino diminuiscano fino alla durata 0.4 per poi crescere.

#### 5.4.2 Standardizzazione per MAP\*

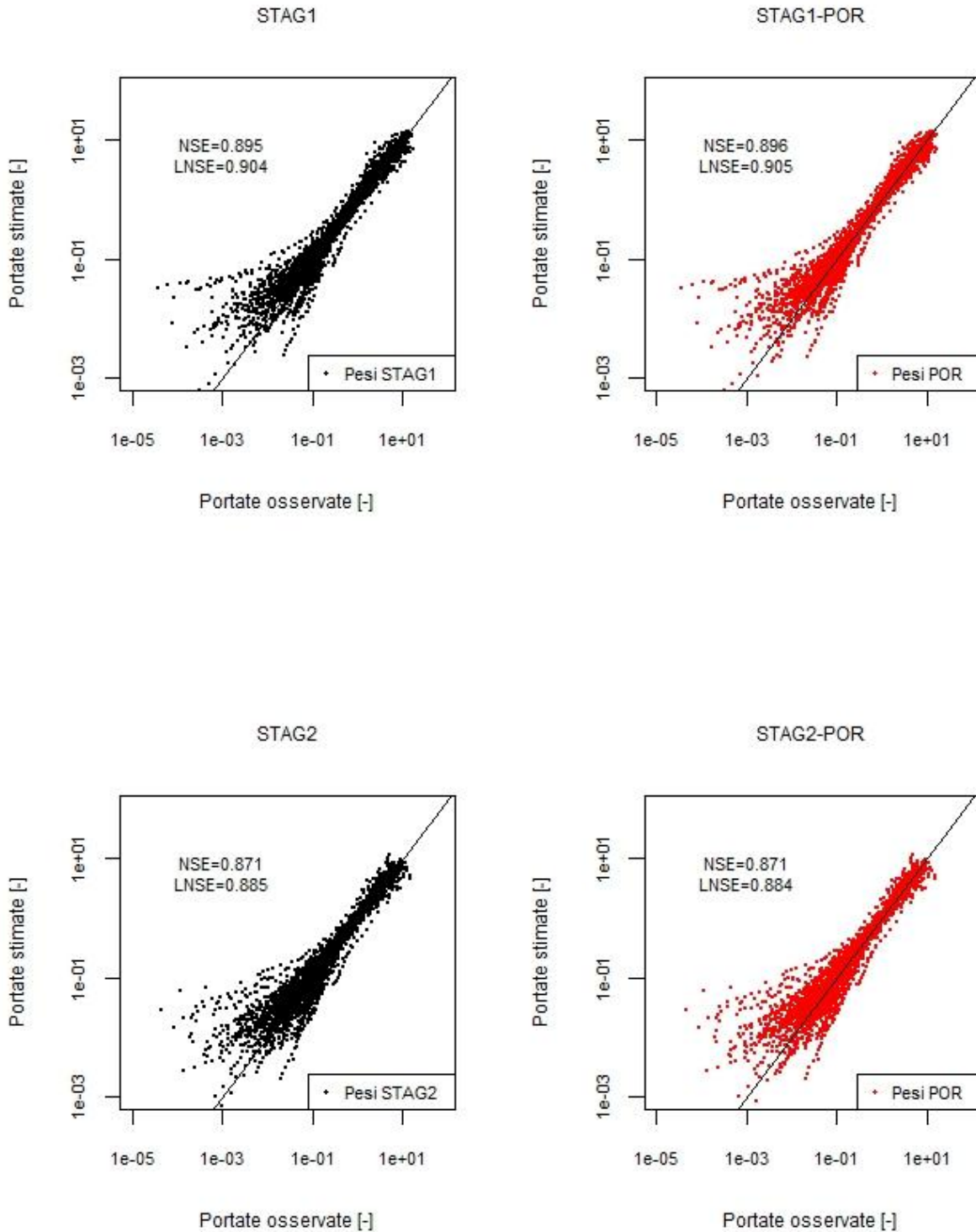
(a) NSE					
$N_{max}$	STAG 1	STAG 2	$N_{max}$	POR-STAG 1	POR-STAG 2
<b>5</b>	0.895	0.871	<b>5</b>	0.896	0.871
<b>10</b>	0.896	0.871	<b>10</b>	0.897	0.873
<b>20</b>	0.896	0.872	<b>20</b>	0.896	0.871
<b>50</b>	0.891	0.868	<b>50</b>	0.892	0.868
(b) LNSE					
$N_{max}$	STAG 1	STAG 2	$N_{max}$	POR-STAG 1	POR-STAG 2
<b>5</b>	0.904	0.885	<b>5</b>	0.905	0.884
<b>10</b>	0.891	0.871	<b>10</b>	0.892	0.871
<b>20</b>	0.876	0.855	<b>20</b>	0.876	0.854
<b>50</b>	0.856	0.830	<b>50</b>	0.855	0.830

**Tabella 5.11:** *Pannello (a): NSE relativi alla stima delle FDC relative alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2), standardizzate con MAP\*, in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. Pannello (b): LNSE relativi alla stima delle FDC relative alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2), standardizzate per il MAF, in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. In entrambi i pannelli a sinistra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND stagionali; a destra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND di lungo periodo (POR).*

La Tabella 5.11 evidenzia come, anche nel caso della standardizzazione per il MAP\*, la ricostruzione delle curve relative alla stagione autunnale-invernale produca efficienze leggermente superiori rispetto alla ricostruzione di quelle relative alla stagione primaverile-estiva, sia in termini di NSE che di LNSE. Anche in questo caso è confermata l'uguaglianza pressoché totale delle prestazioni dei due modelli TNDTK utilizzati.

Di seguito riportiamo i diagrammi di dispersione relativi al confronto tra le curve osservate e stimate a vicinaggio 5.

## Curve stagionali a vicinaggio 5

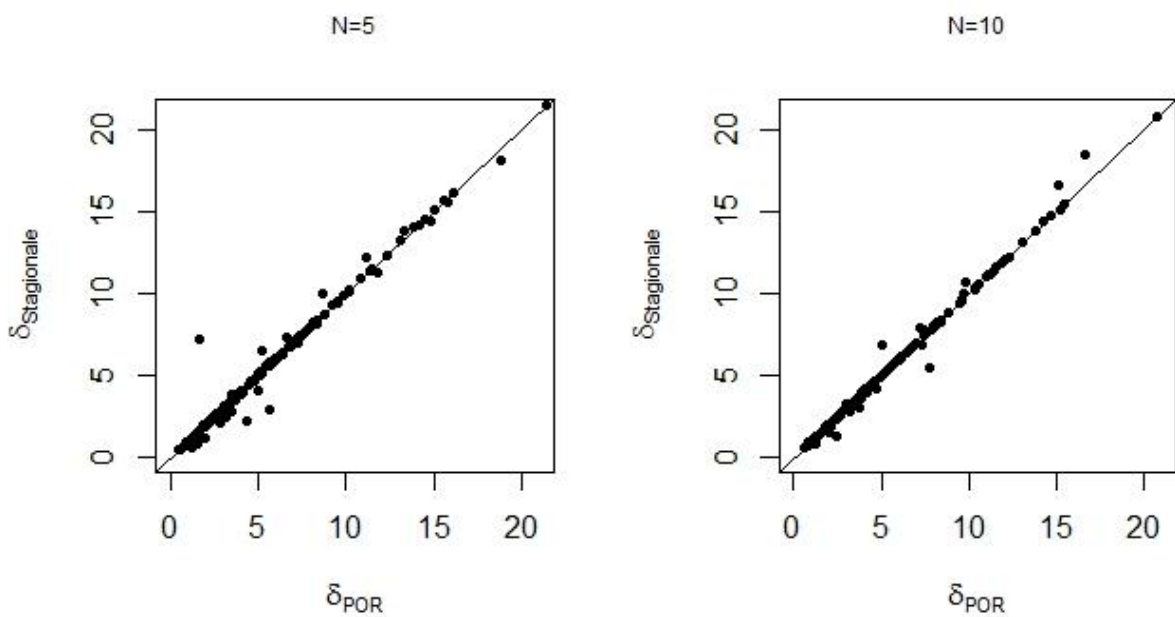


**Figura 5.30 :** FDC stagionali, standardizzate per il  $MAP^*$ , stimate e osservate a vicinaggio 5

I grafici in Figura 5.30, relativi alle curve standardizzate per il  $MAP^*$ , presentano un andamento praticamente analogo a quanto visto per le curve standardizzate per il MAF in

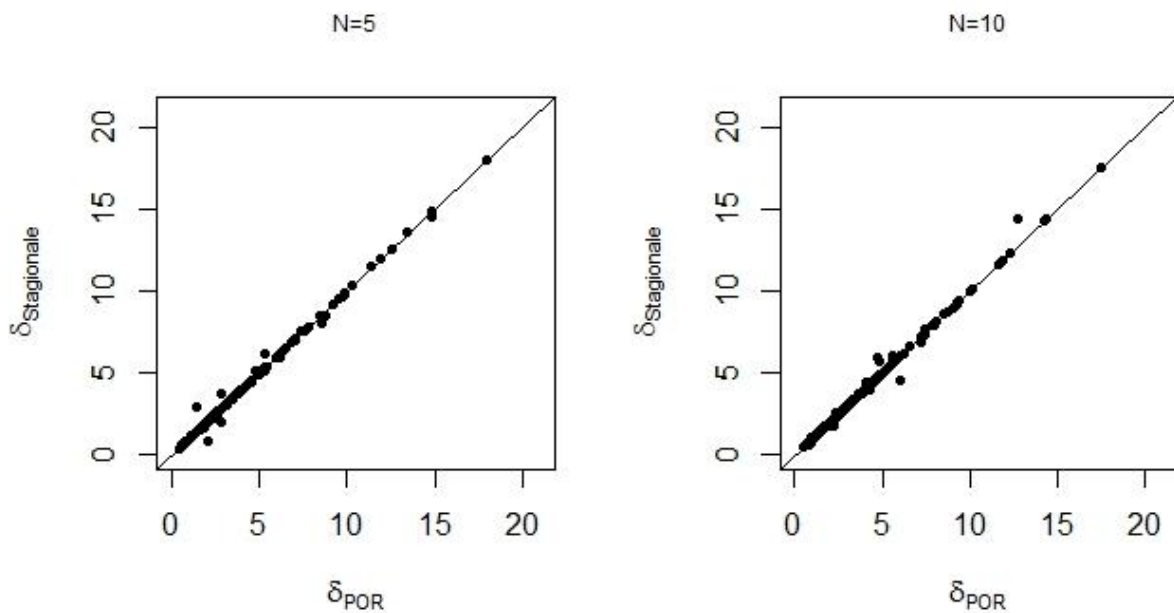
Figura 5.26. Si vede, infatti, che, per entrambi i modelli utilizzati, la ricostruzione è particolarmente affidabile nel caso di quantili adimensionali di portata elevati in entrambe le stagioni, mentre, nel caso di portate standardizzate basse, si hanno ricostruzioni peggiori in particolare per la stagione primaverile-estiva.

Vediamo ora, sempre attraverso la valutazione dell'errore complessivo come illustrato da Ganora et al. (2009), cosa succede in termini di differenze di prestazioni fra i due modelli in esame:



**Figura 5.31:** Confronto fra i due metodi di stima delle FDC-STAG1 standardizzate per il MAP\* in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame a vicinaggio 5 e 10.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.

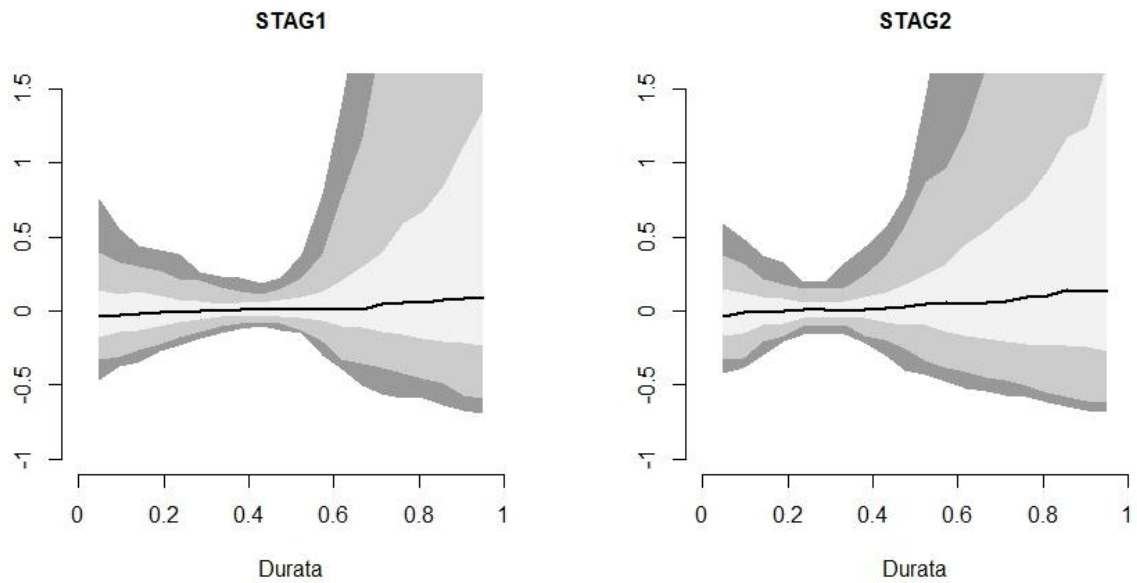
La Figura 5.31 evidenzia come gli errori commessi dai due modelli in esame, nella ricostruzione della curva di durata relativa alla Stagione autunnale-invernale, siano quasi del tutto identici per la gran parte dei bacini. Sono però visibili 3 bacini a vicinaggio 10 e un bacino a vicinaggio 5 per i quali il Top-Kriging applicato ai TND stagionali produce errori sensibilmente maggiori rispetto all'altro modello utilizzato.



**Figura 5.32:** Confronto fra i due metodi di stima delle FDC-STAG2 standardizzate per il MAP\* in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame a vicinaggio 5 e 10.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Annuale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi percentili annuali.

Si vede, dalla Figura 5.32, come quanto visto per la ricostruzione delle curve relative alla stagione autunnale-invernale sia visibile anche nel caso delle curve relative alla stagione primaverile-estiva. In questo caso sono meno evidenti bacini con errori sensibilmente maggiori da parte di un modello rispetto all'altro.

Riportiamo, infine, l'andamento delle curve durata-errore nel caso del modello TNDTK applicato ai TND stagionali.



**Figura 5.33:** Stima delle FDC stagionali adimensionalizzate con  $MAP^*$  attraverso pesi derivanti dal krigaggio dei TND annuali a vicinaggio 5: Stagione 1 (destra); Stagione (2) sinistra. Curve errore-durata che riportano il profilo della mediana (linea nera) e delle bande contenenti il 60%, l'80% e il 95% degli errori relativi rappresentate, rispettivamente, dalle tonalità gradualmente più chiare di grigio.

L'andamento degli errori, in Figura 5.33, è praticamente analogo a quanto visto, in Figura 5.29, nel caso delle curve standardizzate per il MAF. Si vede, infatti, come gli errori tendano a decrescere fino ad una durata di 0.4 nel caso della Stagione 1 e 0.3 in quello della stagione 2 per poi crescere all'aumentare della durata stessa.

### 5.4.3 Curve dimensionali ricavate dal MAF stimato

(a) NSE

$N_{max}$	STAG 1	STAG 2	$N_{max}$	POR-STAG 1	POR-STAG 2
<b>5</b>	0.597	0.915	<b>5</b>	0.595	0.914
<b>10</b>	0.588	0.878	<b>10</b>	0.588	0.878
<b>20</b>	0.500	0.798	<b>20</b>	0.499	0.799
<b>50</b>	0.463	0.79	<b>50</b>	0.462	0.784

(b) LNSE

$N_{max}$	STAG 1	STAG 2	$N_{max}$	POR-STAG 1	POR-STAG 2
<b>5</b>	0.925	0.909	<b>5</b>	0.925	0.910
<b>10</b>	0.916	0.902	<b>10</b>	0.916	0.901
<b>20</b>	0.906	0.892	<b>20</b>	0.906	0.891
<b>50</b>	0.893	0.877	<b>50</b>	0.893	0.877

**Tabella 5.12:** *Pannello (a):* NSE relativi alla stima delle FDC dimensionali, ricavate dal MAF stimato, relative alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2, in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. *Pannello (b):* LNSE relativi alla stima delle FDC dimensionali ricavate dal MAF stimato relative alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. In entrambi i pannelli a sinistra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND stagionali; a destra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND di lungo periodo (POR).

