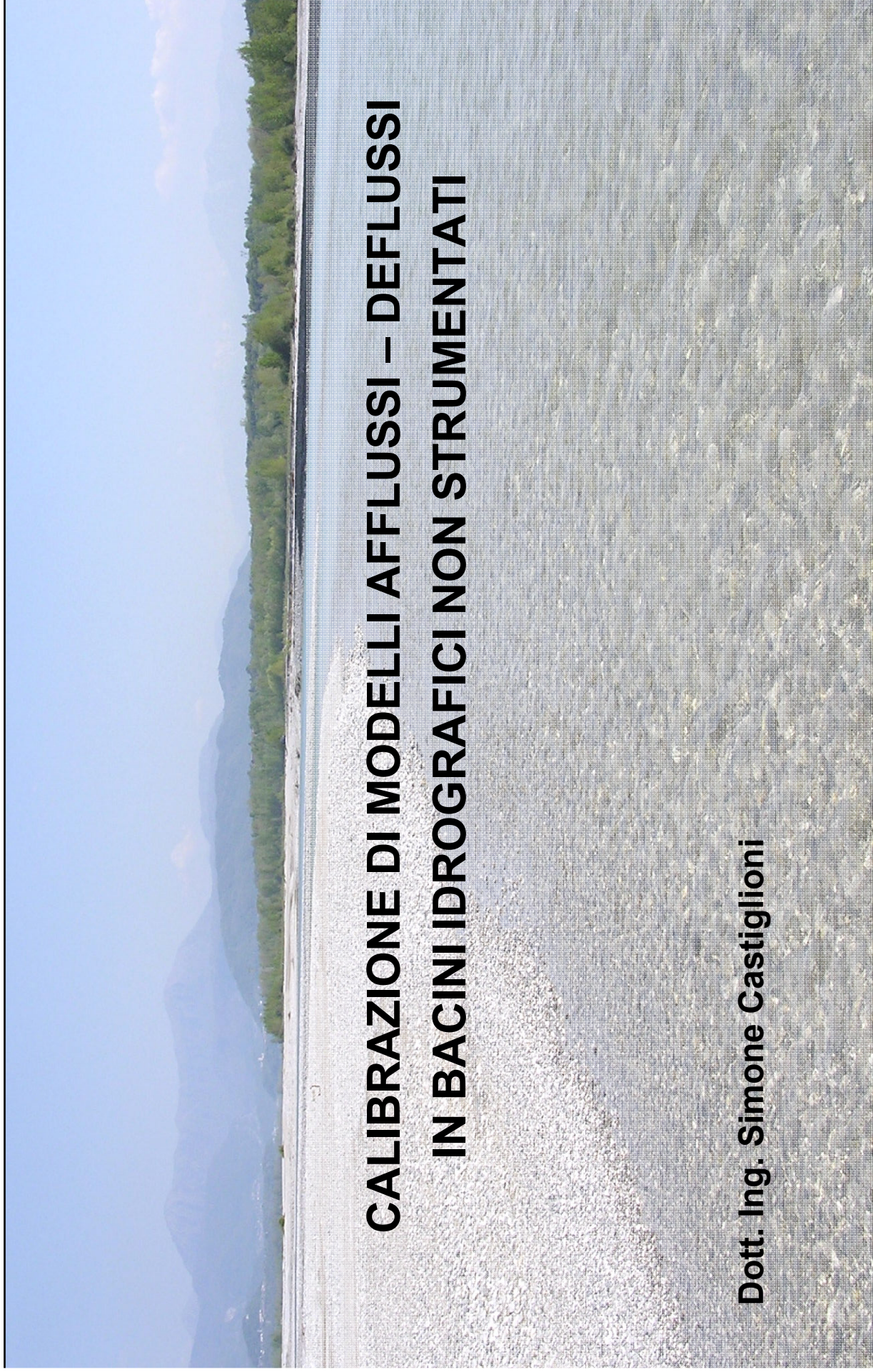
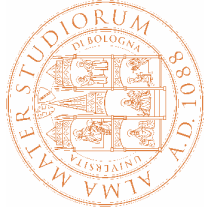


**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**  
**Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali**  
**Bologna, 10 Novembre 2010**



# **CALIBRAZIONE DI MODELLI AFFLUSSI – DEFLUSSI IN BACINI IDROGRAFICI NON STRUMENTATI**

**Dott. Ing. Simone Castiglioni**

# Introduzione

Tecniche comunemente utilizzate per la stima delle grandezze idrometriche di interesse in bacini idrografici non strumentati:

- Stima delle grandezze caratteristiche dei deflussi fluviali (ad es. media, varianza, indici caratteristici di piena o di magra,...);
- Stima indiretta delle curve di durata delle portate;
- Modellazione afflussi – deflussi per la stima delle risorse idriche superficiali in bacini idrografici non strumentati.



# Introduzione

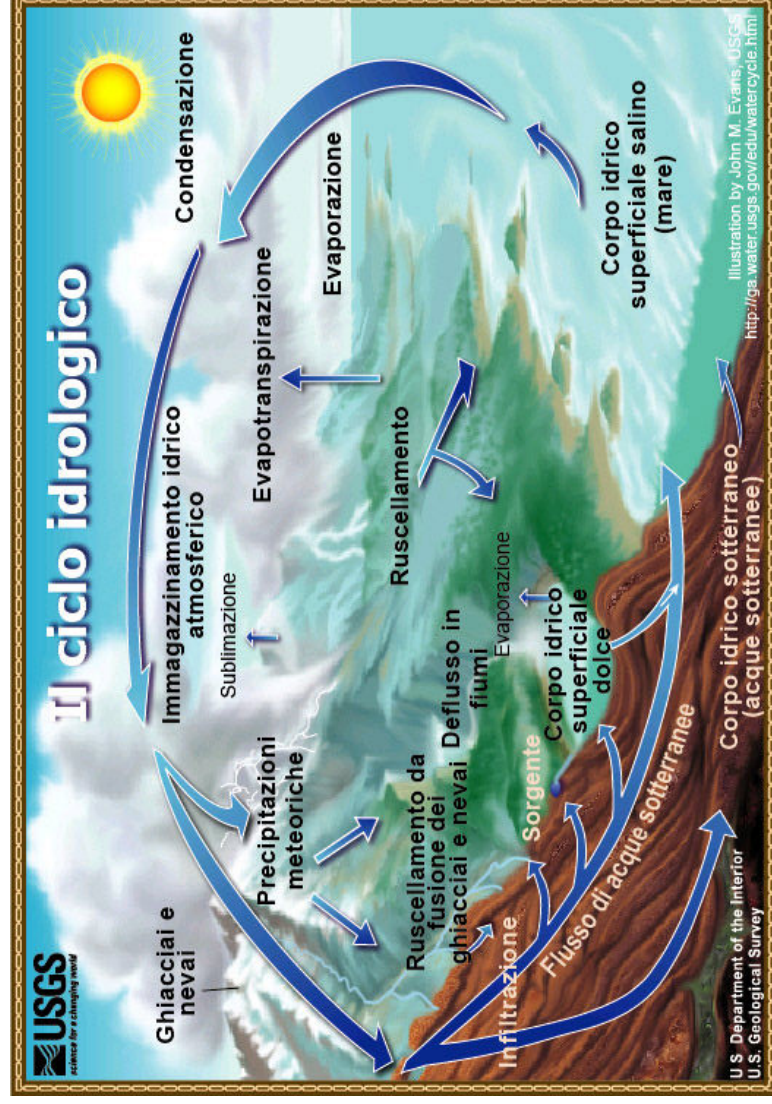
Tecniche comunemente utilizzate per la stima delle grandezze idrometriche di interesse in bacini idrografici non strumentati:

- Stima delle grandezze caratteristiche dei deflussi fluviali (ad es. media, varianza, indici caratteristici di piena o di magra,...);
- Stima indiretta delle curve di durata delle portate;
- Modellazione afflussi – deflussi per la stima delle risorse idriche superficiali in bacini idrografici non strumentati.



# Modelli afflussi-deflussi

Un modello afflussi-deflussi si propone di fornire una descrizione matematica (sistema di equazioni) dei processi idrologici che si svolgono nel bacino idrografico. I modelli possono descrivere un valore puntuale della variabile (es. portata di piena) oppure la sua progressione nel tempo (idrogramma delle portate).



Variabili in input  
(P, T, EPT,..)



Modello afflussi – deflussi  
(parametri)



Portate (Q)

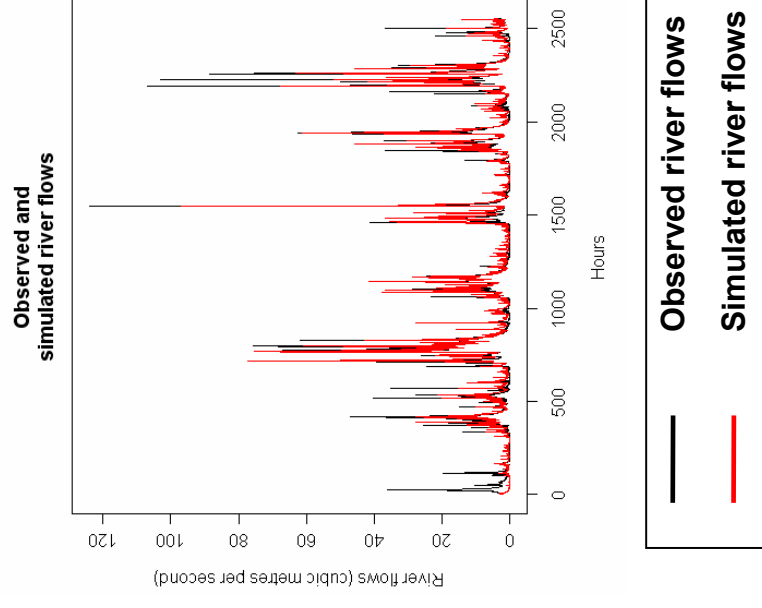
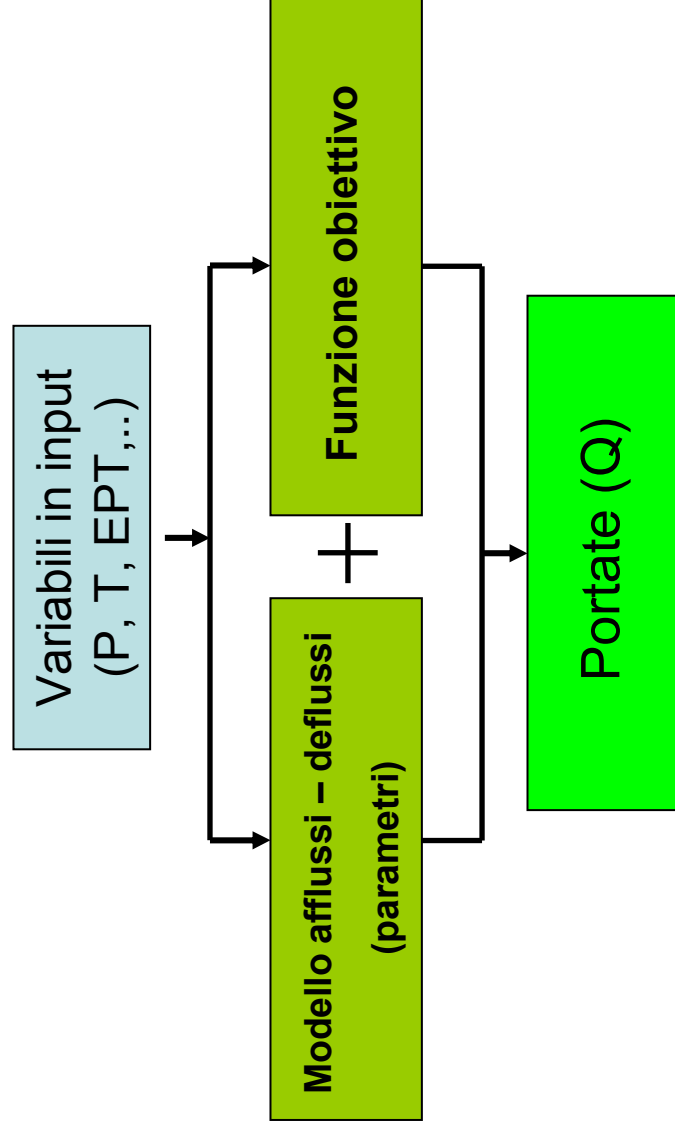


“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”  
DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)

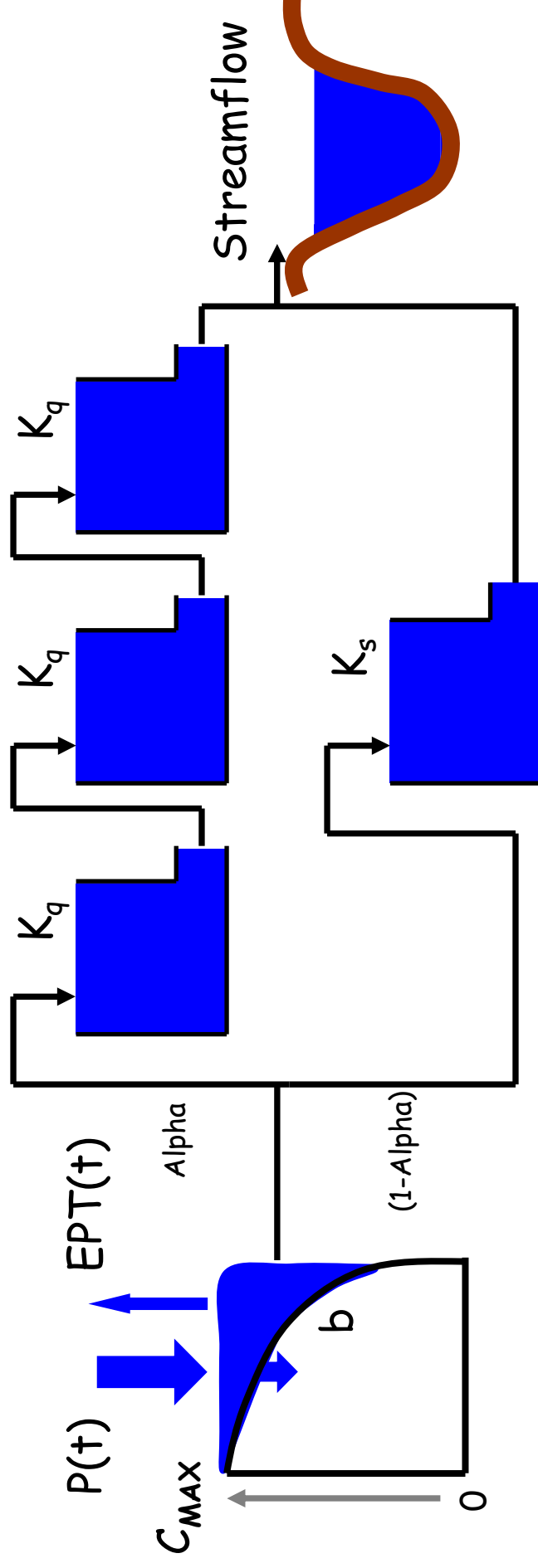


# Modelli afflussi-deflussi: calibrazione

Il confronto fra i dati simulati e quelli osservati consente attraverso l'uso di un'opportuna funzione obiettivo la stima dei parametri del modello che permettono una riproduzione ottimale dei deflussi osservati.