Passando da curve adimensionali, standardizzate per il MAF, alle corrispondenti curve dimensionali, a seguito della stima del MAF tramite il Top-kriging in cross-validazione, si vede, dalla Tabella 5.12, come siano, in tal caso, le curve relative alla stagione autunnale-invernale ad essere peggio stimate in termini di NSE, mentre quelle relative alla Stagione primaverile-estiva raggiungono efficienze molto elevate. In termini di LNSE, invece, si confermano efficienze leggermente migliori per la stima delle FDC relative alla Stagione 1 rispetto a quelle relative alla Stagione 2.

Si riportano, di seguito, i grafici a dispersione relativi al confronto fra le curve dimensionali stimate a vicinaggio 5 e osservate per i 182 bacini in esame:

### Curve stagionali a vicinaggio 5

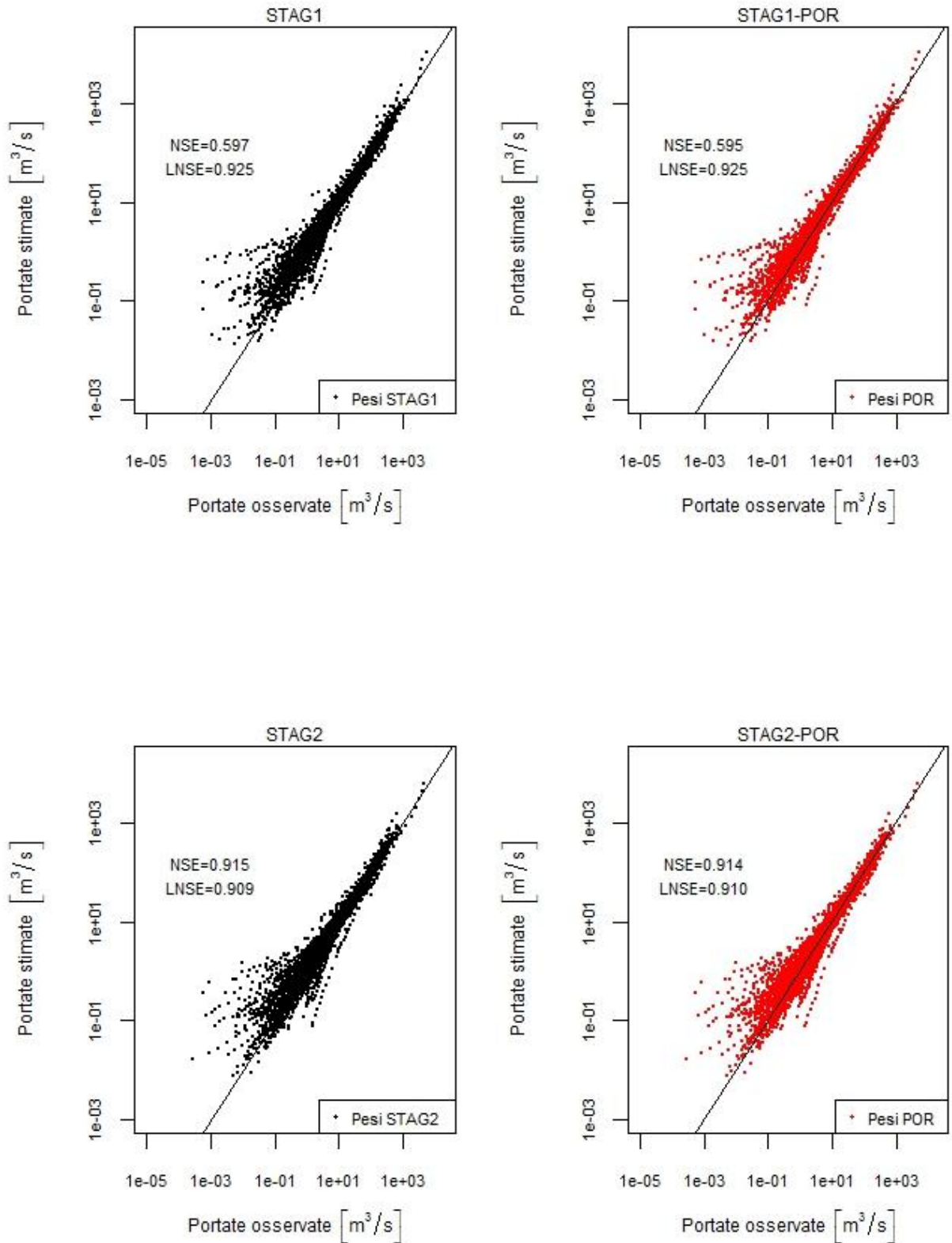
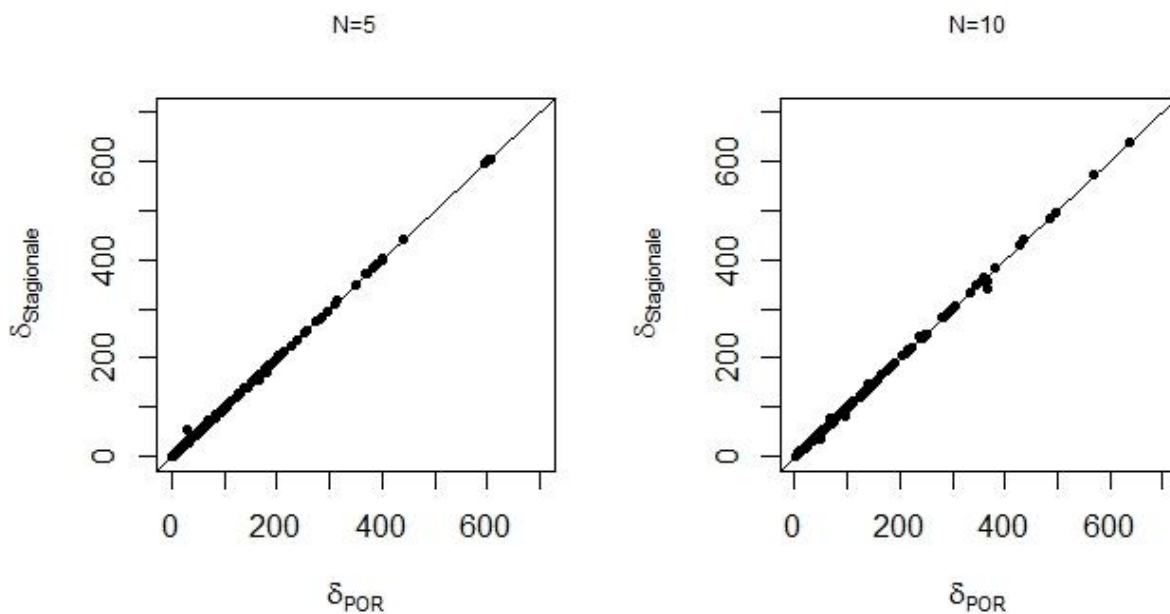


Figura 5.34 : FDC stagionali dimensionali, ricavate dal MAF stimato, osservate e stimate a vicinaggio 5

La Figura 5.34 smentisce, a prima vista, quanto visto nella Tabella 5.12 in termini di NSE; infatti si vede come, sia per la Stagione 1 che per la Stagione 2, i due modelli, sempre molto simili in termini di prestazioni, restituiscano valori particolarmente addensati sulla bisettrice del primo quadrante. Tuttavia si vede come, nel caso della FDC relativa alla Stagione 1, e come già si era notato nel caso della P90 dimensionale ricavata dal MAF stimato in Figura 5.16, sia presente una evidente sovrastima dei tre valori più alti di portata, come visto per le corrispondenti curve percentili P90. Si vede, invece, come le curve relative alla Stagione 1 siano meglio ricostruite, nel caso di valori bassi di portata, rispetto a quelle della stagione 2 e ciò conferma quanto visto, in termini di LNSE, nella Tabella 5.12.

Vediamo cosa succede in termini di confronto fra gli errori complessivi commessi dai due modelli attraverso la metodologia proposta da Ganora et al. (2009):



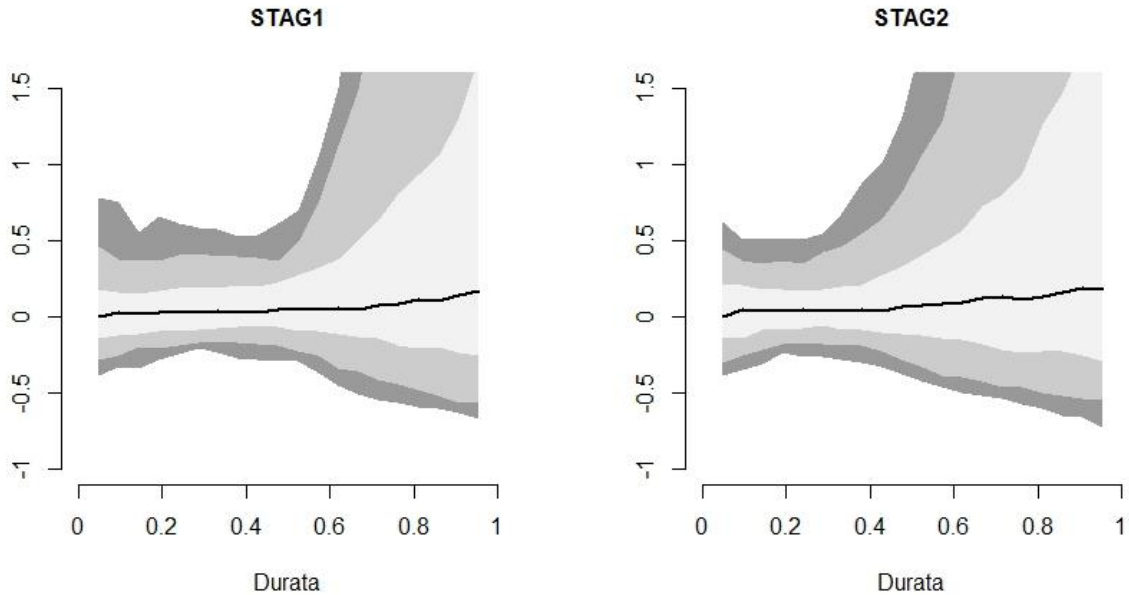
**Figura 5.35:** Confronto fra i due metodi di stima delle FDC-STAG1 dimensionali ricavate dal MAF stimato in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame a vicinaggio 5 e 10.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Stagionale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi stagionali.

La Figura 5.35 mostra come gli errori commessi dai due modelli TNDTK utilizzati per la ricostruzione delle curve dimensionali, nel caso di quelle ottenute dalla stima del MAF, siano



praticamente identici. Non viene riportato il caso relativo alla Stagione 2 in quanto praticamente identico a quello relativo alla Figura 5.35.

Si riportano, di seguito, le curve durata-errori relative al metodo del Top-kriging applicato ai TND stagionali:



**Figura 5.36:** Stima delle FDC stagionali dimensionali ricavate dal MAF stimato attraverso pesi derivanti dal krigaggio dei TND annuali a vicinaggio 5: Stagione 1 (destra); Stagione (2) sinistra. Curve errore-durata che riportano il profilo della mediana (linea nera) e delle bande contenenti il 60%, l'80% e il 95% degli errori relativi rappresentate, rispettivamente, dalle tonalità gradualmente più chiare di grigio.

Il grafico in Figura 5.36 smentisce quanto vista nella Tabella 5.12 in termini di NSE. Infatti si vede come l'apertura delle bande d'errore, e conseguentemente l'errore commesso nella stima, si maggiore nel caso della Stagione 2 rispetto alla Stagione 1. Confermato, rispetto al caso delle curve stagionali standardizzate per il MAF, la decrescenza degli errori fino a una durata di 0.4 nel caso della stagione autunnale-invernale e 0.3 nel caso della stagione primaverile estiva per poi, in entrambi i casi, crescere all'aumentare della durata stessa.

#### 5.4.4 Curve dimensionali ricavate dal MAP\*

(a) NSE

$N_{max}$	STAG 1	STAG 2	$N_{max}$	POR-STAG 1	POR-STAG 2
5	0.159	0.733	5	0.159	0.733
10	-0.014	0.610	10	-0.016	0.607
20	-0.442	0.428	20	-0.444	0.427
50	-0.23	0.469	50	-0.237	0.466

(b) LNSE

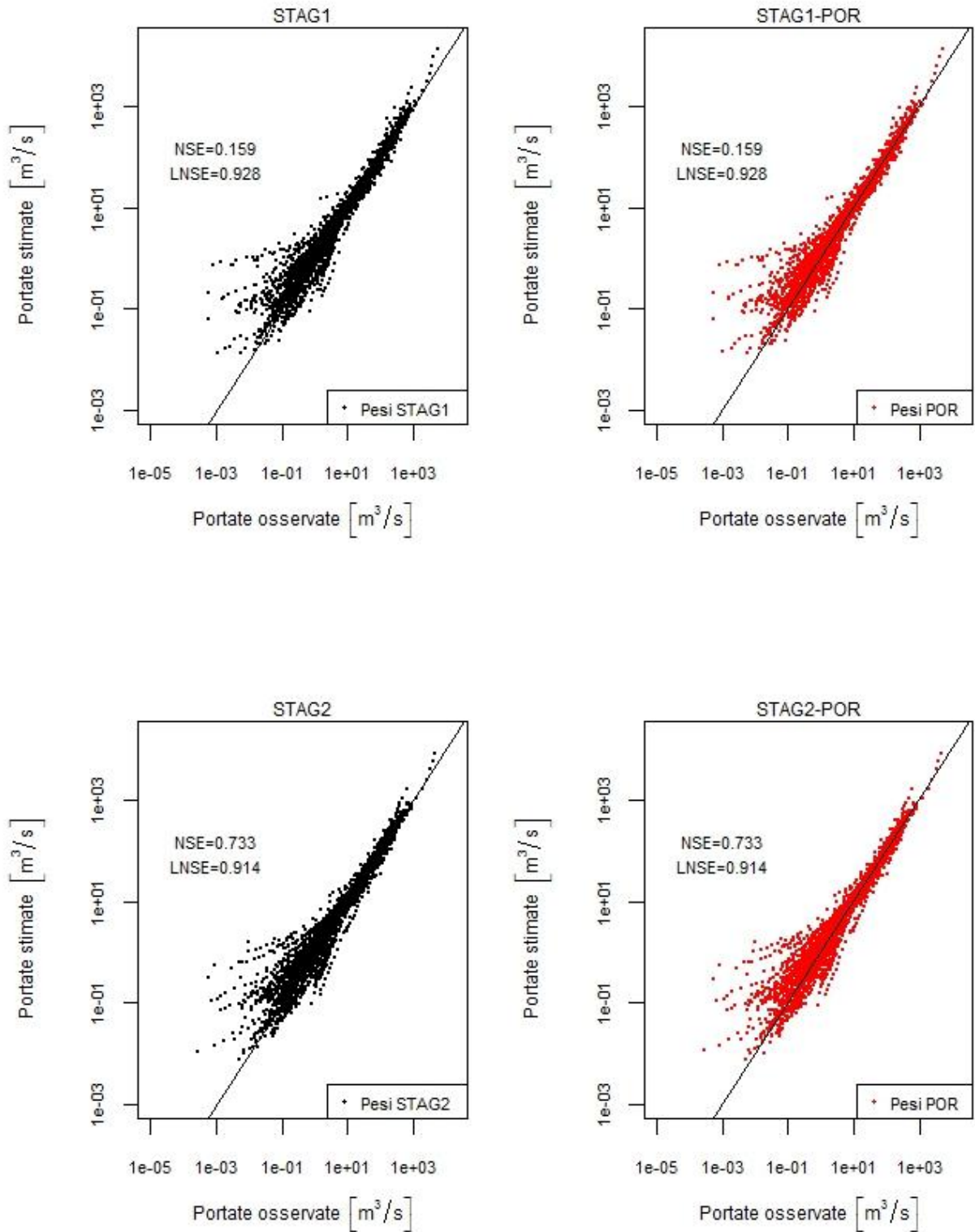
$N_{max}$	STAG 1	STAG 2	$N_{max}$	POR-STAG 1	POR-STAG 2
5	0.928	0.914	5	0.928	0.914
10	0.918	0.904	10	0.918	0.905
20	0.907	0.892	20	0.907	0.892
50	0.892	0.874	50	0.891	0.873

**Tabella 5.13:** *Pannello (a): NSE relativi alla stima delle FDC dimensionali, ricavate dal MAP\*, relative alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2, in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. Pannello (b): LNSE relativi alla stima delle FDC dimensionali ricavate dal MAP\* relative alla stagione autunnale-invernale (STAG 1) e primaverile-estiva (STAG 2) in cross-validazione per valori di vicinaggio ( $N_{max}$ ) pari a 5, 10, 20, 50. In entrambi i pannelli a sinistra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND stagionali; a destra si hanno gli NSE relativi alle curve ricostruite utilizzando i pesi relativi ai TND di lungo periodo (POR).*

La Tabella 5.13 evidenzia la presenza di NSE molto bassi (addirittura negativi a vicinaggio 10, 20 e 50) nel caso della ricostruzione delle curve dimensionali relative alla Stagione 1. Nel caso della Stagione 2 si ha un abbattimento dei valori di NSE di circa il 25 % passando dalle curve adimensionalizzate per il MAP\* e le corrispondenti dimensionali e tale entità di abbattimento la si ha anche effettuando il confronto con le curve dimensionali nel caso del MAF.