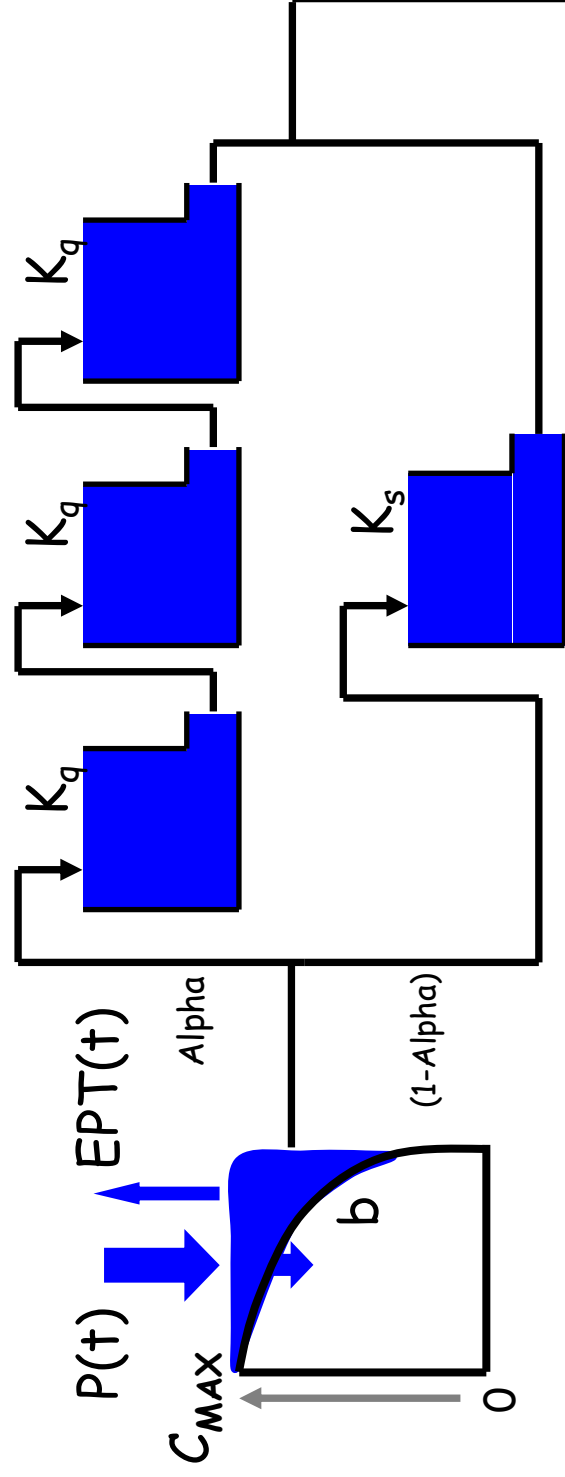


# Esempio di modello afflussi-deflussi: HYMOD



- $C_{MAX}$ : capacità massima di assorbimento del terreno [mm];
- $b$ : il grado di variabilità spaziale della capacità di umidità del suolo sul bacino [ - ];
- $\text{Alpha}$ : fattore di ripartizione del deflusso tra le due serie di serbatoi [ - ];
- $K_q$  e  $K_s$ : tempo di residenza delle due serie di serbatoi che generano rispettivamente il deflusso veloce e lento [ $\text{day}^{-1}$ ].

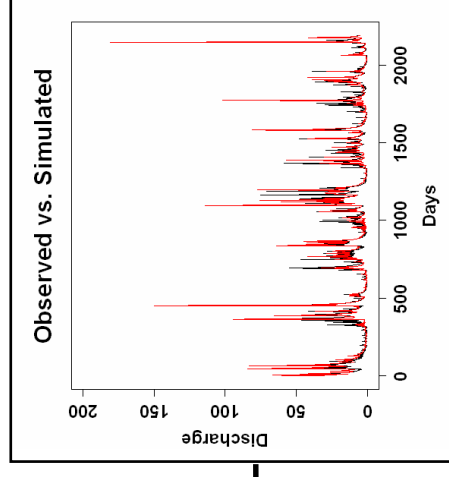
# Modelli afflussi-deflussi: calibrazione tradizionale



L'ottimizzazione del confronto viene realizzata mediante una funzione obiettivo, solitamente si usa l'errore quadratico medio (*Mean Square Error, MSE*):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{sim i} - Q_{oss i})^2$$

Ottimizzazione Confronto



Parametri modello ( $\theta$ )



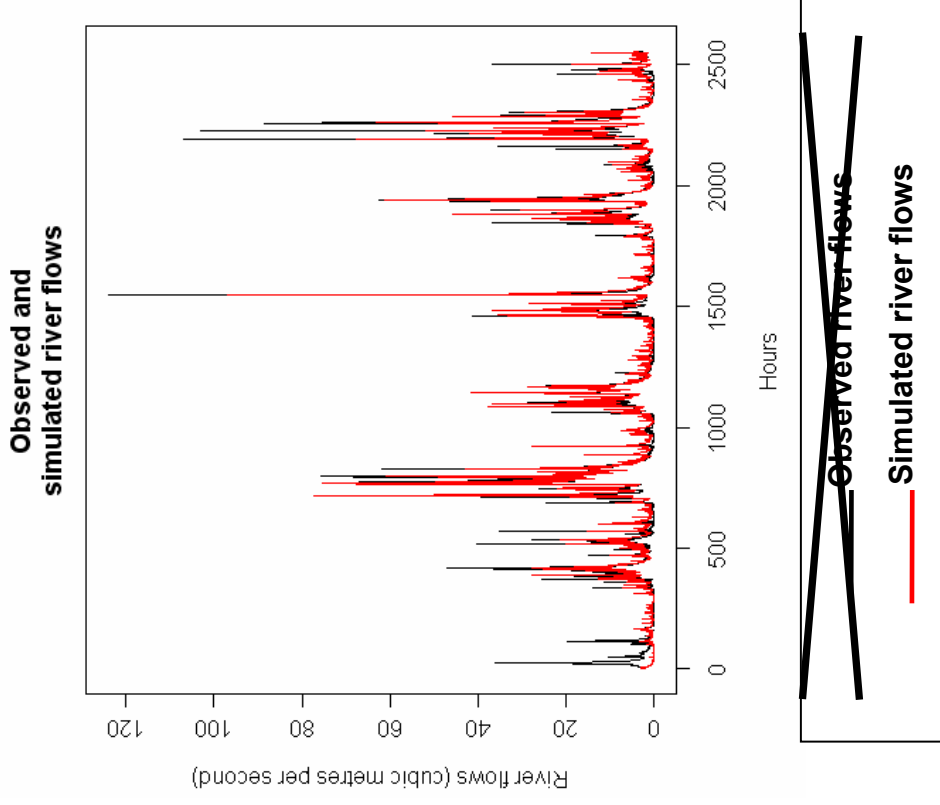
“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”  
 DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)



# Introduzione

La calibrazione di un modello idrologico viene realizzata solitamente attraverso il confronto fra i dati simulati ed i corrispondenti valori osservati, ricercando i parametri che ne ottimizzano il confronto.

Tuttavia non di rado si deve far fronte all'incompletezza e alla carenza dei dati idrometrici ricorrendo a metodi indiretti per la stima dei parametri.



*"Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati"*  
DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)





# Modellazione delle portate idriche: Emilia Romagna

Nell'ambito della preparazione del Piano Regionale di Tutela delle Acque (PTA) è stata effettuata una modellazione afflussi e deflussi delle principali aste fluviali dell'Emilia Romagna descritta in dettaglio nella relazione "Modelli afflussi-deflussi sul reticolo idrografico naturale principale del territorio regionale" (ARPA Ingegneria Ambientale Emilia-Romagna).

Precipitazione e Temperatura  
giornaliere



## Modello concettuale

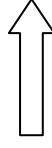
**Deflusso superficiale**  
+ Deflusso ipodermico  
+ Deflusso profondo o di base  
- Evapotraspirazione  
- Infiltrazione in falde  
- Derivazioni

Verifica delle prestazioni del modello, mediante:

- **Q medie annue;**
- **minimo e massimo deflusso mensile;**
- **curve di durata delle portate;**

Determinazione dei parametri di taratura del modello, sulla base delle **misure di portata disponibili in anni antecedenti**, e di **procedimenti di regionalizzazione** dei parametri stessi ai fini di stimarne il valore in riferimento ai bacini non strumentati.

**Portate idriche giornaliere  
(1991-2001)**



"Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati"  
DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)



# Struttura presentazione

- Procedura di calibrazione per modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati basata sulla regionalizzazione dei parametri dei modelli.
- Procedura innovativa (calibrazione spettrale) per la calibrazione di modelli afflussi- deflussi in bacini idrografici non strumentati mediante l'utilizzo delle caratteristiche statistiche delle serie dei deflussi fluviali.
- Esempio di applicazione della *calibrazione spettrale.*



# Struttura presentazione

- Procedura di calibrazione per modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati basata sulla regionalizzazione dei parametri dei modelli.
- Procedura innovativa (calibrazione spettrale) per la calibrazione di modelli afflussi- deflussi in bacini idrografici non strumentati mediante l'utilizzo delle caratteristiche statistiche delle serie dei deflussi fluviali.
- Esempio di applicazione della calibrazione spettrale.



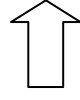
# Calibrazione mediante regionalizzazione dei parametri

## Bacini Strumentati

Selezione di  $N$  bacini per i quali sia applicabile un modello afflussi-deflussi prestabilito



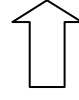
Calibrazione del modello per ottenere un set ottimale di parametri ( $\theta$ ) per ciascun bacino



Serie portate osservate ( $Q$ )



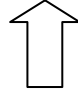
Modelli regionali per la stima degli  $N$  set di parametri in funzione dei descrittori dei bacini



Parametri Descrittori Geomorfoclimatici



Modello regionale per stima dei parametri



Parametri Descrittori Geomorfoclimatici

Parametri modello ( $\theta$ )

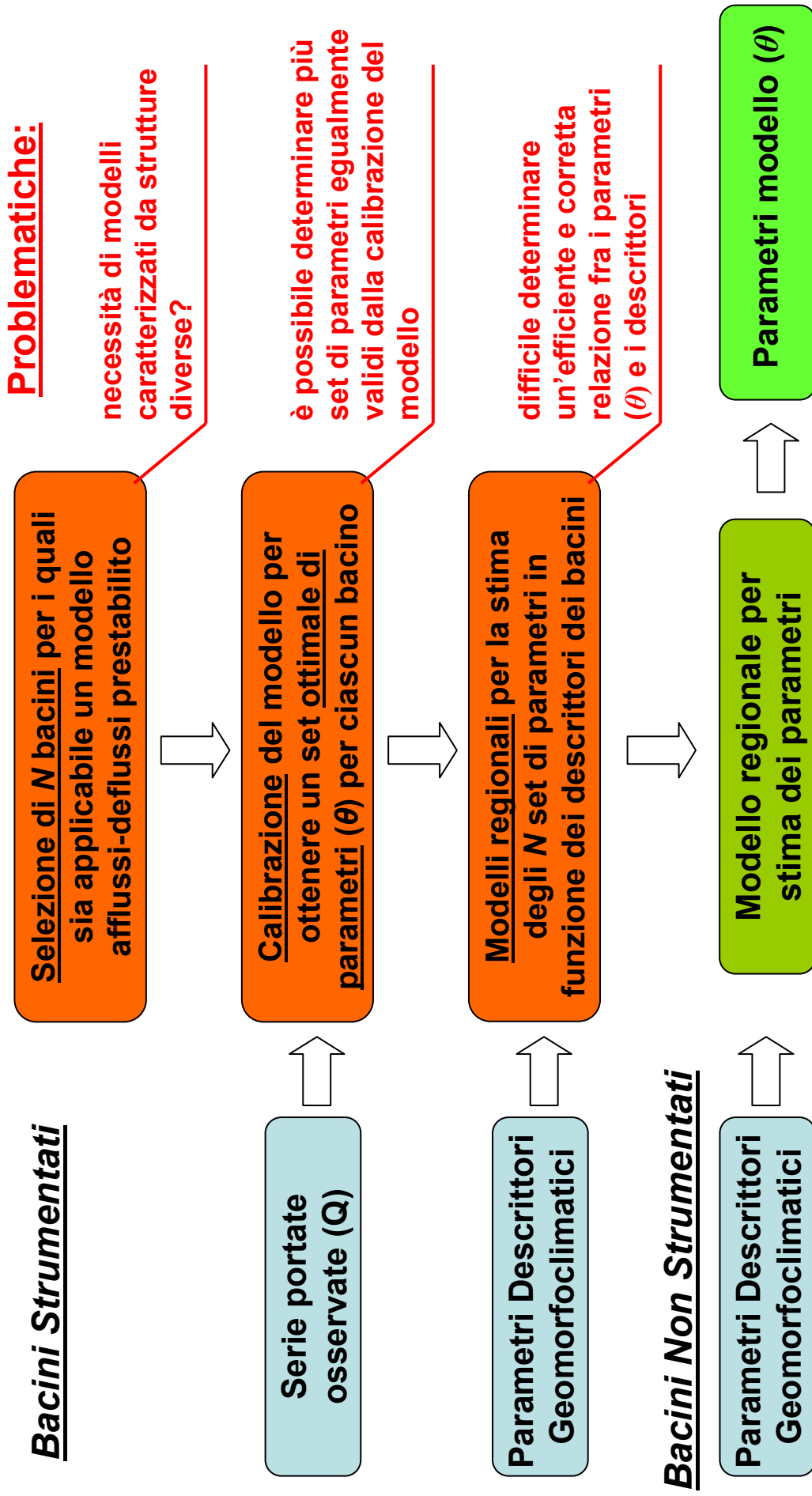
## Bacini Non Strumentati



“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”  
DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)



# Calibrazione mediante regionalizzazione dei parametri



# Struttura presentazione

- Procedura di calibrazione per modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati basata sulla regionalizzazione dei parametri dei modelli.
- Procedura innovativa (calibrazione spettrale) per la calibrazione di modelli afflussi- deflussi in bacini idrografici non strumentati mediante l'utilizzo delle caratteristiche statistiche delle serie dei deflussi fluviali.
- Esempio di applicazione della calibrazione spettrale.



“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”  
DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)



# Selezione delle statistiche delle serie

Montanari, A., Toth, E. (2007) "Calibration of hydrological models in the spectral domain: An opportunity for scarcely gauged basins?", *WRR*.

$$W(\theta) = \sum_{j=1}^{N/2} \left\{ \log[J_M(\lambda_j, \theta)] + \frac{J(\lambda_j)}{J_M(\lambda_j, \theta)} \right\}$$

Approssimazione di Whittle della funzione di verosimiglianza Gaussiana per bacini non strumentati

dove  $N$  è il numero delle osservazioni di portata,  $\lambda_j = 2\pi j/N$  indica le frequenze di Fourier,  $J_M$  è il periodogramma delle portate simulate dal modello idrologico e dipendenti dal vettore dei parametri  $\theta$ ,  $J(\lambda_j)$  è il periodogramma delle serie di portate osservate che è necessario stimare attraverso metodi indiretti.

$$W(\theta) = f(J_M, J(\lambda_j)) \quad \rightarrow$$

Assumendo nulla la media degli errori di simulazione del modello afflussi – deflussi.

$$\Phi(\theta) = f(\mu, \text{periodogramma}) \quad \rightarrow$$

$$\Phi(\theta) = f(\mu, \sigma^2, \rho_1) \quad \leftarrow$$

Assumendo che i deflussi possano essere rappresentati da un processo autoregressivo del primo ordine (AR1, si veda Brockwell e Davis, 1987).