I grafici a dispersione, riportati in Figura 5.37, evidenziano come, nel caso della FDC relativa alla Stagione 1, sia presente una evidente sovrastima dei 5 valori di portata più elevati. Discorso analogo a quanto fatto nel paragrafo 5.4.2 vale per i valori bassi di portata.

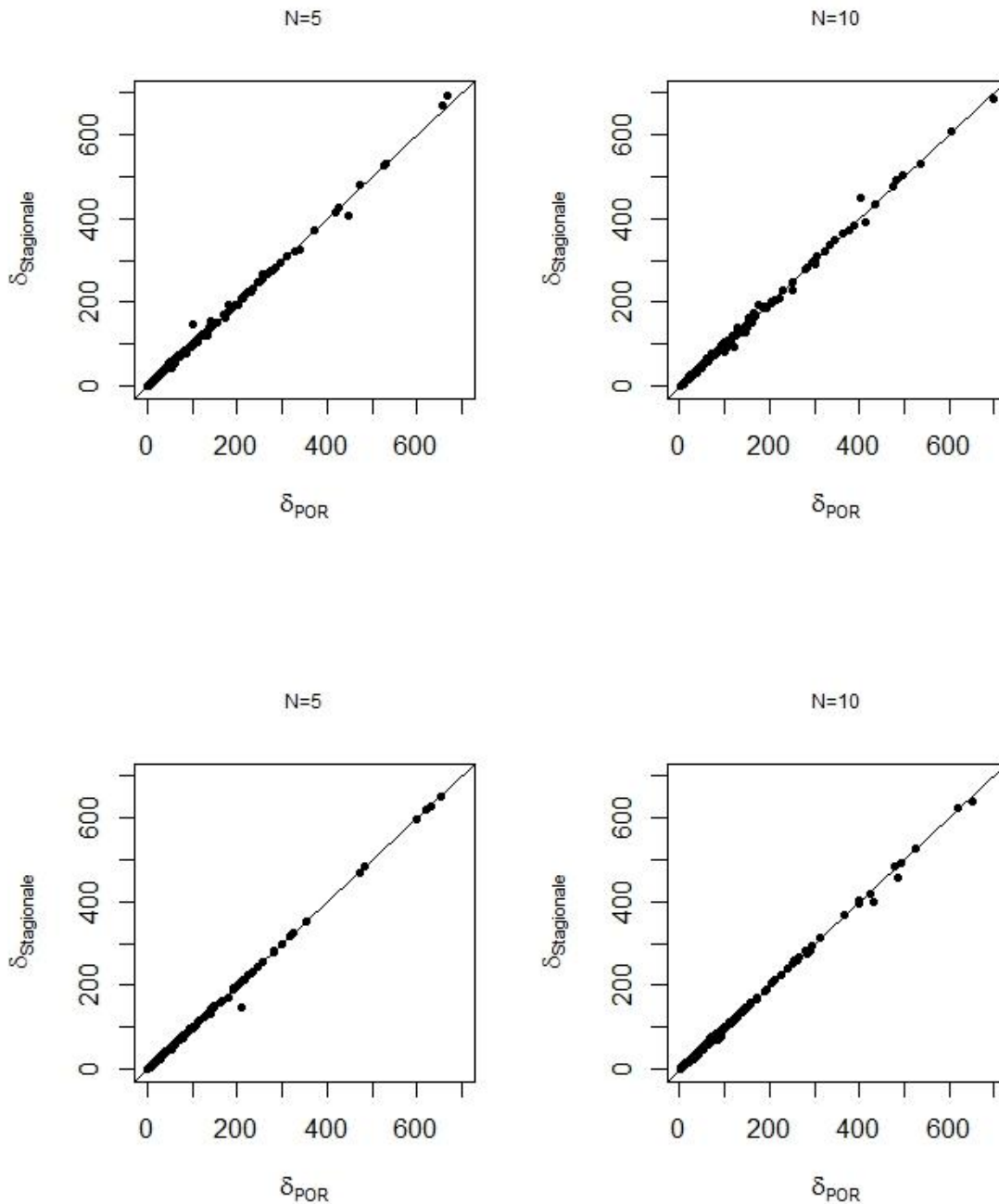
### Curve stagionali a vicinaggio 5



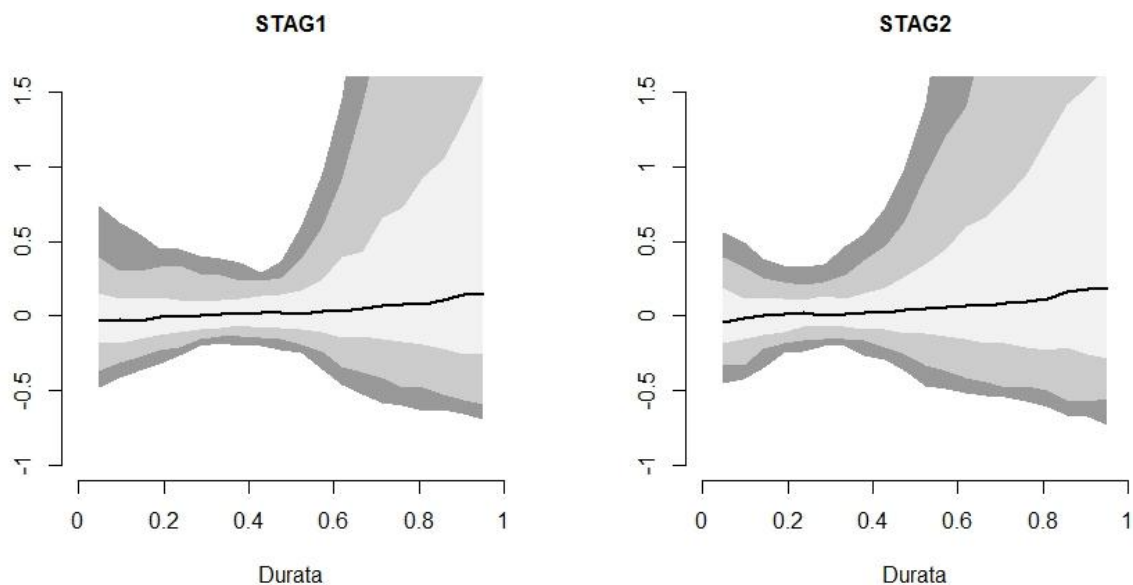
**Figura 5.37** : FDC stagionali dimensionali, ricavate dal MAP\*, osservate e stimate a vicinaggio 5

È ancora una volta evidente come i due modelli TNDTK utilizzati conducano ad efficienze praticamente identiche e ciò è confermato dai seguenti grafici (Figura 5.38) rappresentati

l'errore complessivo commesso da entrambi i metodi a seguito dell'applicazione della formula proposta dal Ganora et al. (2009):



**Figura 5.38:** Confronto fra i due metodi di stima delle FDC-STAG1e FDC-STAG2 dimensionali ricavate dal MAP\* in termini di scarto complessivo fra le osservazioni e le stime relative ai 182 bacini in esame a vicinaggio 5 e 10.  $\delta_{POR}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi di lungo periodo;  $\delta_{Stagionale}$  rappresenta l'errore commesso nell'utilizzo dei pesi stagionali.

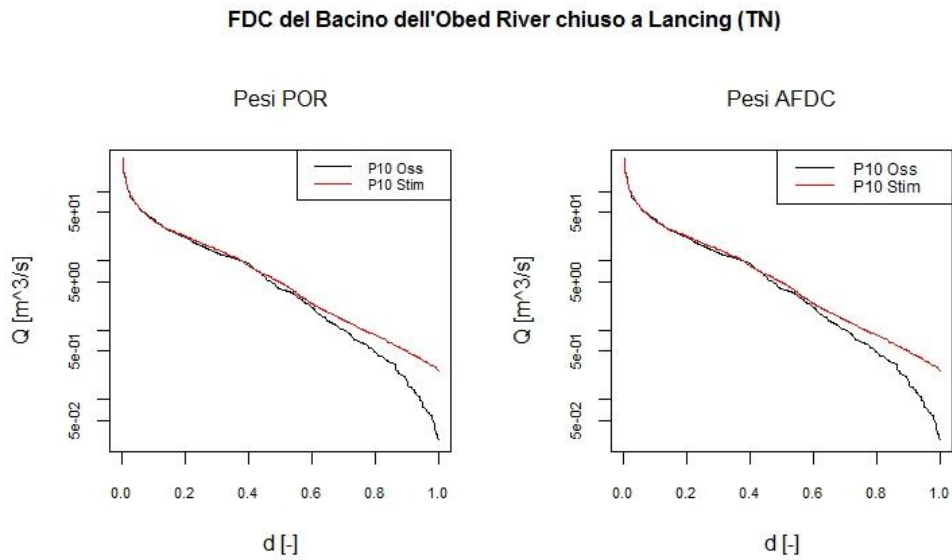


**Figura 5.39:** Stima delle FDC stagionali dimensionali ricavate dal MAP\* attraverso pesi derivanti dal krigaggio dei TND annuali a vicinaggio 5: Stagione 1 (destra); Stagione (2) sinistra. Curve errore-durata che riportano il profilo della mediana (linea nera) e delle bande contenenti il 60%, l'80% e il 95% degli errori relativi rappresentate, rispettivamente, dalle tonalità gradualmente più chiare di grigio.

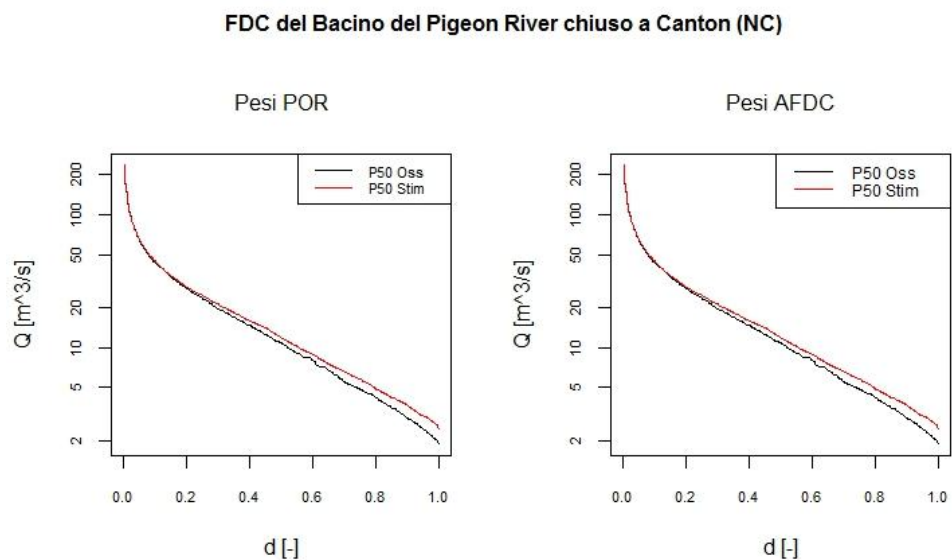
Il grafico in Figura 5.39 smentisce quanto visto nella Tabella 5.12 in termini di NSE. Infatti si vede come l'apertura delle bande d'errore, e conseguente l'errore commesso nella stima, si maggiore nel caso della Stagione 2 rispetto alla Stagione 1. Confermato, rispetto al caso delle curve stagionali standardizzate per il MAP\*, la decrescenza degli errori fino a una durata di 0.4 nel caso della stagione autunnale-invernale e 0.3 nel caso della stagione primaverile estiva per poi, in entrambi i casi, crescere all'aumentare della durata stessa.

## 5.5 Esempi di ricostruzione di curve dimensionali con il modello TNDTK

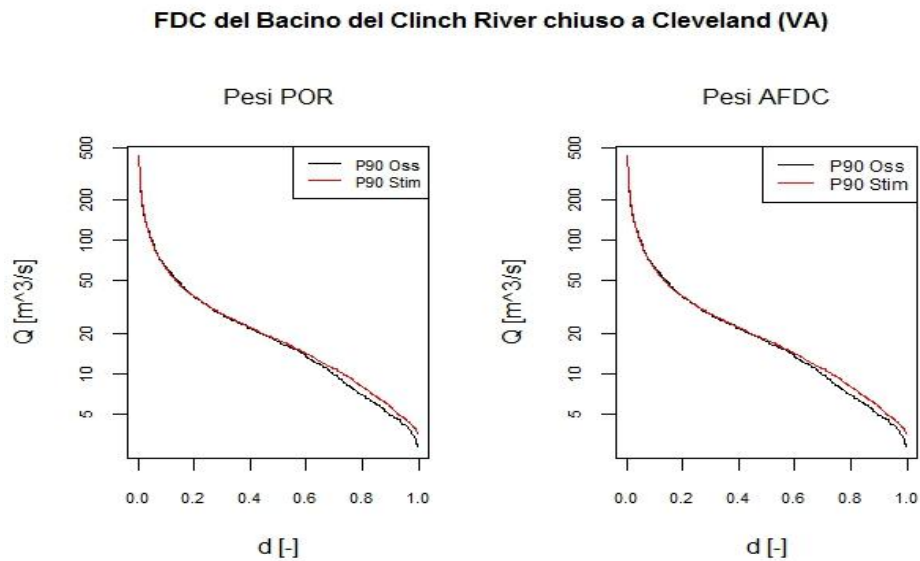
### CURVE PERCENTILI



*Figura 5.40: Stima migliore della curva P10 dimensionale ricavata dal MAF stimato*



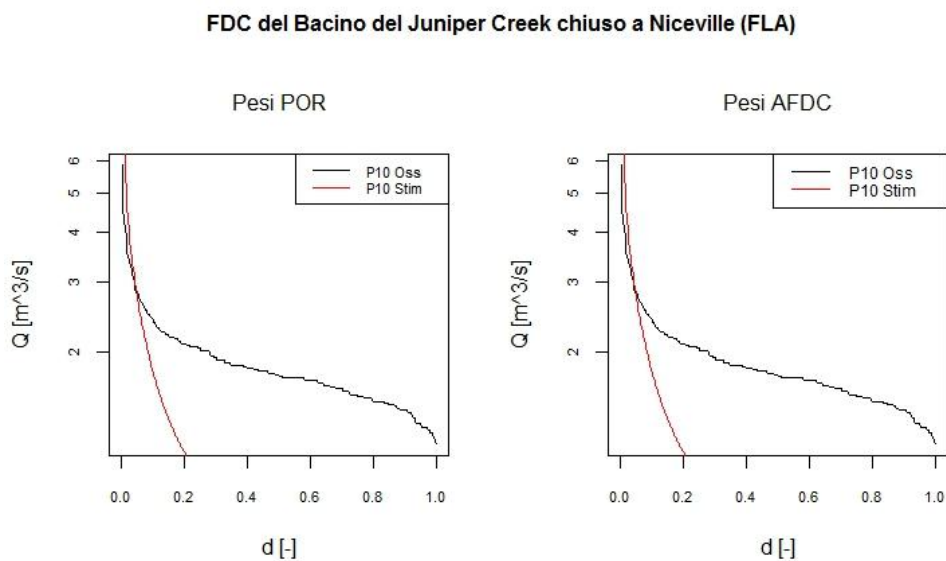
*Figura 5.41: Stima migliore della curva P50 dimensionale ricavata dal MAF stimato*



**Figura 5.42:** Stima migliore della curva P90 dimensionale ricavata dal MAF stimato

Si vede, in tutti e tre i casi mostrato nelle Figure 5.40 5.41 e 5.42, come la stima sia particolarmente accurata per durate elevate, mentre tende a perdere tale accuratezza al diminuire della durata stessa, specialmente nel caso della P10.

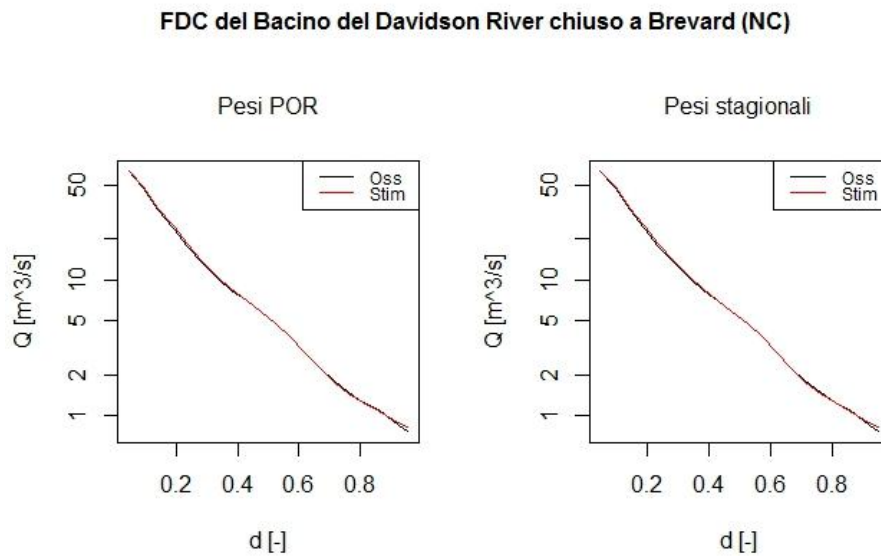
Per quanto riguarda la stima peggiore, essa, in tutte e tre le curve in esame, la si ha in corrispondenza del Juniper Creek. Riportiamo, in Figura 5.24, la curva P10 dimensionale, ricavata dalla stima col Top-kriging in cross-validazione del MAF, relativa proprio a tala bacino:



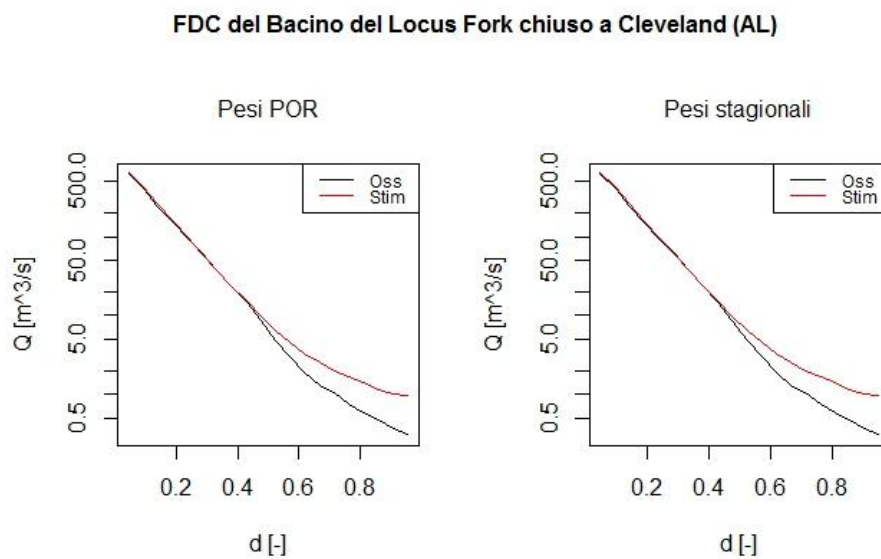
**Figura 5.43:** Stima migliore della curva P50 dimensionale ricavata dal MAF stimato

Si vede, in tal caso, come la curva stimata raggiunga lo zero delle portate per una durata di 0.2, nonostante mantenga una buona capacità di ricostruzione della FDC empirica per durate minori di 0.5. Discorsi analoghi valgono per le curve P50 e P90 dello stesso bacino.

### ***CURVE STAGIONALI***



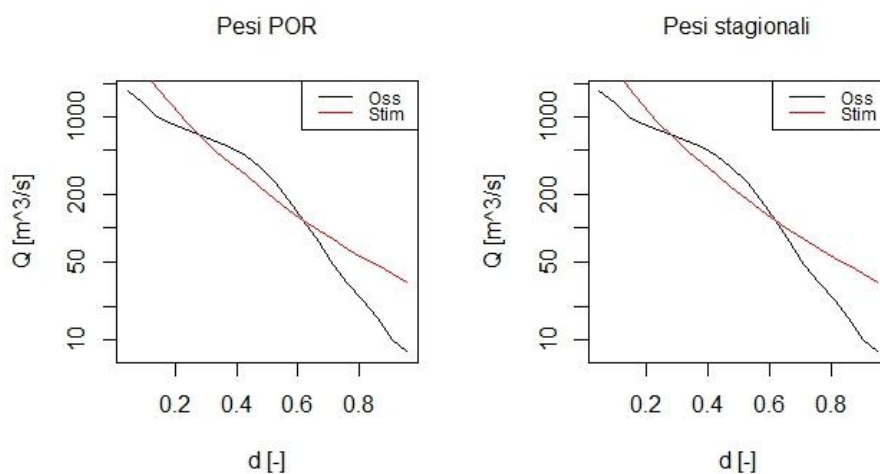
***Figura 5.44: Stima migliore della FDC-Stag1 dimensionale ricavata dal MAF stimato***



***Figura 5.45: Stima migliore della FDC-Stag2 dimensionale ricavata dal MAF stimato***



### FDC del Bacino del Holston River chiuso a Knoxville (TN)



**Figura 5.46:** Stima peggiore della FDC-Stag2 resa dimensionale tramite il MAF stimato

Le Figure 5.44 e 5.44 e 5.46 confermano come la FDC- Stag1 sia ricostruita meglio rispetto alla FDC-Stag 2. Si vede, infatti, come, nel caso della migliore stima possibile, valutata sia in termini di NSE che di LNSE, la curva di durata stimata, nel caso della stagione primaverile-estiva, non riesca a rappresentare al meglio valori di portata bassi corrispondenti a durate elevate. Ciò invece avviene nella ricostruzione della FDC relativa alla stagione autunnale-invernale.

La Figura 5.44 mostra invece la ricostruzione peggiore per quel che riguarda la stagione primaverile estiva (peraltro coincidente con la peggior ricostruzione per la stagione autunnale-invernale): si vede come, oltre all'errore elevato in corrispondenza delle durate elevate, per il Bacino dell'Holston River si ha elevata inadeguatezza di entrambi i modelli anche per durate basse.

Nel caso delle curve dimensionali ricavate dal MAP\* il discorso non cambia per quanto riguarda i bacini per i quali sono meglio o peggio ricostruite le curve percentili e stagionali.

Riportiamo infine l'andamento delle FDC ricostruite a vicinaggio 5 per i bacini più e meno estesi in termini di area, il bacino dell'Alabama River chiuso a Montgomery (Alabama) con area di 39126,1536 km<sup>2</sup> e il bacino del Fausett Creek chiuso a Talking Rock (Georgia) con area di 10,3248 km<sup>2</sup> relativi alle stagioni 1 e 2.

### FDC del Bacino dell'Alabama River chiuso a Montgomery (AL)

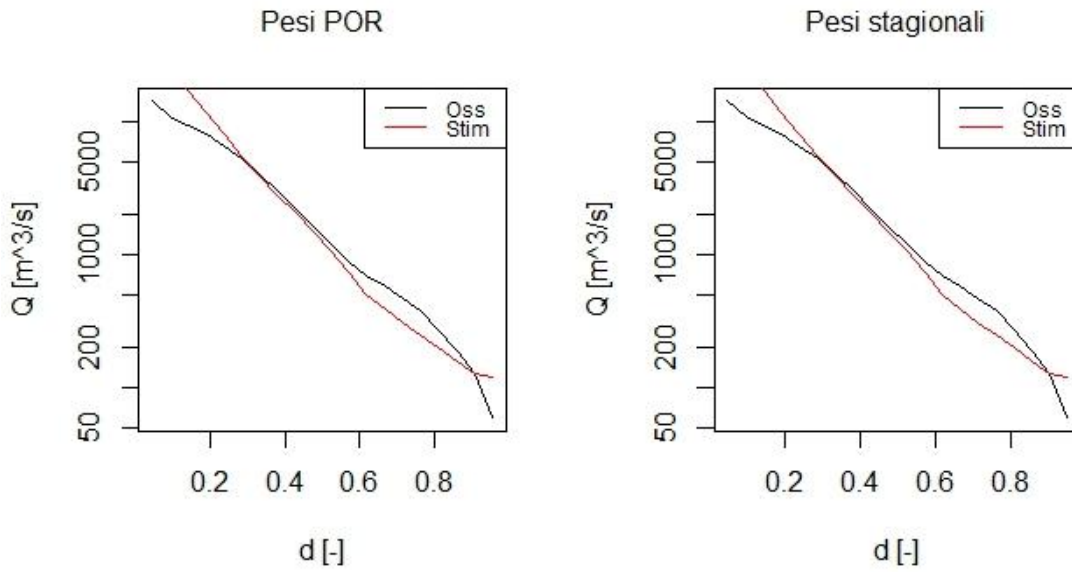


Figura 5.47: Ricostruzione della FDC-Stag1 relativa al Bacino dell'Alabama River

### FDC del Bacino del Fausett Creek chiuso a Talking Rock (GA)

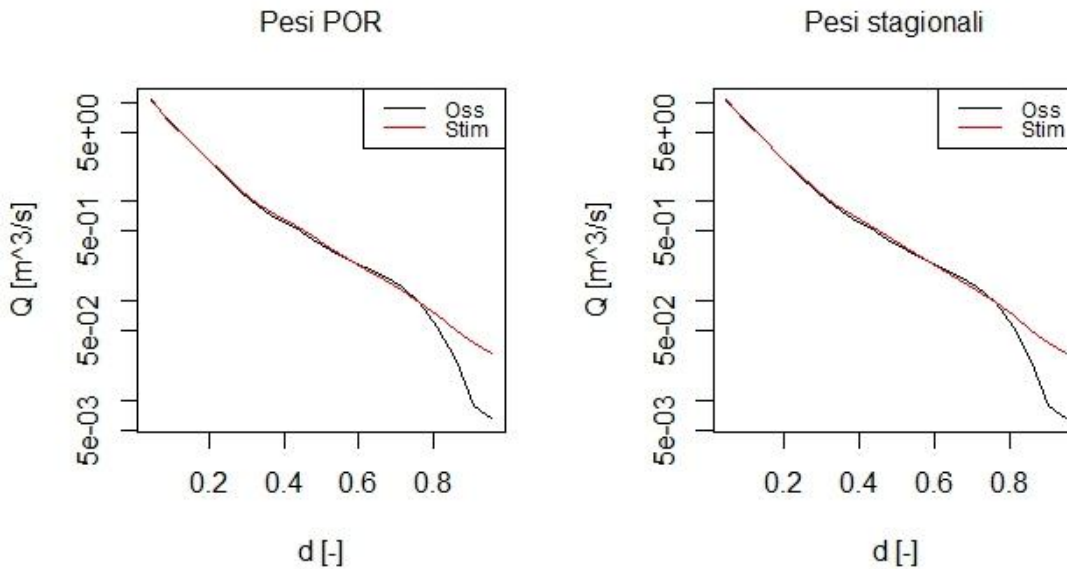
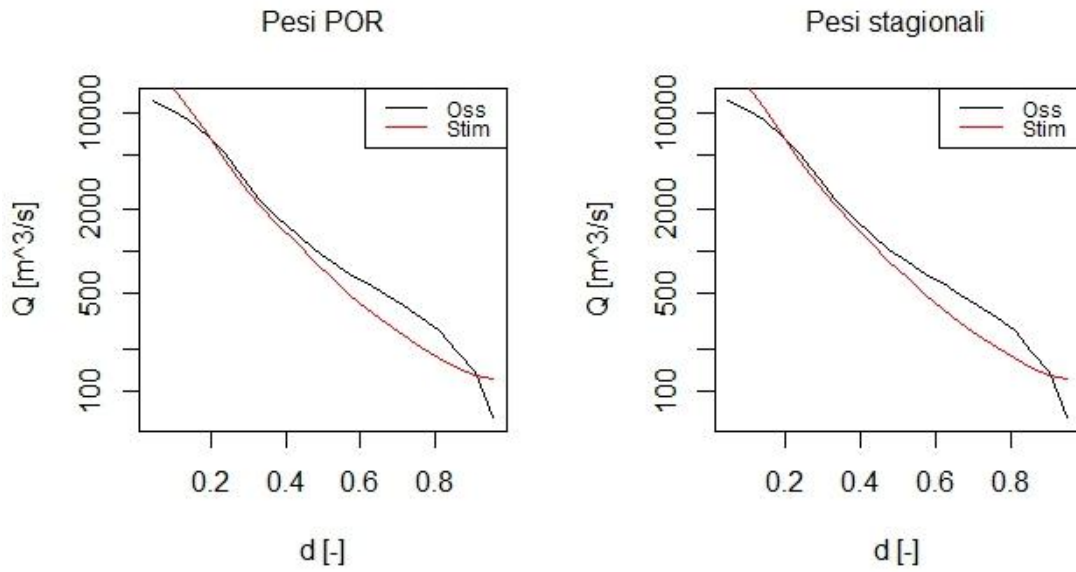


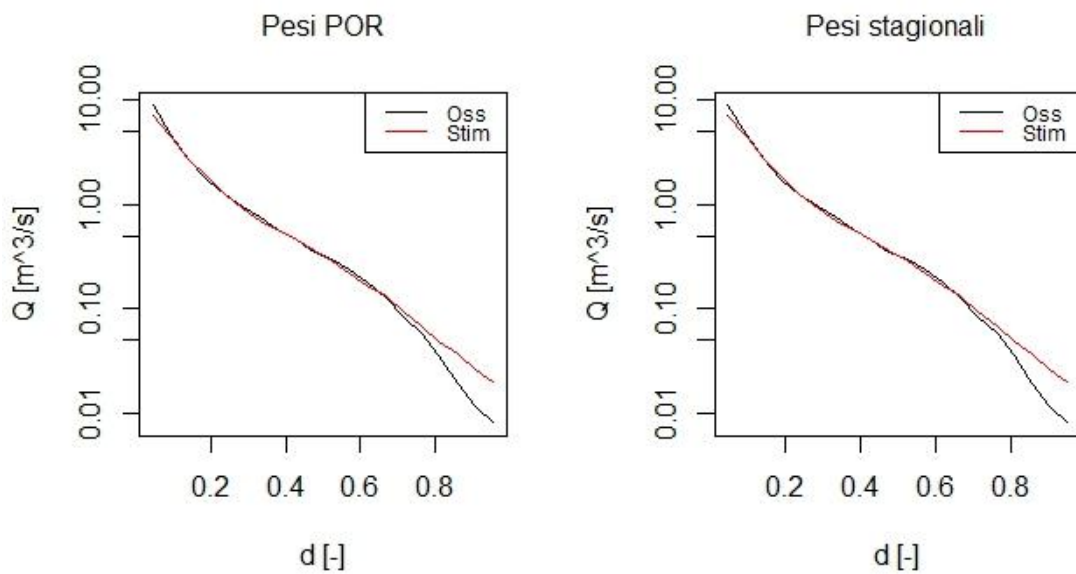
Figura 5.48: Ricostruzione della FDC-Stag1 relativa al Bacino del Fausett Creek

### FDC del Bacino dell'Alabama River chiuso a Montgomery (AL)



*Figura 5.49: Ricostruzione della FDC-Stag2 relativa al Bacino dell'Alabama River*

### FDC del Bacino del Fausett Creek chiuso a Talking Rock (GA)



*Figura 5.50: Ricostruzione della FDC-Stag2 relativa al Bacino del Fausett Creek.*

## 5.6 Sintesi dei risultati ottenuti

Si riporta di seguito la Tabella 5.14 che riassume, in termini di NSE ed LNSE, i risultati ricavati dall'applicazione del metodo del Top-kriging ai TND annuali per ricostruire le curve annuali e stagionali adimensionali e dimensionali, tenendo conto della pressoché totale analogia, in termini di efficienza, con l'altro modello TNDTK analizzato in questa dissertazione.