# Selezione delle statistiche delle serie

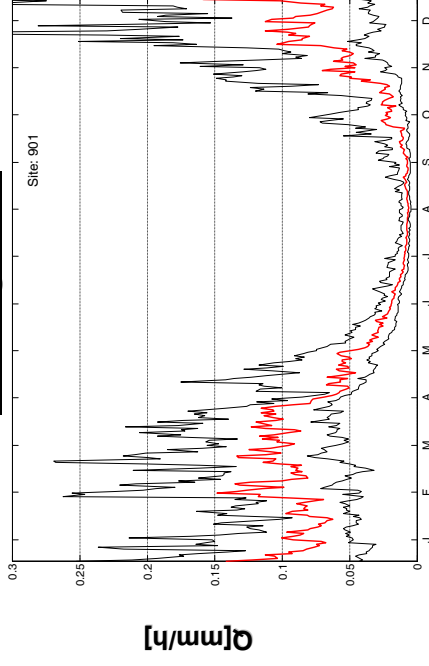
La calibrazione spettrale offre il vantaggio di poter efficacemente esprimere la funzione obiettivo in funzione delle caratteristiche geomorfologiche e climatiche dei bacini idrografici.

Caratteristiche statistiche prese in considerazione:

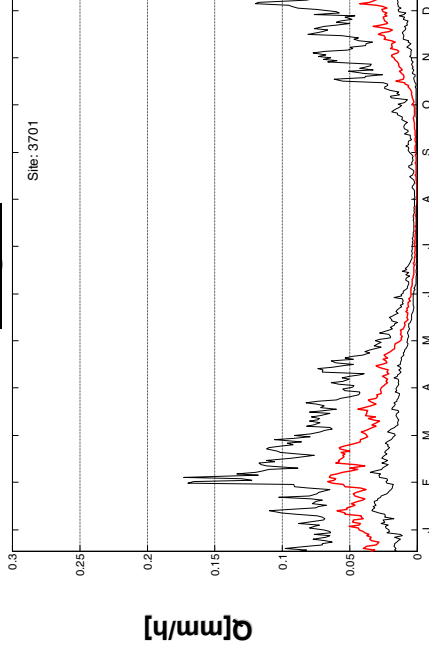
- **media di lungo periodo ( $\mu$ );**
- **la varianza ( $\sigma^2$ );**
- il coefficiente di autocorrelazione a ritardo un giorno ( $\rho_1$ ).

forniscono indicazione circa l'entità media e la variabilità dei deflussi fluviali.

## Candigliano



## Foggia



“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”  
DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)





# Selezione delle statistiche delle serie

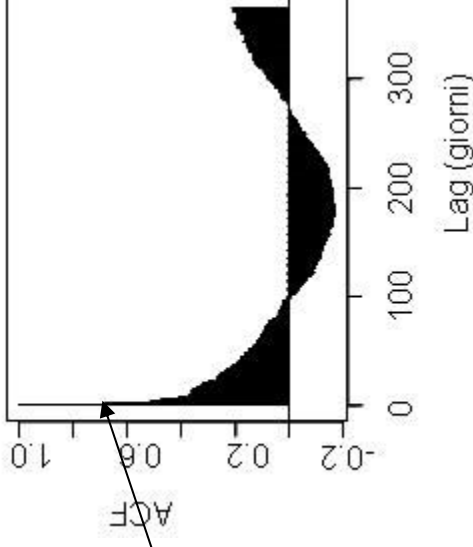
La calibrazione spettrale offre il vantaggio di poter efficacemente esprimere la funzione obiettivo in funzione delle caratteristiche geomorfologiche e climatiche dei bacini idrografici.

Caratteristiche statistiche prese in considerazione:

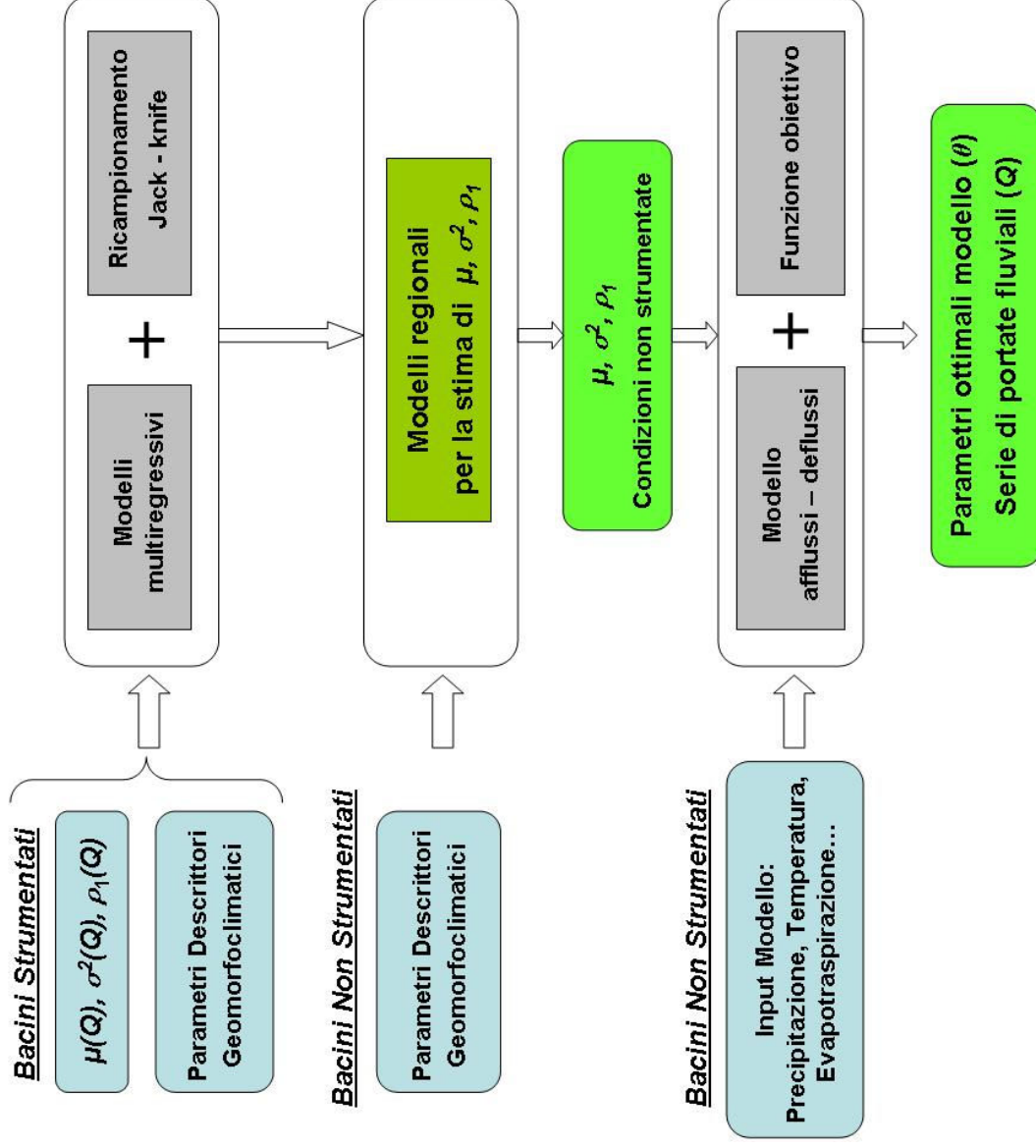
- media di lungo periodo ( $\mu$ );
- la varianza ( $\sigma^2$ );
- **il coefficiente di autocorrelazione a ritardo un giorno ( $\rho_1$ ).**

fornisce indicazioni riguardo la struttura di correlazione delle portate, in particolare sulla correlazione delle portate con quelle del giorno precedente.