<i>(a) NSE</i>				
<b>FDC</b>	<b>Stand. MAF</b>	<b>Stand. MAP*</b>	<b>Dim. MAF</b>	<b>Dim. MAP*</b>
<b>STAG 1</b>	0.892	0.895	0.597	0.159
<b>STAG 2</b>	0.881	0.871	0.915	0.733
<b>P10</b>	0.894	0.875	0.918	0.920
<b>P50</b>	0.916	0.905	0.845	0.858
<b>P90</b>	0.902	0.889	0.646	0.660
<i>(b) LNSE</i>				
<b>FDC</b>	<b>Stand. MAF</b>	<b>Stand. MAP*</b>	<b>Dim. MAF</b>	<b>Dim. MAP*</b>
<b>STAG 1</b>	0.908	0.904	0.925	0.928
<b>STAG 2</b>	0.886	0.885	0.909	0.914
<b>P10</b>	0.741	0.745	0.869	0.859
<b>P50</b>	0.817	0.819	0.915	0.908
<b>P90</b>	0.888	0.882	0.956	0.949

**Tabella 5.14:** *Pannello (a): NSE relativi alla stima delle FDC dimensionali percentili (P10, P50 e P90) e stagionali (STAG 1 e STAG 2) a vicinaggio 5. Sono riportati i valori di tale indice di prestazione relativi alle curve standardizzate per MAF (Stand.MAF) e per MAP\* (Stand.MAP\*) e per le curve dimensionali ricavate dal MAF stimato (Dim.MAF) e dal MAP\* (Dim.MAP\*). Pannello (b): LNSE relativi alla stima delle FDC dimensionali percentili (P10, P50 e P90) e stagionali (STAG 1 e STAG 2) a vicinaggio 5. Sono riportati i valori di tale indice di prestazione relativi alle curve standardizzate per MAF (Stand.MAF) e per MAP\* (Stand.MAP\*) e per le curve dimensionali ricavate dal MAF stimato (Dim.MAF) e dal MAP\* (Dim.MAP\*).*

La Tabella 5.14 evidenzia come il modello TNDTK abbia elevate efficienze, sia in termini di NSE che di LNSE, nel caso delle curve adimensionali. In quelle stagionali si vede un'efficienza maggiore per le curve relative alla stagione autunnale-invernale, mentre nelle

percentili un NSE maggiore per le P50 ed un LNSE maggiore per le P90. Per quanto riguarda le dimensionali calano drasticamente gli NSE relativi alle curve della Stagione 1 e delle P90 e, nel caso delle prime, l'abbattimento è più netto nel caso delle curve dimensionali ricavate dal MAP\*. In termini di LNSE, il passaggio da adimensionali dimensionali produce un incremento delle prestazioni in tutte le curve. Per quanto riguarda le curve dimensionali, concludiamo dicendo che è possibile notare una maggiore affidabilità del modello nella stima delle curve percentili rispetto a quelle stagionali.

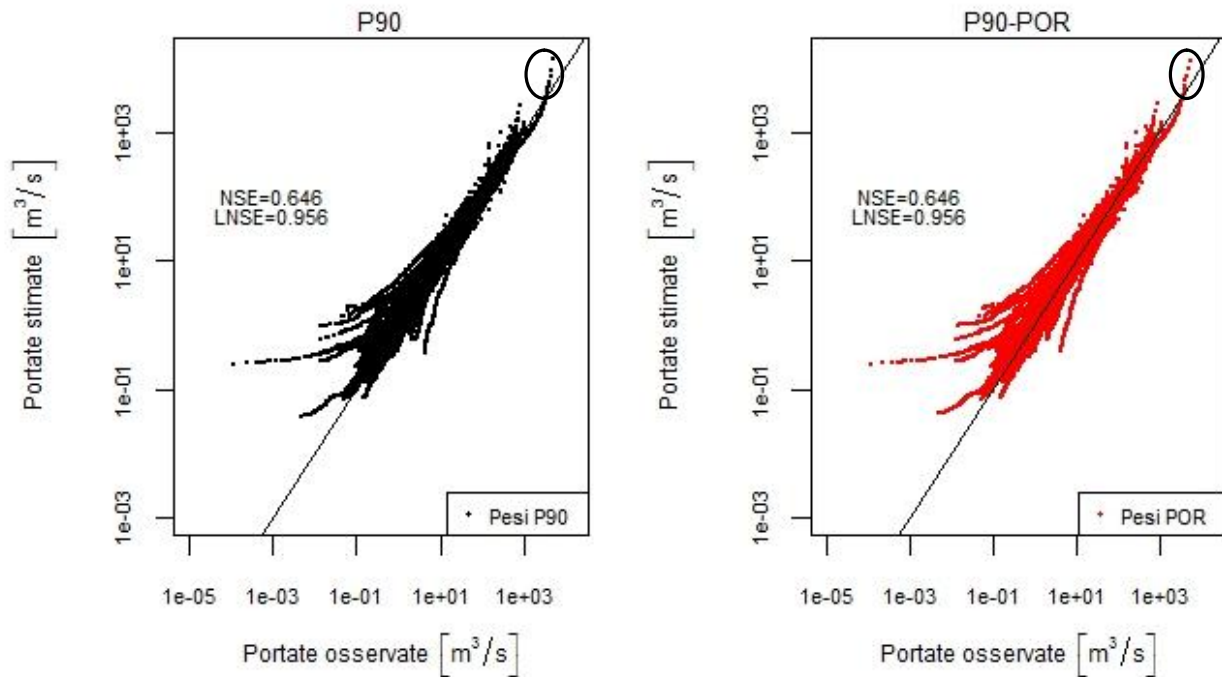


## ***CAPITOLO 6: DISCUSSIONE DEI RISULTATI***

Il confronto fra le tabelle degli NSE ed LNSE relative al calcolo dei TND (v. Paragrafo 5.1) e quelle relative alla ricostruzione delle curve standardizzate sia per il MAF che per il MAP\* (v. Paragrafi 5.3 e 5.4) mostra come il passaggio da TND a FDC vera e propria generi un aumento di efficienza, sia in termini di NSE che di LNSE. Ciò dipende, molto probabilmente, dal fatto che la curva di durata è un elemento effettivamente misurabile, mentre il TND, seppur sia dimostrato che sintetizzi molto bene la curva, soprattutto per quel che riguarda la risposta idrologica del bacino alle sollecitazioni meteoriche, non è una grandezza fisica che è possibile osservare e quindi, quelli che abbiamo considerato come valori osservati di tale grandezza, derivano, in realtà, semplicemente dall'applicazione della formula empirica (2.6).

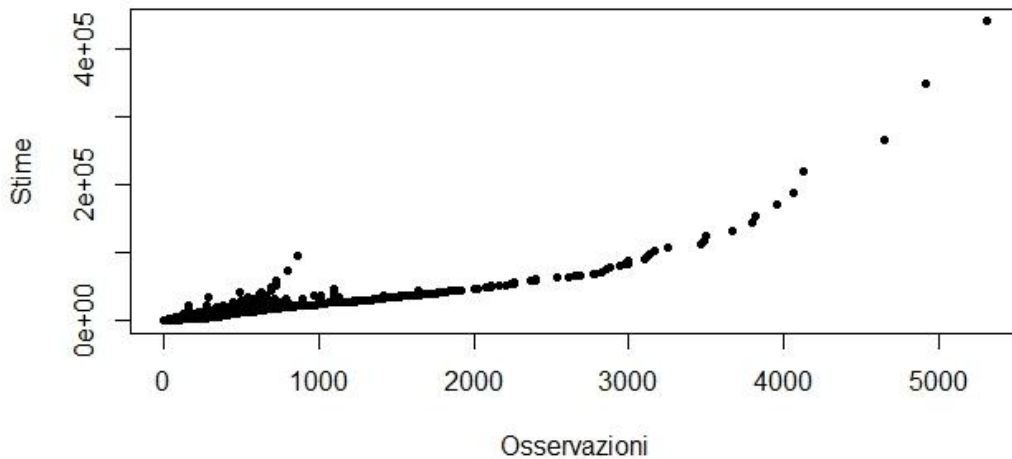
I Paragrafi 5.3.1 e 5.3.2 evidenziano come l'applicazione dei due metodi TNDTK in esame, per la ricostruzione delle curve percentili annuali standardizzate per il MAF e per il MAP\*, conduca ad un elevato grado di affidabilità testimoniato da valori molto alti sia degli NSE che degli LNSE per le tre probabilità di non superamento considerate. Si vede in particolare come i valori più alti degli indici di prestazione considerati si abbiano nella ricostruzione della P50, ovvero la curva mediana. Ciò è sicuramente plausibile perché la procedura di standardizzazione, in tutti e tre i casi, è stata effettuata prendendo come deflusso di riferimento il valore medio (di portata o precipitazione convertito in portata) che sicuramente è più caratteristico delle portate di anni ipotetici idrologicamente simili che di anni particolarmente secchi o umidi.

I Paragrafi 5.3.3 e 5.3.4 evidenziano, invece, come il passaggio da curve adimensionali a curve dimensionali, ricavate sia dal MAF stimato che dal MAP\*, modifichi completamente il livello di efficienza in termini di NSE. Le Tabelle 5.8 e 5.9 mostrano come la ricostruzione delle curve P10, relative ad un anno particolarmente secco, presenti valori di NSE maggiori rispetto alle corrispondenti curve adimensionali, mentre, nel caso delle P50 e delle P90, si ha una diminuzione di tale indice di prestazione passando da curve adimensionali a dimensionali. I grafici a dispersione in Figura 5.16 e 5.21 sembrano, in prima analisi, smentire quanto visto invece nelle Tabelle 5.8 e 5.9; analizziamo, tuttavia, la curva P90 dimensionale (ricavata dal MAF stimato):



Nel grafico sopra riportato, ed estrapolato dalla Figura 5.16, si è evidenziata la sovrastima di quattro valori molto alti di portata. Il presente grafico è costruito in scala logaritmica, per cui la sovrastima è amplificata di un fattore 10. Ciò è meglio visibile nel diagramma in scala naturale riportato in Figura 6.1: si vede, in questo caso, in modo molto evidente la sovrastima dei quattro valori più alti di portata. Si può estrapolare, infatti, che il valore massimo di portata osservata raggiunga i  $5300 \text{ m}^3/\text{s}$  e che, a seguito della sua ricostruzione in cross-validazione col metodo del Top-kriging applicato ai TND annuali, raggiunga i  $45000 \text{ m}^3/\text{s}$  e, dunque, un ordine di grandezza in più rispetto al valore osservato.



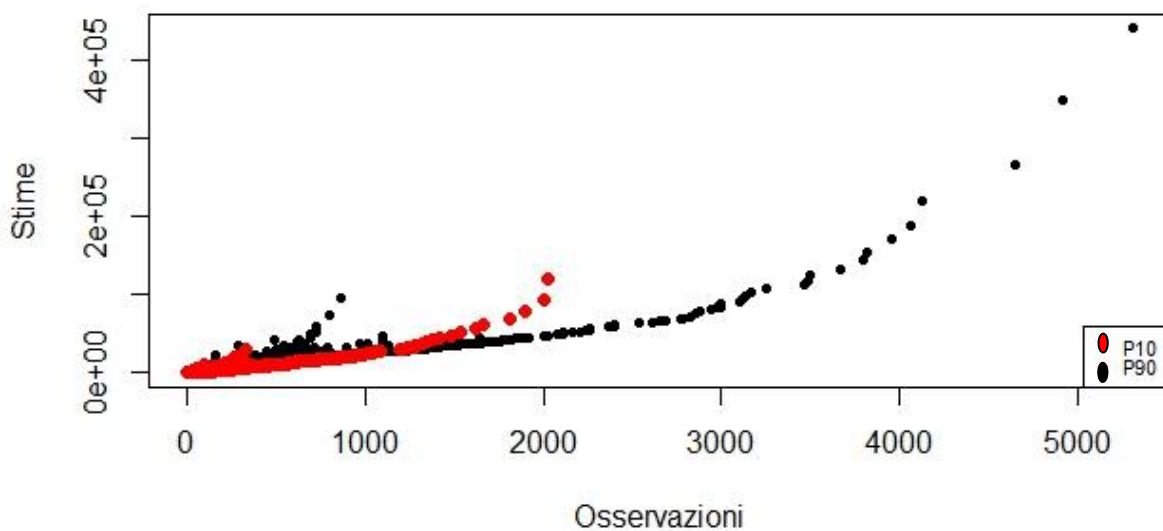
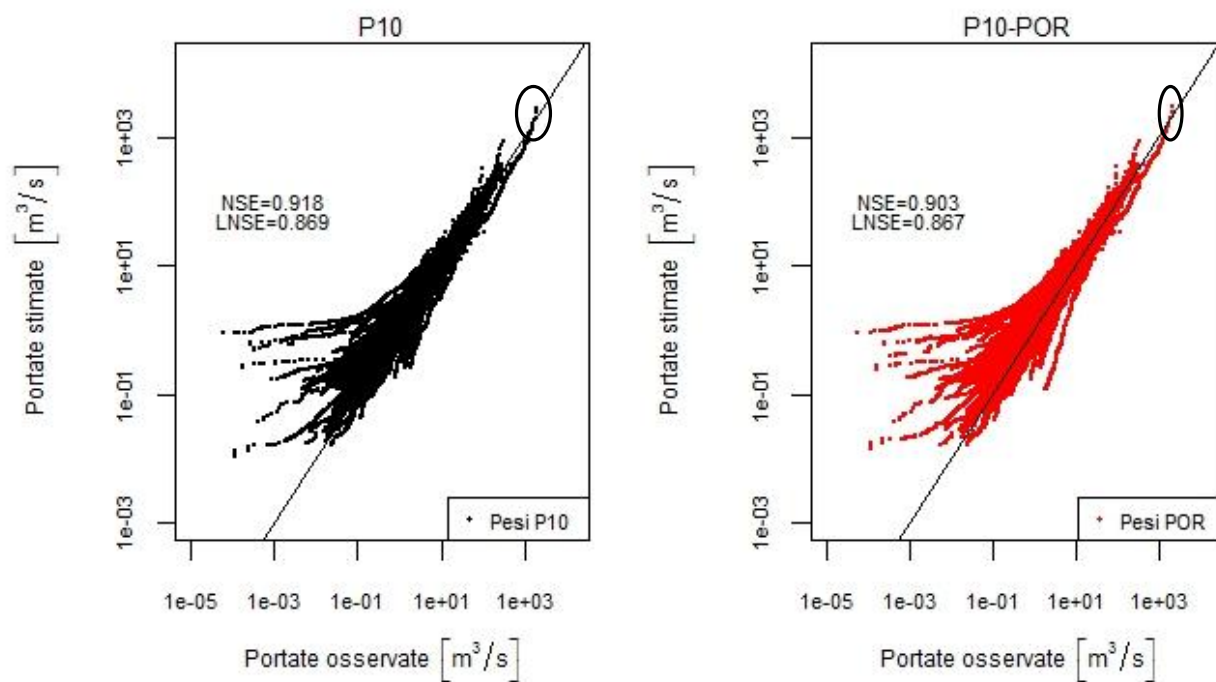


**Figura 6.1:** Diagramma a dispersione in scala naturale relativo al confronto fra la P90 osservata e stimata a vicinaggio 5 col metodo TK applicato ai TND annuali.

Analizzando la (4.4), si vede come l'NSE dipenda dalla sommatoria del quadrato degli scarti e, in particolare, all'aumentare di tale grandezza si abbassi il valore di tale indice di prestazione. Per cui la presenza nelle P90 dimensionali di valori molto grandi di scarti, anche se in numero minore rispetto a valori piccoli o prossimi a zero di tale quantità, ha determinato una riduzione delle prestazioni in termini di NSE.

Se invece si riporta , sempre estrapolandola dalla Figura 5.16, l'andamento della curva P10 dimensionale, ricavata dal MAF stimato, si può evidenziare una sovrastima dei valori grandi di portata decisamente meno evidente anche in un grafico bilogartimico.

### Curve percentili a vicinaggio 5



*Figura 6.2: Diagramma a dispersione in scala naturale relativo al confronto fra la P90 (in nero) e la P10 (in rosso) osservate e stimate a vicinaggio 5 col metodo TK applicato ai TND annuali.*

La minore entità della sovrastima dei valori alti di portata nel caso della P10 è, come riportato in Figura 6.2, ancora più evidente in un grafico a dispersione in scala naturale. Di conseguenza è spiegato il perché gli NSE risultino molto maggiori nel caso della P10 rispetto alla P90.

Tale risultato non è ovviamente riscontrabile in termini di LNSE poiché la trasformazione logaritmica della somma del quadrato degli scarti fa sì che tale quantità si riduca di un fattore 100. Inoltre, essendoci valori molto più piccoli in P10 che in P90, nella ricostruzione della curva relativa ad un anno particolarmente secco, tale indice di prestazione assumerà un valore minore rispetto alla curva relativa ad un anno particolarmente umido.

Tali considerazioni fatte sugli NSE non valgono, ovviamente, nel caso degli errori relativi che, invece, sono una misura percentuale dello scarto fra osservazioni e stime. Si vede infatti dalle Figure 5.20 e 5.25 relative alle curve d'errore, come nel caso della P10 ci siano errori relativi maggiori. Ciò è giustificato dal fatto che la curva P10 è caratterizzata da valori più piccoli i quali producono errori relativi maggiori in quanto basta una piccola sovrastima o sottostima a far incrementare la percentuale di errore commesso.

I Paragrafi 5.4.1 e 5.4.2 mostrano come entrambe le curve stagionali in esame, standardizzate per il MAF e per il  $MAP^*$ , siano ricostruite con un elevatissimo grado di affidabilità, testimoniato, anche in questo caso, dagli elevati valori di NSE ed LNSE. Si vede come ci sia una affidabilità leggermente maggiore nella stima della curva associata alla stagione primaverile-estiva, verosimilmente perché, essendo l'area di studio costituita da bacini con un'area media relativamente piccola (dell'ordine dei 1000 km<sup>2</sup>), e da un valore medio del MAF e del  $MAP^*$  rispettivamente di 16 e 43 m<sup>3</sup>/s, saranno meglio ricostruiti valori piccoli di portata (caratteristici della stagione primaverile-estiva) rispetto a valori grandi (caratteristici della stagione autunnale-invernale).

I Paragrafi 5.4.3 e 5.4.4 evidenziano come anche nella ricostruzione delle curve stagionali dimensionali, così come visto nel caso delle curve percentili dimensionali, si ha un abbattimento di efficienza valutata in termini di NSE. In particolare, costruendo la curva dimensionale a partire dal  $MAP^*$ , i valori di tale indice di prestazione dei modelli in esame diventano negativi. Ciò è dovuto alle stesse motivazioni illustrate nel caso delle curve percentili. In questo caso l'abbattimento è più significativo poiché, essendo le stagionali curve di durata di lungo periodo, prendono in esame l'intero periodo di osservazioni comprendendo, quindi, anche valori elevatissimi di portata ma verificatesi in circostanze particolari e difficilmente riscontrabili una seconda volta nel periodo di osservazione in esame. Tali valori

molto alti si verificano durante gli eventi di piena, molto più frequenti durante il periodo autunnale-invernale e quindi gli abbattimenti di efficienza sono molto più marcati nella ricostruzione della curva dimensionale relativa alla Stagione 1.

Concludiamo dicendo che la stima delle FDC percentili produce efficienze migliori rispetto a quella delle FDC stagionali. Ciò è dovuto al fatto che le FDC percentili non prendono in considerazione valori estremi di portata che si verificano un numero limitatissimo di volte nel periodo di osservazioni. Ciò, in particolar modo per valori grandi, produce differenze tra gli scarti minori e, di conseguenza, valori di NSE maggiori. Tuttavia si nota un parallelismo fra la curva P10 e la curva relativa alla stagione primaverile-estiva e fra la P90 e la curva relativa alla stagione autunnale-invernale: la curva P10 è infatti caratteristica di un anno particolarmente secco e quindi tipico del periodo primaverile-estivo dell'anno; viceversa, la curva P90, è caratteristica di un anno particolarmente umido che presenta caratteristiche associabili a ciò che si verifica in autunno ed inverno durante l'anno idrologico.

## ***CONCLUSIONI***

Il presente lavoro di tesi è stato indirizzato all'analisi dell'affidabilità di un modello di stima delle curve di durata delle portate percentili annuali e stagionali, basato sull'applicazione del Topological Kriging ad un indice di riferimento, il Total Negative Deviation (TND o deviazione negativa complessiva), che permette di sintetizzare, attraverso un'unica grandezza, l'intera curva di durata. Il TND è in grado di racchiudere in sé le caratteristiche salienti della risposta idrologica del bacino, nei confronti della sollecitazione meteorica e, conseguentemente, la forma della curva di durata (o FDC, dall'inglese *Flow Duration Curve*) ad esso associata.

L'analisi è stata condotta con riferimento a 182 bacini idrografici localizzati nella regione sud-orientale degli Stati Uniti e comprendente gli stati: Alabama, Florida, Georgia, Mississippi, North Carolina, South Carolina, Tennessee, e Virginia.

Lo studio ha messo a confronto due metodi diversi:

- stima dei TND annuali e stagionali in cross-validazione (una particolare procedura che simula condizioni non strumentate nel bacino di interesse) di ciascun bacino tramite il Top-kriging e utilizzo dei pesi così determinati per la ricostruzione delle curve di durata annuali e stagionali.
- utilizzo dei pesi derivanti dall'applicazione del Top-kriging ai TND derivati dalle curve di durata di lungo periodo (Bononi, 2014) in cross-validazione per la ricostruzione delle curve annuali e stagionali.

La standardizzazione delle curve empiriche, necessaria per il calcolo dei TND, è stata effettuata dividendo le curve stesse per il MAF e il MAP\*, (*Mean Annual Flow*) e ed il prodotto tra la precipitazione media annua a scala di bacino (*Mean Annual Precipitation*, MAP) e l'area drenante del bacino stesso (c.d. l'afflusso meteorico medio annuale espresso in termini di portata media) entrambi indici di riferimento specifici per ogni bacino. Lo studio ha preso in esame un ricco database statunitense predisposto dall'americana U.S.G.S. (U.S. *Geophysical Survey*) comprendente 182 bacini idrografici sudoccidentali degli Stati Uniti a comportamento naturale (bassa influenza antropica) dotati di almeno XXX anni completi di osservazione della portata media giornaliera. Considerata l'elevata estensione dell'area di studio, il vicinaggio (ovvero il numero di siti strumentati vicini al sito di interesse utilizzati per la stima del sito stesso del TND in condizioni non strumentate), necessari per la stima dei

TND in cross-validazione, è stato fatto variare fino a 50 con risultati migliori ottenuti a vicinaggio 5.

Dal presente lavoro si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Il modello che stima le FDC annuali e stagionali, a partire dai pesi derivanti dall'applicazione del Top-kriging ai TND annuali e stagionali, ha efficienze analoghe a quello che stima tali curve a partire dal Top-kriging applicato ai TND di lungo periodo. Ciò è un fatto sicuramente positivo in quanto si ha la possibilità di ricavare curve annuali e stagionali in sezioni non strumentate direttamente dalla stima della curva POR.
- la stima delle curve di durata adimensionali produce valori di NSE maggiori rispetto a quelli relativi alla stima del TND. Ciò avviene a causa della maggiore difficoltà che si ha nello stimare tale indice che è ricavato da una formula empirica e quindi non è un parametro direttamente osservabile;
- la stima delle curve dimensionali produce un valore di NSE sensibilmente minore rispetto a quelle delle adimensionali in quanto la moltiplicazione dei quantili adimensionali di portata per MAF e MAP\* genera valori elevati e, verificandosi in alcuni casi una grande sovrastima dei valori dimensionali più alti di portata, il valore di NSE tende a decrescere. Ciò vale in particolare nel caso di curve dimensionali ricavate dal MAP\*, poiché le sovrastime dei casi peggiori risultano quasi il doppio di quelle relative all'adimensionalizzazione con MAF. Tale discorso non si presenta, invece, in termini di LNSE poiché, effettuando una trasformazione logaritmica delle portate osservate e stimate, si riducono gli scarti e viene attribuito un peso inferiore agli errori commessi nella parte alta della curva (portate di piena);
- Le curve percentili dimensionali presentano un'efficienza migliore rispetto alle stagionali poiché, mentre le prime sono a base annuale e come tale non racchiudono valori di portata verificatesi pochissime volte nell'intervallo di osservazioni, le seconde sono notevolmente influenzate da valori estremi, in particolare quelli grandi, che causano valori di scarti maggiori.

In conclusione, seppur presentando efficienze basse nel caso delle curve stagionali dimensionali, il metodo utilizzato fornisce un elevato grado di affidabilità con il grande vantaggio di non necessitare di complesse indagini geomorfologiche sul territorio, ma semplicemente dell'area del bacino non strumentato in analisi.

# APPENDICE A - DATASET COMPLETO

N°	ID	Area [Km <sup>2</sup> ]	Prec. Media [cm]	Temp. Media [°C]	ETP [mm/y]	Bacino
1	02177000	526,7736	194,4226	12,54618	706,448	CHATTOOGA RIVER NEAR CLAYTON, GA
2	02178400	151,2752442	188,6061	12,14603	686,7219	TALLULAH RIVER NEAR CLAYTON, GA
3	02185200	186,858	169,4212	14,50053	796,7861	LITTLE RIVER NEAR WALHALLA, SC
4	02186000	269,7543	147,2373	15,63129	858,5768	TWELVEMILE CREEK NEAR LIBERTY, SC
5	02186645	169,3503	148,0294	15,19356	834,45	CONERROSS CK NR SENECA, SC
6	02191300	1958,6664	135,392	15,65623	860,5668	BROAD RIVER ABOVE CARLTON, GA
7	02192000	3673,4859	130,5729	15,84192	870,8649	BROAD RIVER NEAR BELL, GA
8	02208450	480,708	132,0874	15,83516	864,7641	ALCOVY RIVER ABOVE COVINGTON, GA
9	02212600	187,9587	122,1075	17,33857	937,633	FALLING CREEK NEAR JULIETTE, GA
10	02213050	80,9748	120,9643	17,25904	933,8519	WALNUT CREEK NEAR GRAY, GA
11	02215100	420,2922645	120,4592	18,21371	981,2251	TUCSAWHATCHEE CREEK NEAR HAWKINSVILLE, GA
12	02216180	129,111001	121,2786	18,38119	985,1693	TURNPIKE CREEK NEAR MCRAE, GA
13	02217500	1015,0218	134,6713	15,79417	863,8946	MIDDLE OCONEE RIVER NEAR ATHENS, GA
14	02219000	456,6087	129,855	16,16492	881,5864	APALACHEE RIVER NEAR BOSTWICK, GA
15	02220900	689,9769	123,6327	16,83945	914,0289	LITTLE RIVER NEAR EATONTON, GA
16	02221525	490,7976015	123,1904	17,31669	936,866	MURDER CREEK BELOW EATONTON, GA
17	02317500	3601,398119	125,3067	18,77388	999,2515	ALAPAHA RIVER AT STATENVILLE, GA
18	02318500	3863,678899	128,4939	18,97991	1005,755	WITHLACOOCHEE RIVER AT US 84, NEAR QUITMAN, GA
19	02318700	704,6711968	134,5754	19,2015	1014,874	OKAPILCO CREEK AT GA 33, NEAR QUITMAN, GA
20	02326512	2119,5072	141,4541	19,59752	1029,15	AUCILLA RIVER NR SCANLON, FLA.
21	02327100	271,1182385	162,3819	19,16053	998,4329	SOPCHOPPY RIVER NR SOPCHOPPY, FLA.
22	02329000	2966,778797	136,6667	19,31876	1021,053	OCHLOCKONEE RIVER NR HAVANA, FLA.
23	02329534	43,9263	146,247	19,38354	1017	QUINCY CREEK AT STATE HWY 267 AT QUINCY, FLA.
24	02329600	790,3278	143,3617	19,40996	1022,174	LITTLE RIVER NR MIDWAY, FLA.
25	02330100	322,5476918	148,9355	19,30034	1017,373	TELOGIA CREEK NR BRISTOL, FLA.
26	02330400	448,8176781	159,5013	19,27955	1008,459	NEW RIVER NEAR SUMATRA, FLA
27	02330450	116,6112	190,0762	13,13204	722,4701	CHATTAHOOCHEE RIVER AT HELEN, GA
28	02331600	819,7616832	172,7409	13,89189	763,7628	CHATTAHOOCHEE RIVER NEAR CORNELIA, GA
29	02333500	390,3165	172,9845	13,84877	761,5487	CHESTATEE RIVER NEAR DAHLONEGA, GA
30	02337000	617,6349	138,3548	15,33265	841,504	SWEETWATER CREEK NEAR AUSTELL, GA
31	02337500	92,31449547	136,2332	15,63093	848,1868	SNAKE CREEK NEAR WHITESBURG, GA
32	02338523	43,22191278	139,8562	15,80915	858,7111	HILLABAHATCHEE CREEK AT THAXTON RD, NR FRANKLIN, GA
33	02338660	323,3835	133,1014	16,52437	894,6708	NEW RIVER AT GA 100, NEAR CORINTH, GA
34	02338840	233,2818	131,8384	16,6595	899,4958	YELLOWJACKET CREEK-HAMMETT RD, BLW HOGANSVILLE, GA
35	02339225	155,6802	137,7186	16,11383	878,0649	WEHADKEE CREEK BELOW ROCK MILLS, ALA.
36	02341800	883,6146	126,9507	17,68929	950,2617	UPATOI CREEK NEAR COLUMBUS, GA
37	02342500	830,5722	132,0315	17,41796	939,94	UCHEE CREEK NEAR FORT MITCHELL, AL.
38	02342933	290,0952	135,6963	17,71045	946,9725	SOUTH FORK COWIKEE CREEK NEAR BATESVILLE AL
39	02343300	378,7236	142,4856	18,36516	978,4415	ABBIE CREEK NEAR HALEBURG AL
40	02343940	168,3369	140,1287	18,935	1008,784	SAWHATCHEE CREEK AT CEDAR SPRINGS, GA
41	02346180	3150,9333	128,7206	16,50421	892,7839	FLINT RIVER NEAR THOMASTON, GA
42	02347500	4790,136737	128,1561	16,74608	903,129	FLINT RIVER AT US 19, NEAR CARSONVILLE, GA