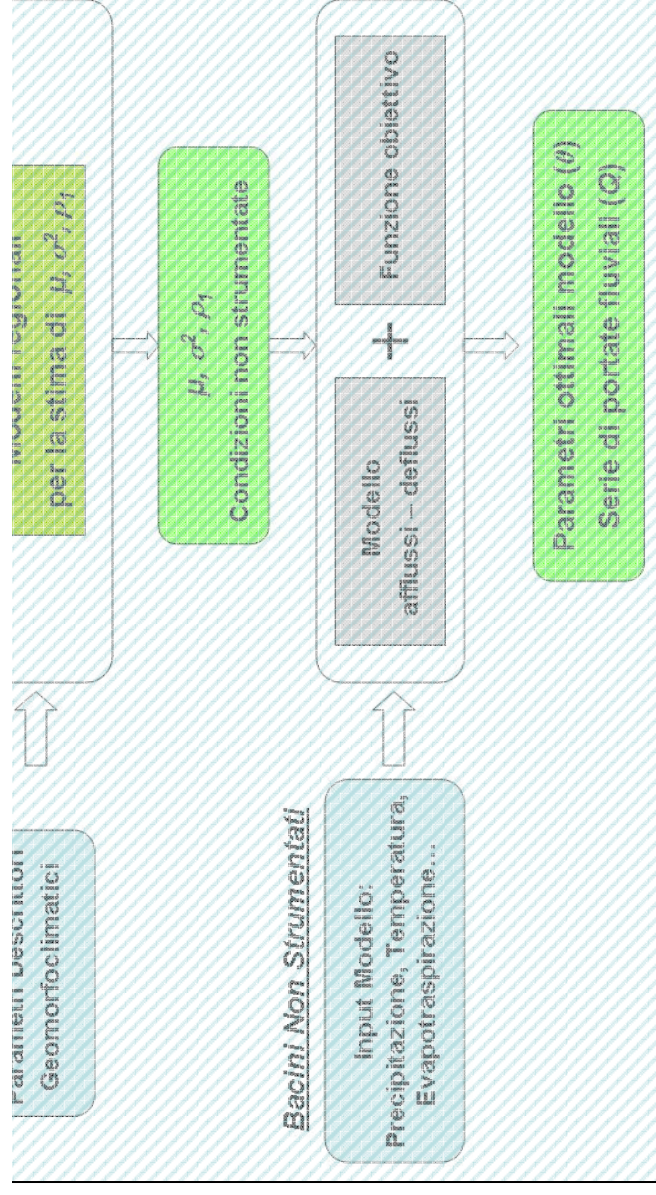
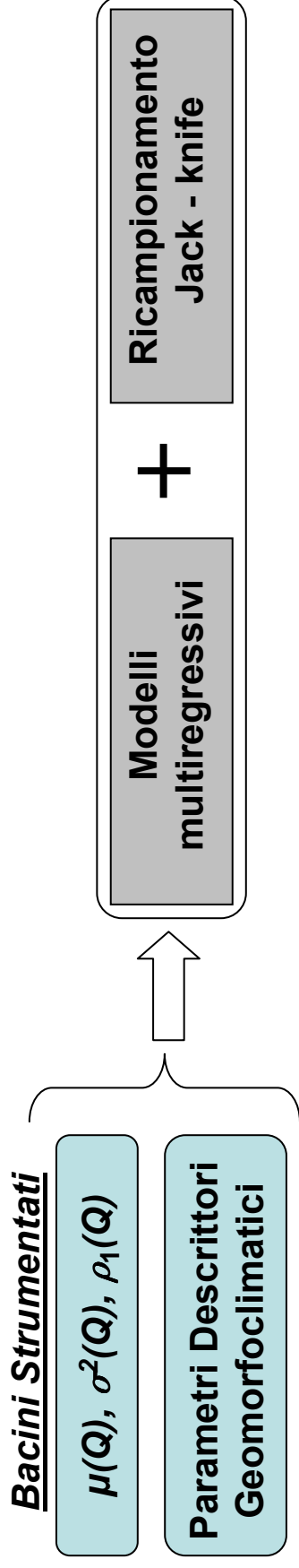
Correlazione della portata con quella del giorno precedente