43	02349900	122,8673012	120,4404	18,35234	987,9435	TURKEY CREEK AT BYROMVILLE, GA
44	02350600	481,9698	127,3462	17,98813	960,412	KINCHAFOONEE CREEK AT PRESTON, GA
45	02350900	1365,119553	127,6836	18,0364	964,2201	KINCHAFOONEE CREEK AT PINWOOD ROAD, NR DAWSON, GA
46	02351500	364,0365	125,9995	17,82833	954,8361	MUCKALEE CREEK NEAR AMERICUS, GA
47	02351890	972,0064456	126,2595	17,93328	960,2676	MUCKALEE CREEK AT GA 195, NEAR LEESBURG, GA
48	02353400	470,4804	134,1454	18,8054	1002,847	PACHITLA CREEK NEAR EDISON, GA
49	02353500	1612,679383	132,9657	18,69196	995,4354	ICHAWAYNOCHAWAY CREEK AT MILFORD, GA
50	02359000	2162,885165	147,612	19,07872	1011,011	CHIPOLA RIVER NR ALTHA, FLA.
51	02361000	1781,6076	142,2263	18,28237	972,1975	CHOCTAWHATCHEE RIVER NEAR NEWTON, AL.
52	02362240	55,2006	148,0679	18,31651	973,5091	LITTLE DOUBLE BRIDGES CREEK NR ENTERPRISE, AL.
53	02363000	1292,5134	139,6195	17,88579	955,6346	PEA RIVER NEAR ARITON AL
54	02364570	68,3505	154,3771	18,30208	972,7714	PANTHER CREEK NEAR HACODA AL
55	02365470	386,4717	149,8678	18,83044	998,638	WRIGHTS CREEK AT SH 177-A NR BONIFAY,FL
56	02365769	211,9887	167,4163	18,9904	999,2535	BRUCE CREEK AT SH 81 NR REDBAY, FL
57	02366996	100,7019	168,8182	18,85351	994,1078	ALAUQA CREEK NEAR PLEASANT RIDGE, FL
58	02367310	73,1979	173,7224	18,94188	1003,453	JUNIPER CREEK AT STATE HWY 85 NR NICEVILLE, FLA.
59	02369800	227,5129445	160,9767	18,18319	966,4105	BLACKWATER RIVER NEAR BRADLEY AL
60	02370000	534,3345	162,7053	18,36254	975,5731	BLACKWATER RIVER NR BAKER, FLA.
61	02371500	1292,7843	141,5172	17,76829	952,2925	CONECUH RIVER AT BRANTLEY AL
62	02372250	1145,223	144,5279	17,8221	954,2337	PATSALIGA CREEK NEAR BRANTLEY AL
63	02373000	1213,6041	150,7248	18,14357	969,9487	SEPULGA RIVER NEAR MCKENZIE AL
64	02374500	445,7151	158,734	18,09466	967,7047	MURDER CREEK NEAR EVERGREEN AL
65	02374745	472,1139	164,7788	18,14483	968,7025	BURNT CORN CREEK AT STATE HWY 41 NEAR BREWTON, AL.
66	02378500	145,098	172,5631	19,13758	1012,789	FISH RIVER NEAR SILVER HILL AL
67	02381600	10,3248	159,9074	13,83655	771,3	FAUSETT CREEK NEAR TALKING ROCK, GA
68	02382200	309,8763	152,7724	14,24551	793,6645	TALKING ROCK CREEK NEAR HINTON, GA
69	02384540	21,3714	170,4103	13,84051	771,7273	MILL CREEK NEAR CRANDALL, GA
70	02385800	165,6684	160,9405	14,16828	790,5793	HOLLY CREEK NEAR CHATSWORTH, GA
71	02395120	84,0105	135,0435	15,35512	847,5732	TWO RUN CREEK NEAR KINGSTON, GA
72	02397410	168,5277	138,7798	15,76157	863,5238	CEDAR CREEK AT GA AVE, AT CEDARTOWN, GA
73	02398300	946,8069263	143,8498	14,61238	821,1274	CHATTOOGA RIVER ABOVE GAYLESVILLE AL
74	02399200	515,3337	156,5837	13,75465	776,3347	LITTLE RIVER NEAR BLUE POND AL
75	02400100	654,7599	141,4145	15,49294	853,8526	TERRAPIN CREEK AT ELLISVILLE AL
76	02401000	473,5224	143,6711	14,67413	821,4705	BIG WILLS CREEK NEAR REECE CITY
77	02401370	116,5644	146,1662	15,50834	858,9652	BIG CANOE CREEK NEAR SPRINGVILLE AL
78	02401390	365,3478	144,6481	15,55595	859,9094	BIG CANOE CREEK AT ASHVILLE AL
79	02401470	57,3894	144,4234	15,35013	852,356	LITTLE CANOE CREEK NEAR STEELE,ALA
80	02404400	1240,4223	140,9361	15,98557	876,1415	CHOCOLOCOCO CREEK AT JACKSON SHOAL NR LINCOLN AL
81	02405500	502,3188	142,4378	16,01168	877,5714	KELLY CREEK NEAR VINCENT AL
82	02406500	386,1099	146,9597	15,95279	865,2708	TALLADEGA CREEK AT ALPINE AL
83	02408540	682,4097	145,1494	16,21783	875,6397	HATCHET CREEK BELOW ROCKFORD AL
84	02413300	1050,9714	138,1624	15,57008	846,7928	LITTLE TALLAPOOSA RIVER NEAR NEWELL AL
85	02415000	491,3829	145,7687	15,7468	857,1774	HILLABEE CREEK NEAR HACKNEYVILLE AL
86	02419000	862,1604	136,8483	17,18879	926,8284	UPHAPEE CREEK NEAR TUSKEGEE AL
87	02420000	39126,1536	142,64	15,77261	864,7106	ALABAMA RIVER NEAR MONTGOMERY, AL.
88	02421000	759,1977	139,4511	17,93565	965,9406	CATOMA CREEK NEAR MONTGOMERY AL
89	02422500	527,5476	144,6413	17,0588	926,2126	MULBERRY CREEK AT JONES AL



90	02423555	866,304	144,8891	16,30634	894,3724	CAHABA RIVER NEAR HELENA AL
91	02427250	675,2439	148,2984	17,87299	959,0985	PINE BARREN CREEK NEAR SNOW HILL, AL.
92	02427700	252,477	145,2764	17,68061	956,2126	TURKEY CREEK AT KIMBROUGH AL
93	02430085	40,5621	151,9726	16,12634	900,825	RED BUD CREEK NR MOORES MILL, MS
94	02430615	28,7145	150,5078	16,12741	900,9	MUD CREEK NR FAIRVIEW, MS
95	02430880	47,6676	150,5197	16,25268	904,3469	CUMMINGS CREEK NR FULTON, MS
96	02438000	724,2138	154,2565	15,25298	852,0974	BUTTAHATCHEE RIVER BELOW HAMILTON AL
97	02442500	633,6252	149,7378	15,70898	871,6582	LUXAPALLILA CREEK AT MILLPORT, AL
98	02446500	1368,045	149,6656	15,96549	884,1752	SIPSEY RIVER NR ELROD, AL
99	02448500	2842,6158	144,0395	16,90298	928,9354	NOXUBEE RIVER NR GEIGER, AL
100	02448900	411,8175	143,6939	17,15942	936,2905	BODKA CREEK NEAR GEIGER, AL.
101	02449245	112,0023	142,2639	17,16315	939,5263	BRUSH CREEK NEAR EUTAW AL
102	02450000	930,0474	148,6413	15,53707	860,8116	MULBERRY FORK NEAR GARDEN CITY, AL.
103	02450180	1264,1274	148,2807	15,63349	866,4363	MULBERRY FORK NEAR ARKADELPHIA, AL.
104	02450250	231,8251662	152,2745	15,45112	860,6379	SIPSEY FORK NEAR GRAYSON AL
105	02450825	263,4417	154,7823	15,23744	848,4981	CLEAR C AT NEW HOPE CHURCH NR POPLAR SPRINGS, AL.
106	02453000	471,1806	151,9379	15,32928	852,9091	BLACKWATER CREEK NEAR MANCHESTER AL
107	02455000	784,944	144,4522	15,51114	860,2848	LOCUST FORK NEAR CLEVELAND, AL.
108	02456500	2299,5171	145,5555	15,85621	876,5622	LOCUST FORK AT SAYRE, AL.
109	02462000	384,1299	146,8005	16,56872	907,2114	VALLEY CREEK NEAR OAK GROVE AL
110	02464000	578,9448	149,8629	15,96012	882,179	NORTH RIVER NEAR SAMANTHA AL
111	02464146	15,8229	149,191	16,41333	909,625	TURKEY CREEK NEAR TUSCALOOSA
112	02464360	148,6152	147,6199	16,43008	907,0748	BINION CREEK BELOW GIN CREEK NEAR SAMANTHA AL
113	02465493	83,4174	144,1345	17,23034	939,2469	ELLIOTTS CREEK AT MOUNDVILLE AL
114	02467500	1574,1153	144,7789	17,2176	934,06	SUCARNOOCHEE RIVER AT LIVINGSTON AL
115	02469800	422,6814415	150,8964	17,94083	961,6199	SATILPA CREEK NEAR COFFEEVILLE AL
116	02470072	27,567	150,1377	17,89823	962,8965	BASSETT CREEK AT US HIGHWAY 43 NR THOMASVILLE, AL.
117	02471001	324,1945361	166,2724	19,00297	1010,485	CHICKASAW CREEK NEAR KUSHLA AL
118	02479431	52,8669	164,1265	18,16635	968,4314	POND CREEK NEAR DEER PARK AL
119	02479560	1454,3271	164,0652	18,43189	982,4299	ESCATAWPA RIVER NEAR AGRICOLA MS
120	02479945	81,999	166,5004	19,0167	1012,916	BIG CREEK AT COUNTY RD 63 NEAR WILMER, AL.
121	02479980	21,5352	169,1965	19,52351	1042,333	CROOKED CREEK NEAR FAIRVIEW, AL.
122	03439000	178,6674183	193,8229	11,52081	658,28	FRENCH BROAD RIVER AT ROSMAN, NC
123	03441000	104,292	185,7044	11,80857	672,3367	DAVIDSON RIVER NEAR BREVARD, NC
124	03443000	765,5238	187,7657	12,27236	693,9649	FRENCH BROAD RIVER AT BLANTYRE, NC
125	03446000	172,5642	162,0228	12,23888	690,2299	MILLS RIVER NEAR MILLS RIVER, NC
126	03450000	14,0805	135,3095	10,89025	631,6	BETREE CREEK NEAR SWANNANO, NC
127	03451000	335,4329109	121,659	11,96571	683,3284	SWANNANO, RIVER AT BILTMORE, NC
128	03451500	2444,735439	149,2071	12,34546	699,237	FRENCH BROAD RIVER AT ASHEVILLE, NC
129	03453500	3448,471083	137,1251	12,2852	698,7036	FRENCH BROAD RIVER AT MARSHALL, NC
130	03455000	4799,168961	132,0783	12,40098	706,1913	FRENCH BROAD RIVER NEAR NEWPORT, TN
131	03455500	72,9522	188,4923	9,816291	583,6892	W F PIGEON R ABOVE LAKE LOGAN NR HAZELWOOD, NC
132	03456500	133,4268	169,6146	10,92532	626,3083	EAST FORK PIGEON RIVER NEAR CANTON, NC
133	03456991	335,5515	161,1937	10,64739	615,8402	PIGEON RIVER NEAR CANTON, NC
134	03459500	905,6979	143,6989	10,7734	625,8571	PIGEON RIVER NEAR HEPCO, NC
135	03460000	127,0189662	156,8515	9,512379	576,52	CATALOOOCHEE CREEK NEAR CATALOOOCHEE, NC
136	03463300	112,1589	158,2882	9,699793	588,2609	SOUTH TOE RIVER NEAR CELO, NC

137	03465500	2081,599751	133,5906	11,11801	649,5878	NOLICHUCKY RIVER AT EMBREEVILLE, TN
138	03466228	35,4366	114,622	13,09009	755,4286	SINKING CREEK AT AFTON, TN
139	03471500	198,1611	123,0831	10,498	639,201	S F HOLSTON RIVER AT RIVERSIDE, NEAR CHILHOWIE, VA
140	03473000	784,8126	124,6274	10,6205	642,3537	S F HOLSTON RIVER NEAR DAMASCUS, VA
141	03475000	533,9583	115,1127	10,99795	662,4245	M F HOLSTON RIVER NEAR MEADOWVIEW, VA
142	03478400	68,11560241	121,2822	12,33671	714,9545	BEAVER CREEK AT BRISTOL, VA
143	03479000	235,6011	130,4915	10,20849	614,9532	WATAUGA RIVER NEAR SUGAR GROVE, NC
144	03488000	578,206018	117,1489	10,46058	642,4236	N F HOLSTON RIVER NEAR SALTVILLE, VA
145	03491000	124,0562449	122,0934	13,00166	752,896	BIG CREEK NEAR ROGERSVILLE, TN
146	03495500	9698,868	119,6208	12,15592	709,9108	HOLSTON RIVER NEAR KNOXVILLE, TN
147	03497300	270,9223571	172,5885	11,45269	662,5964	LITTLE RIVER ABOVE TOWNSEND, TN
148	03498500	696,7582345	150,2349	12,80763	733,8293	LITTLE RIVER NEAR MARYVILLE, TN
149	03500000	361,1439	181,337	12,32208	692,7837	LITTLE TENNESSEE RIVER NEAR PRENTISS, NC
150	03500240	145,8639	173,9399	12,14873	680,0269	CARTOOGECCHAYE CREEK NEAR FRANKLIN, NC
151	03503000	1129,9284	168,4161	12,16673	688,4768	LITTLE TENNESSEE RIVER AT NEEDMORE, NC
152	03504000	134,5167	207,2073	10,83294	626,2427	NANTAHALA RIVER NEAR RAINBOW SPRINGS, NC
153	03512000	476,0343	165,5381	10,25199	610,9874	OCONALUFTEE RIVER AT BIRDTOWN, NC
154	03513000	1694,6883	162,4107	11,11111	646,3913	TUCKASEGEE RIVER AT BRYSON CITY, NC
155	03524000	1381,8231	115,9051	10,91702	661,9111	CLINCH RIVER AT CLEVELAND, VA
156	03528000	3815,792393	121,9619	11,83814	700,5767	CLINCH RIVER ABOVE TAZEVELL, TN
157	03531500	827,6904	138,3801	11,9655	703,0385	POWELL RIVER NEAR JONESVILLE, VA
158	03532000	1780,947828	133,8072	12,18487	717,5782	POWELL RIVER NEAR ARTHUR, TN
159	03535000	177,2811	134,0685	13,14515	764,6145	BULLRUN CREEK NEAR HALLS CROSSROADS, TN
160	03539600	360,9315	149,9302	12,62603	730,0385	DADDYS CREEK NEAR HEBBERTSBURG, TN
161	03539778	441,1717097	144,4685	12,73653	739,5023	CLEAR CREEK AT LILLY BRIDGE NEAR LANCING, TN
162	03539800	1340,657354	147,1154	12,66895	734,3391	OBED RIVER NEAR LANCING, TN
163	03540500	1814,824869	147,3649	12,68973	736,1114	EMORY RIVER AT OAKDALE, TN
164	03543500	304,5888	143,1194	14,11297	807,482	SEWEE CREEK NEAR DECATUR, TN
165	03550000	268,0686	175,6699	12,08607	687,4211	VALLEY RIVER AT TOMOTLA, NC
166	03558000	456,6906	181,1502	12,38948	696,7978	TOCCOA RIVER NEAR DIAL, GA
167	03565500	149,9247	146,8982	14,13196	807,6284	OOSTANAULA CREEK NEAR SANFORD, TN
168	03567500	1108,5084	140,2371	14,69546	828,5348	SOUTH CHICKAMAUGA CREEK NEAR CHICKAMAUGA, TN
169	03568933	378,981	150,8105	13,91033	785,3226	LOOKOUT CREEK NEAR NEW ENGLAND, GA
170	03571000	1000,612309	151,0978	13,95419	789,793	SEQUATCHIE RIVER NEAR WHITWELL, TN
171	03572110	338,436	158,8405	14,27712	807,4398	CROW CREEK AT BASS
172	03574500	813,8025	151,291	14,4155	812,2773	PAINT ROCK RIVER NEAR WOODVILLE AL
173	03575000	887,6691	145,9958	14,75557	828,3311	FLINT RIVER NEAR CHASE AL
174	03575830	126,723815	146,6295	15,25984	852,0661	INDIAN CREEK NEAR MADISON AL
175	03576250	313,5159	146,8566	14,98695	836,8603	LIMESTONE CREEK NEAR ATHENS AL
176	03578000	168,7671	157,6779	13,50979	773,2604	ELK RIVER NEAR PELHAM, TN
177	03586500	423,4068	149,1153	15,91658	886,9372	BIG NANCE CREEK AT COURTLAND AL
178	03588000	141,1173	152,2353	14,14139	797,9276	SHOAL CREEK AT LAWRENCEBURG, TN
179	03588500	900,6093	151,3036	14,18925	804,9633	SHOAL CREEK AT IRON CITY, TN
180	03592718	66,9897	150,8187	15,52021	874,6515	LITTLE YELLOW CREEK EAST NR BURNSVILLE, MS
181	0344894205	38,6046	153,951	9,59059	580,9487	NORTH FORK SWANNANOVA RIVER NEAR WALKERTOWN, NC
182	0357479650	75,95653053	146,4721	14,61045	822,7564	HESTER CREEK AT BUDDY WILLIAMSON RD NR PLEVNA, AL

*Tabella A1: Dataset relativo alle informazioni principali sui bacini in esame*

## **APPENDICE B - STRUTTURA DEL DATABASE DEI DEFLUSSI**

<b>Bacino</b>	<b>Anno</b>	<b>Mese</b>	<b>Giorno 1</b>	<b>Giorno 2</b>	<b>Giorno 3</b>	<b>Giorno i</b>	<b>Giorno 29</b>	<b>Giorno 30</b>	<b>Giorno 31</b>
2177000	1939	1	220	230	220	...	210	210	200
2177000	1939	2	200	200	200	...	167	164	-9999
2177000	1939	3	181	277	208	...	232	200	181
2177000	1939	4	170	160	152	...	211	210	209
2177000	1939	5	208	208	220	...	-9999	-9999	-9999
2177000	1939	6	421	403	536	...	658	826	850
2177000	1939	7	650	561	505	...	554	547	-9999
2177000	1939	8	628	582	533	...	328	361	328
2177000	1939	9	307	297	287	...	302	250	-9999
2177000	1939	10	224	216	224	...	208	196	196
2177000	1939	11	212	220	204	...	1830	14800	2930
2177000	1939	12	1900	1510	1270	...	384	372	-9999

**Tabella B1:** Sottomatrice del Database 10384 x 34 relativa all'anno 1939 di osservazione dei dati di portata relativi al bacino del Chattooga River (Georgia). Si vede come nella prima colonna sia riportato il codice identificativo del bacino, nella seconda colonna l'anno di riferimento, nella terza i mesi dell'anno idrologico che vanno da ottobre (1) a settembre (12). Dalla quarta alla 34<sup>a</sup> colonna sono riportati i valori dei deflussi superficiali espressi in  $ft^3/s$ : nei mesi costituiti da 30 giorni, al giorno 31 è riportato l'identificativo -9999 che indica la mancanza del dato. Per il mese di febbraio (5) tale identificativo è utilizzato anche per il giorno 30 e 29 compresi gli anni bisestili. In colonna due ogni anno è ripetuto 12 volte, mentre il codice del bacino 12xAnni di osservazione.