# Schema della procedura



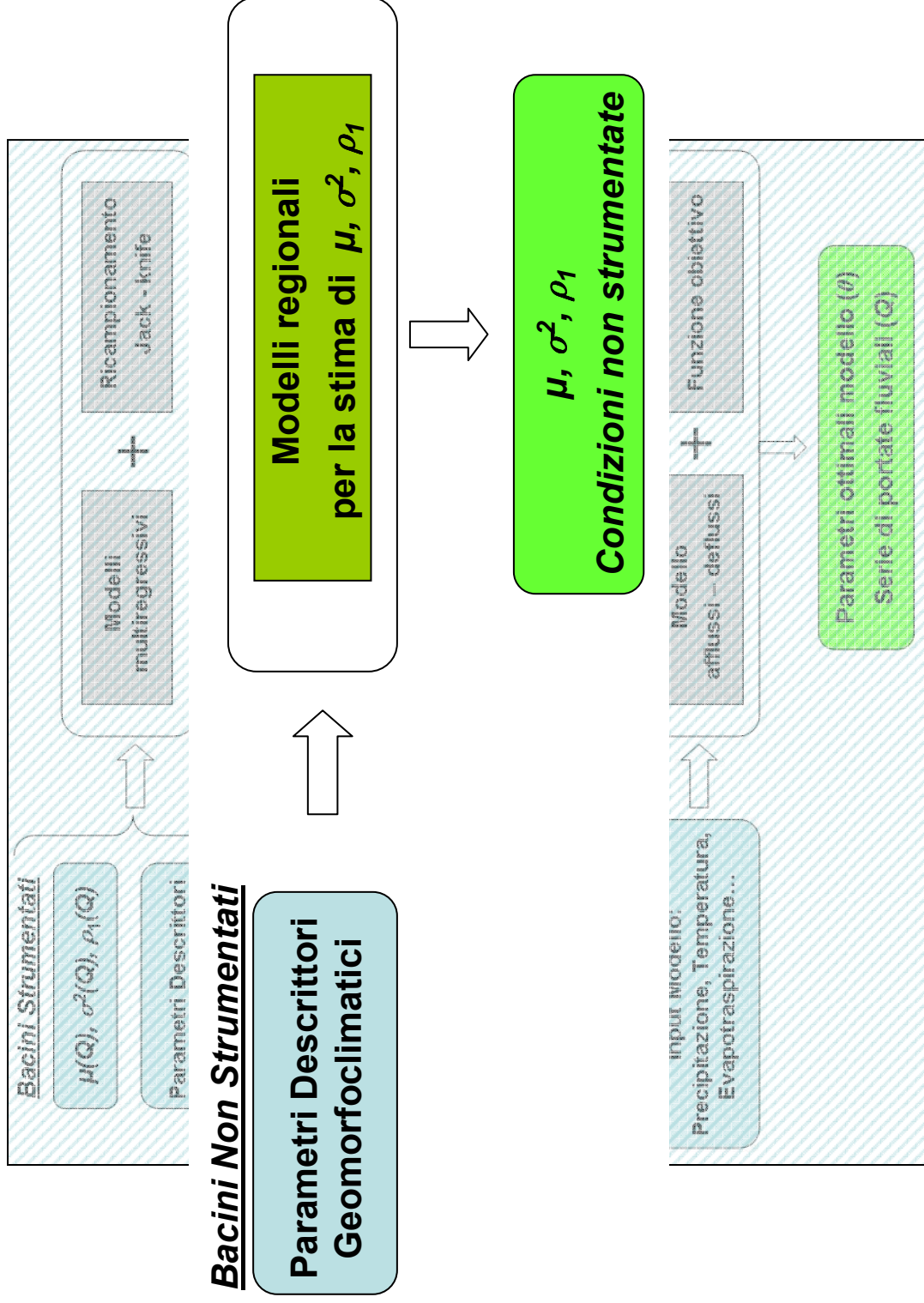
# Schema della procedura



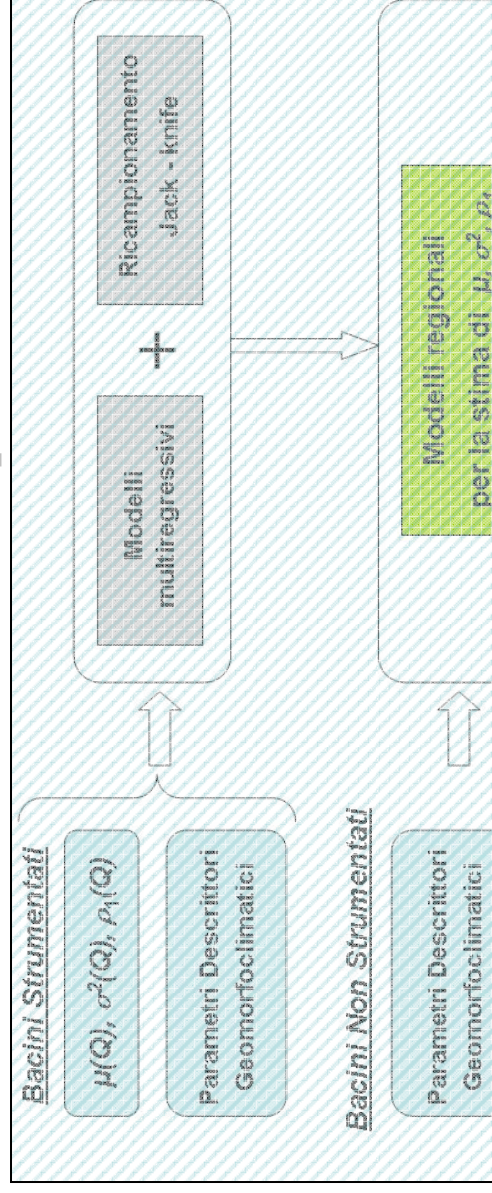
“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”  
DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)



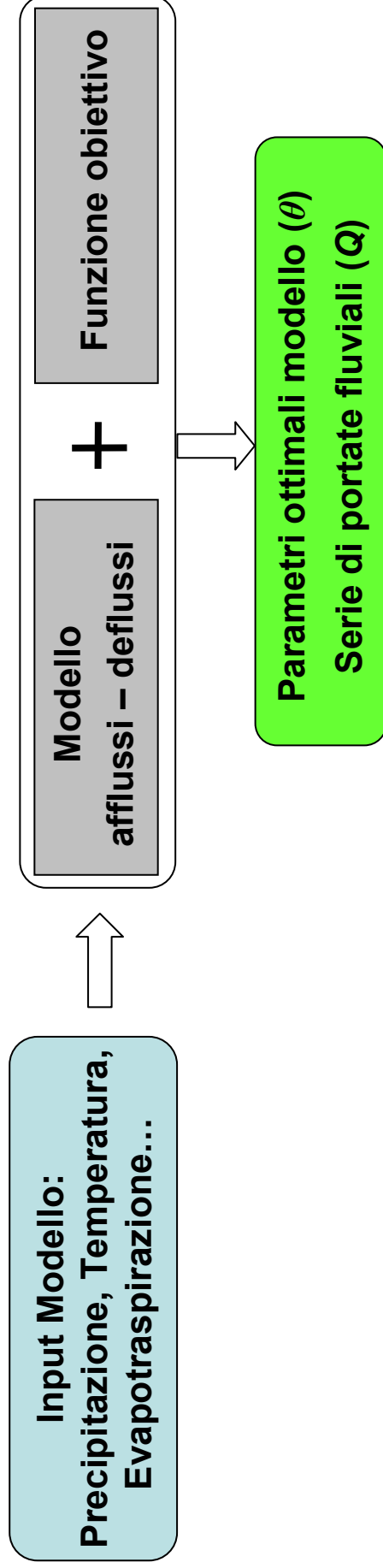
# Schema della procedura



# Schema della procedura



## Bacini Non Strumentati



# Struttura presentazione

- Procedura di calibrazione per modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati basata sulla regionalizzazione dei parametri dei modelli.
- Procedura innovativa (calibrazione spettrale) per la calibrazione di modelli afflussi- deflussi in bacini idrografici non strumentati mediante l'utilizzo delle caratteristiche statistiche delle serie dei deflussi fluviali.
- Esempio di applicazione della *calibrazione spettrale*.

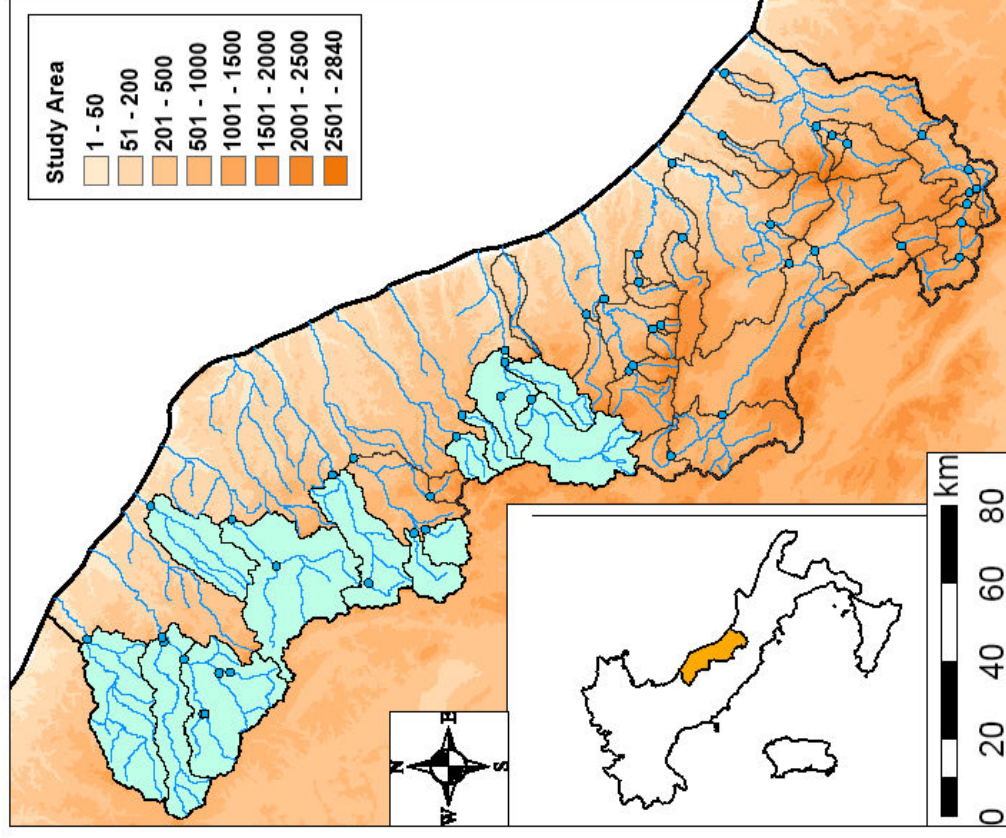


# Esempio di applicazione: Obiettivi

- Regionalizzare le caratteristiche statistiche delle serie di portata in funzione delle variabili geomorfologiche e climatiche dei bacini.
- Parametrizzare un modello afflussi - deflussi per la stima delle portate fluviali attraverso i parametri statistici delle serie di portata determinati a partire dai descrittori geomorfoclimatici dei bacini.



# Area di Studio



- 51 bacini collocati nelle regioni Marche e Abruzzo, per i quali sono disponibili almeno 5 anni di dati idrometrici;
- area complessiva: 18257 Km<sup>2</sup>;
- alvei prevalentemente torrentizi;
- regime fluviale caratterizzato da forti magre durante il periodo estivo;
- 13 bacini per i quali sono disponibili serie di portata (**Q**), precipitazione (**P**) ed evapotraspirazione (**EPT**) riferiti allo stesso intervallo temporale.