## ***APPENDICE C - CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI***

### **C1 - Script R per la costruzione delle curve stagionali**

```
## Caricamento delle variabili##
Q=read.table("Data_Base_USA.txt") #Database in Tabella B1
cod=scan("Bacini.txt")
ncod=length(cod)
## Costruzione delle curve##
for(i in 1:ncod)
{
  A=Q[which(Q[,1]==cod[i]),] #Tabella B1 per un singolo bacino
  B=A[which(A[,3]==c(6:12)),] #Considera solo i mesi della
  Stagione 2
  C=B[,4:34]
  D=c(as.matrix(C))
  E=C[which(D!=-9999)]#Elimina i -9999
  FDC=sort(E,decreasing=TRUE) #mette le portate in ordine
  decerscente
}
```

### **C2 - Script R per la costruzione delle curve percentile P10**

```
##Caricamento delle variabili##
Q=read.table("Data_Base_USA.txt")
cod=scan("Bacini.txt")
Anni=unique(Q_staz[,2])#Determina gli anni di osservazione
N_anni=length(Anni)
N_col=N_anni+1
##Calcolo curve percentili##
A=matrix(NA,365,N_col)
P10=rep(NA,365)
for(y in 1:N_anni)
{
  A=Q_staz[which(Q_staz[,2]==Anni[y]),] #Contiene un solo anno
  dummy1=dummy[,4:34]
```

```

dummy2=c(as.matrix(dummy1))
dummy3=dummy2[which(dummy2!=-9999)]
A[,y]=sort(dummy3, decreasing=TRUE)#Tabella B2 con gli anni
in colonna
}
for (i in 1:365)
{
  P10[i]=quantile(A[i+1,2:(N_anni+1)], probs=0.1,
names=FALSE)#Calcola P10
}
A[,N_col]=P10

```

### **C3 - Script R per il calcolo dei TND**

```

Q=read.table("Data_Base_USA.txt")
cod=scan("Bacini.txt")
MAF=scan("MAF.txt")
ncod=length(cod)
TND=c()
Nanni=c()
for(i in 1:ncod)
{
  Q1=Q[which(Q[,1]==cod[i]),]
  Nanni[i]=length(unique(Q1[,2]))
m=min(Nanni)
FDC_stand=FDC/MAF[i] #dove FDC è quella calcolata in C1 e può
essere percentile o stagionale e standardizzata per MAF o MAP*
maxd=(m*365)/(m*365+1)
TND[i]=fdc.tnd(FDC_stand,norm=TRUE,maxd=maxd)#fdc.tnd è un
funzione già implementata
}

```

### **C4 Codice per l'applicazione del top-kriging ai TND**

```

library(rtop)
library(rgdal, maptools)
observations = readOGR(".", "se_gages_182")

```

```

predictionLocations = readOGR(".", "se_gages_182")
observations$obs <- vettoreTND
rtopObj <- createRtopObject(observations, predictionLocations,
formulaString = obs~1,params = list(gDist = TRUE, rresol
500,unc=TRUE, wlim=1, nmax=50, model="Ex1")) ##nmax
rappresenta il vicinaggio ed Ex1 è il variogramma teorico
rtopObj <- rtopVariogram(rtopObj)
rtopObj <- rtopFitVariogram(rtopObj)
rtopObj <- rtopKrige(rtopObj,cv=TRUE,wret=TRUE)
##### NSE #####
predictions = rtopObj$predictions
NSE=1-sum((predictions$obs-
predictions$var1.pred)^2)/sum((predictions$obs-
mean(predictions$obs))^2)
LNSE=1-sum((log(predictions$obs) -
log(predictions$var1.pred))^2) / sum((log(predictions$obs) -
mean(log(predictions$obs)))^2)
weights <- rtopObj$weight ##matrice dei pesi

```

## **C5 Codice per la ricostruzione delle curve di durata**

```

Q=read.table("Data_Base_USA.txt")
cod=scan("Bacini.txt")
l=length(cod)
medie=scan("MAF.txt")
np<-20
sam<-pnorm(seq(-3,3,6/(np-1))) ### campionamento raffittito
alle code
emp<-matrix(NA,nrow=np,ncol=182) #variabili osservate
ricampionate nei punti sam
est<-matrix(NA,nrow=np,ncol=182)
for(j in 1:l)
{
resamp<-resample.FDC(FDC/medie[j],sam=sam,norm=FALSE)
#Funzione di ricampionamento già implementata
emp[,j]<-resamp$y #matrice delle osservazioni
}

```

```
weights=read.table("Pesi_POR_MAP_TK_Ex1_Vic50.txt")
est<-emp%*%t(weights) ##### matrice stimata ricavata dai pesi
relativi all'applicazione del TK ai TND
```



## ***RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI***

- Adamowski, K. and Bocci, C. (2001).** Geostatistical regional trend detection in river flow data, *Hydrol. Processes*, 15, 3331–3341.
- Archfield, S.A., (2009).** Estimation of continuous daily streamflow at ungaged locations in southern New England, Tufts University, Medford, MA, Ph.D. dissertation.
- Beckers, J., and Y. Alila (2004).** A model of rapid preferential hillslope runoff contributions to peakflow generation in a temperate rain forest watershed, *Water Resources Research*, 40(3), 1-19, doi:10.1029/2003WR002582.
- Bononi A. (2014).** Tecniche a base geostatistica per la stima delle curve di durata delle portate fluviali in assenza di osservazioni: applicazione ad una vasta area geografica degli stati uniti sudorientali. Tesi di laurea magistrale, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna.
- Brath, A., Castellarin, A., and Montanari, A. (2003).** Assessing the reliability of regional depth-duration-frequency equations for gaged and ungaged sites, *Water Resour. Res.*, 39, 1367, doi:10.1029/2003WR002399, 2003.
- Castellarin, A., G. Botter, D.A. Hughes, S. Liu, T.B.M.J. Ouarda, J. Parajka, D. Post, M. Castellarin, A., G. Camorani, and A. Brath (2007).** Predicting annual and long-term flow-duration curves in ungauged basins, *Advances in Water Resources*, 30(4), 937-953, doi:10.1016/j.advwatres.2006.08.006.
- Castellarin, A., G. Galeati, L. Brandimarte, A. Montanari, and A. Brath (2004a).** Regional flow duration curves: reliability for ungauged basins, *Advances in Water Resources*, 27(10), 953-965, doi:10.1016/j.advwatres.2004.08.005.
- Castellarin, A., R. Vogel, and A. Brath (2004b).** A stochastic index flow model of flow duration curves, *Water Resources Research*, 40(3), 1-10, doi:10.1029/2003WR002524.
- Cheng, Lei, M. A. Yaeger, A. Viglione, E. Coopersmith, Sheng Y., and M. Sivapalan (2012).** Exploring the physical controls of regional patterns of Flow Duration Curves: 1. Insights from statistical analyses, *Hydrology and Earth System Sciences (Discuss)*, 9, 7001-7034 , doi:10.5194/hessd-9-7001-2012.
- Cressie, N. (1991).** *Statistics for spatial data*, Wiley, New York, NY, 1991.
- Daviau, J.-L., Adamowski, K., and Patry, G. G. (2000).** Regional flood frequency analysis using GIS, L-moment and geostatistical methods, *Hydrol. Processes*, 14, 2731–2753.
- de Marsily, G (1986).** *Quantitative hydrogeology*, Academic Press Inc., London, 1986.

duration curve estimation at ungauged sites in France, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8), 2421-2435, doi:10.5194/hess-15-2421-2011.

**Eaton, B., Church, M., and Ham, D. (2002).** Scaling and regionalization of flood flows in British Columbia, Canada, *Hydrol. Processes*, 16, 3245–3263.

**Estes, C. C. and J.F. Orsborn, (1986).** Review and Analysis of Methods for Quantifying Instream Flow Requirements. *Water Resources Bulletin* 22(3):389.

Exploring the physical controls of regional patterns of Flow Duration Curves: 4. A synthesis of empirical analysis, process modeling and catchment classification. *Hydrology and Earth System Sciences (Discuss.)*, 9, 7131-7180.

**Fennessey, N.M. e Vogel, R.M. (1994).** *Flow duration curve. 1. New interpretation and confidence intervals.* *Journal of water resources planning and management*, Vol. 120, no. 4.

**Fennessey, N.M. e Vogel, R.M. (1995).** *Flow duration curve. 2. A review of applications in water resources planning.* *Water resources bulletin*, Vol. 31, no.6.

**Ganora, D., P. Claps, F. Laio, and A. Viglione (2009).** An approach to estimate nonparametric flow duration curves in ungauged basins, *Water Resources Research*, 45(10), 1-10, doi:10.1029/2008WR007472.

**Gottschalk, L (1993).** Correlation and covariance of runoff, *Stochastic hydrology and hydraulics*, 7, 85–101, a.

**Gottschalk, L. (1993).** Interpolation of runoff applying objective methods, *Stoch. Hydrol. Hydraul.*, 7, 269–281, b.

**Holmes, M. G. R., A. R. Young, A. Gustard, and R. Grew (2002).** A region of influence approach to predicting flow duration curves within ungauged catchments, *Hydrology and Earth*

*In: Hydrology and Earth System Sciences* 10.2, pp. 277–287. doi: 10.5194/hess- 10- 277-2006.

**Jin, S., Yang, L., Danielson, P., Homer, C., Fry, J., and Xian, G., (2013).** A comprehensive change detection method for updating the National Land Cover Database to circa 2011: *Remote Sensing of Environment*, 132: 159-175.

**Journel, A. G. and Huijbregts, C. J (1978).** *Mining geostatistics*, Academic Press, London, UK.

**LeBoutillier, D. W., and P. R. Waylen (1993a).** A stochastic model of flow duration curves, *Water Resources Research*, 29(10), 3535-3541, doi:10.1029/93WR01409.

- Lebouthillier, D. W., and P. R. Waylen (1993b).** Regional Variations in Flow-Duration Curves for Rivers in British Columbia, Canada, *Physical Geography*, 14(4), 359-378, doi:10.1002/arch.20417.
- Ley, R., M. C. Casper, H. Hellebrand, and R. Merz (2011).** Catchment classification by runoff behaviour with self-organizing maps (SOM), *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9), 2947-2962, doi:10.5194/hess-15-2947-2011.
- Merz, R. and Blöschl, G. (2005).** Flood frequency regionalisation – Spatial proximity vs. catchment attributes, *J. Hydrol.*, 302, 283–306.
- Milhous, R. T., J. M. Bartholow, M. A. Updike, and A. R. Moos.,1990.** Reference Manual for the Generation and Analysis of Habitat Time Series - Version II. Instream Flow Information Paper No. 27, U.S. Fish Wild. Serv., BioI. Rep. 90.
- Mohamoud, Y. M (2008).** Prediction of Daily Flow Duration Curves and Streamflow for Ungauged Catchments Using Regional Flow Duration Curves, *Hydrological Sciences Journal*, IAHS Limited, Oxford, Uk, 53(4):706-724.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970).** River flow forecasting through conceptual models part I— A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290.
- Nestler, J. M., R. T. Milhous, and J. B. Layzer, 1989.** Instream Habitat Modeling Techniques. *In: Alternatives in Regulative*, J. A. Gore and G. E. Petts (Editors). CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 295-315.
- Ouarda, T. B. M. J., M. Haché, P. Bruneau, and B. Bobée (2000).** Regional flood peak and volume estimation in northern Canadian basin, *Journal of cold regions engineering*, 14(4), 176.
- Pugliese, A., Castellarin, A., and Brath, A. (2014).** Geostatistical prediction of flow–duration curves in an index-flow framework, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 3801–3816, 2014.
- Raspa, G. e R. Bruno (1994a).** Dispense di Geostatistica Applicata. Capitolo 3 - Geostatistica Resources, 30(8), 1756-1774, doi:10.1016/j.advwatres.2007.01.005.
- Sauquet, E., and C. Catalogne (2011).** Comparison of catchment grouping methods for flow
- Sauquet, E., Gottschalk, L., and Leblois, E (2000).** Mapping average annual runoff: a hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme, *Hydrol. Sci. J.*, 45, 799–815.
- Sawicz, K., T. Wagener, M. Sivapalan, P. A. Troch, and G. Carrillo (2011).** Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the

eastern USA, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9), 2895-2911, doi:10.5194/hess-15-2895-2011.

**Shu, C. and Ouarda T. B. M. J. (2012).** Improved methods for daily streamflow estimates at ungauged sites, *Water Resour. Res.*, 48, W02523, doi:10.1029/2011WR011501, 2012.

**Skøien, J. O., Blöschl, G., and Western, A. W. (2003)** Characteristic space-time scales in hydrology, *Water Resour. Res.*, 39, 1304.

**Skøien, J. O., R. Merz e G. Blöschl (2006).** Top-kriging - geostatistics on stream networks *System Sciences*, 6(4), 721-731, doi:10.5194/hess-6-721-2002.

**Sivapalan, C. Spence, A. Viglione and R. Vogel (2013).** Prediction of flow duration curves in ungauged basins, Chp. 7 in *Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales* (Eds. G. Blöschl, M. Sivapalan, T. Wagener, A. Viglione, H. Savenije, ISBN-13: 9781107028180, 19 April 2013, pp. 135-162.).

**Weibull, W. (1951).** *A statistical distribution function of wide applicability* in *J. Appl. Mech.-Trans. ASME*, vol. 18, n° 3, 1951, pp. 293--297.

**Yadav, M., T. Wagener, and H. Gupta (2007).** Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins, *Advances in Water Resources*, 30(8), 1756-1774, doi:10.1016/j.advwatres.2007.01.005.

**Yaeger, M. A., E. Coopersmith, Sheng Ye, Lei Cheng, A. Viglione and M. Sivapalan (2012).**

**Yokoo, Y., and M. Sivapalan (2011).** Towards reconstruction of the flow duration curve: development of a conceptual framework with a physical basis, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 2805-2819, doi:10.5194/hess-15-2805-2011.

## **RINGRAZIAMENTI**

Desidero ringraziare innanzitutto il Prof. Attilio Castellarin per avermi dato la possibilità di sviluppare una tesi su di un argomento, i modelli idrologici, che mi piace tantissimo. Ringrazio sentitamente Alessio Pugliese per avermi aiutato in questi mesi sia con R che con Qgis.

Un ringraziamento speciale va a mia madre e mio padre che in tutti questi anni di studio mi hanno sostenuto sperando di non aver dato loro troppe preoccupazioni. Ringrazio le mie sorelle Anna e Carmen che, da vicino e da lontano, si sono sempre interessate a me e mi hanno supportato quando ce n'è stato bisogno. Ringrazio Pasquale che è sempre stato di compagnia in ogni ambito in questi 5 anni e, specialmente i primi tempi, mi ha aiutato moltissimo ad ambientarmi in un posto così lontano da casa. Ringrazio tutti i miei zii, zie e cugini per il supporto e sostegno e soprattutto zio Cataldo e zia Laura perché, vivendo nel mio stesso paese, sono stati presenti in ogni momento della mia vita. Ringrazio nonna Carmela e nonno Giovanni che mi chiamano sempre e scusate se invece io non mi faccio sentire spesso (comunque vi penso sempre). Ringrazio nonna Anna e nonno Antonio che, nonostante il silenzio che hanno lasciato negli ultimi anni, gridano nella mia testa complimentandosi con me.

Ringrazio Felice, mio amico di infanzia, con il quale ne ho passate tante e di tutti i tipi: ti voglio bene.

Ringrazio tutti i miei amici di Bologna per tutte le risate e le fantastiche esperienze e in particolare: Carlo, Alessandro, Niccolò, Chiara e Alessandra.

Ringrazio, infine, Alessia: sono contento di averti conosciuto e di aver avuto modo di completare insieme a te questo percorso.