# Parametri geomorfologici e climatici

Parametro	Denominazione	Max	Medio	Min
$A$ [km <sup>2</sup> ]	<u>Area drenante</u>	3082	350	14.4
$L$ [km]	<u>Lunghezza dell'asta principale</u>	160	36	5.3
$P$ [%]	<u>Percentuale di area permeabile</u>	99	49	0.1
$H_{max}$ [m s.l.m.]	<u>Quota massima</u>	2914	2086	279
$H_{med}$ [m s.l.m.]	<u>Quota media</u>	1950	959	178
$H_{min}$ [m s.l.m.]	<u>Quota minima</u>	1103	364	3
$\Delta H$ [m]	<u>Quota media del bacino rispetto allo zero idrometrico</u>	1543	595	150
$\tau_c$ [ore]	<u>Tempo di corrivazione del bacino (Giandotti)</u>	18.9	6.4	0.9
<b>MAP</b> [mm/anno]	<u>Precipitazione media annuale</u>	1530	1099	820
<b>TAM</b> [C°]	<u>Temperatura media annuale</u>	14.7	11.7	8.3



“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”  
 DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)



# Stima delle caratteristiche statistiche mediante modelli multiregressivi

Tre differenti modelli multiregressivi sono stati testati per la stima delle caratteristiche statistiche in funzione delle variabili geomorfologiche e climatiche dei bacini idrografici:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n$$

$$y = a_0 + a_1 \log(x_1) + a_2 \log(x_2) + \dots + a_n \log(x_n)$$

$$y = a_0 x_1^{a_1} x_2^{a_2} \dots x_n^{a_n}$$

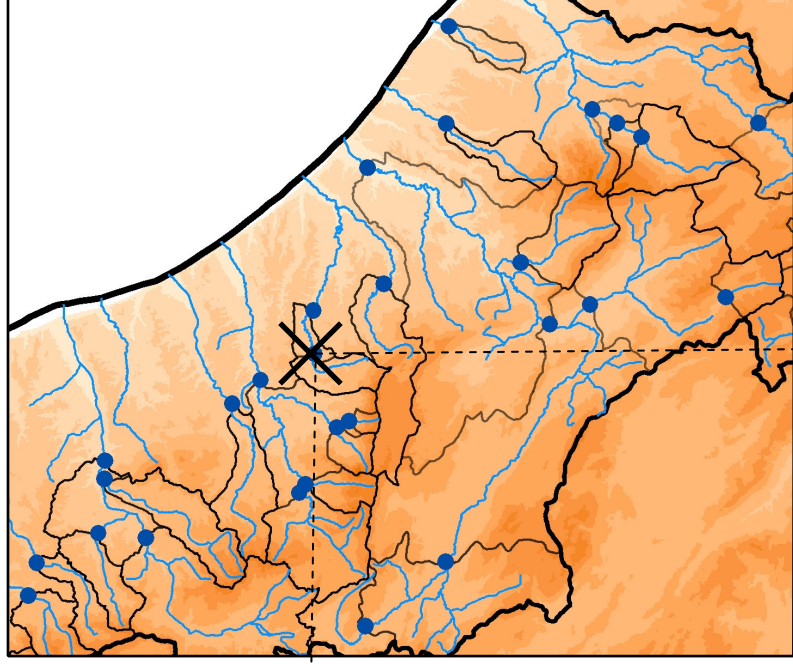
dove  $y$  indica la media di lungo periodo, la varianza, o il coefficiente di autocorrelazione a ritardo di un giorno, mentre  $x_i$  con  $i=1, \dots, n$  sono  $n$  descrittori geomorfologici e climatici,  $a_i$  i parametri delle regressioni del modello.



# Procedura di cross-validazione

L'accuratezza di stima, è stata valutata mediante l'utilizzo della procedura di ricampionamento *jack-knife* (Shao e Tu, 1995; Brath et al., 2003) e minimizzando la somma dei quadrati dei residui.

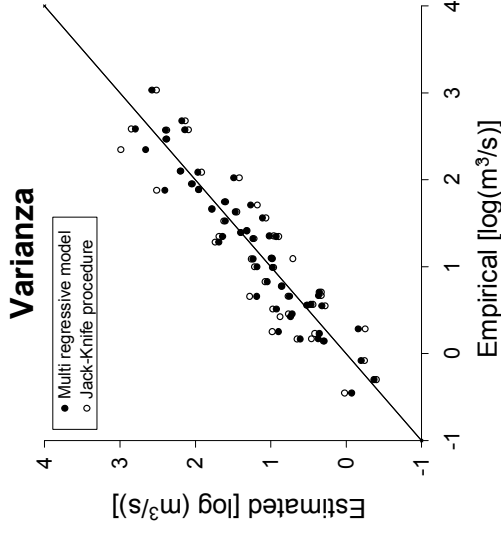
1. Si rimuove dall'insieme degli  $N$  bacini strumentati, la stazione  $i$ -esima, ipotizzando che essa sia non strumentata.
2. Si esegue la stima utilizzando gli  $N - 1$  bacini rimanenti e si ottiene una stima indiretta della variabile di interesse in corrispondenza del punto rappresentativo del bacino  $i$ -esimo nello spazio dei descrittori geomorfoclimatici.
3. I due passi precedenti sono ripetuti per tutti i bacini esaminati.



# Risultati dei modelli multiregressivi

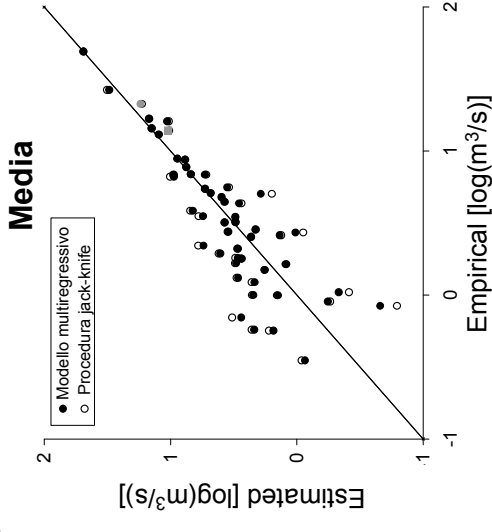
$$E_{(\text{calibrazione})} = 0.95; \quad E_{(\text{jack-knife})} = 0.94$$

$$\mu = a_0 + a_1 A + a_2 H_{\min} + a_3 L + a_4 t_c + a_5 MAP$$



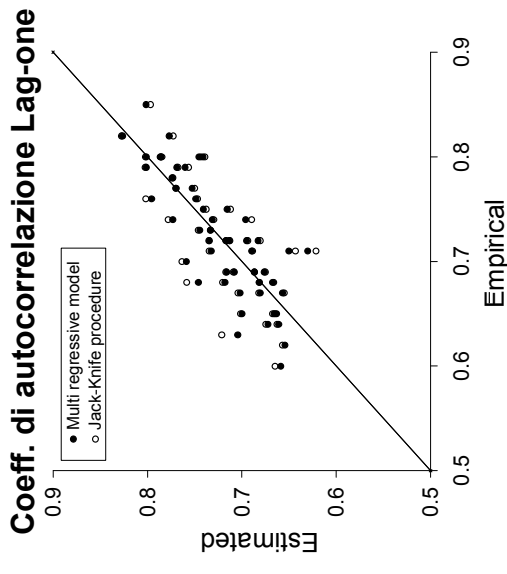
$$E_{(\text{calibrazione})} = 0.65; \quad E_{(\text{jack-knife})} = 0.51$$

$$\sigma^2 = a_0 P^{a_1} \Delta H^{a_2} L^{a_3} MAP^{a_4}$$



$$E_{(\text{calibrazione})} = 0.67; \quad E_{(\text{jack-knife})} = 0.59$$

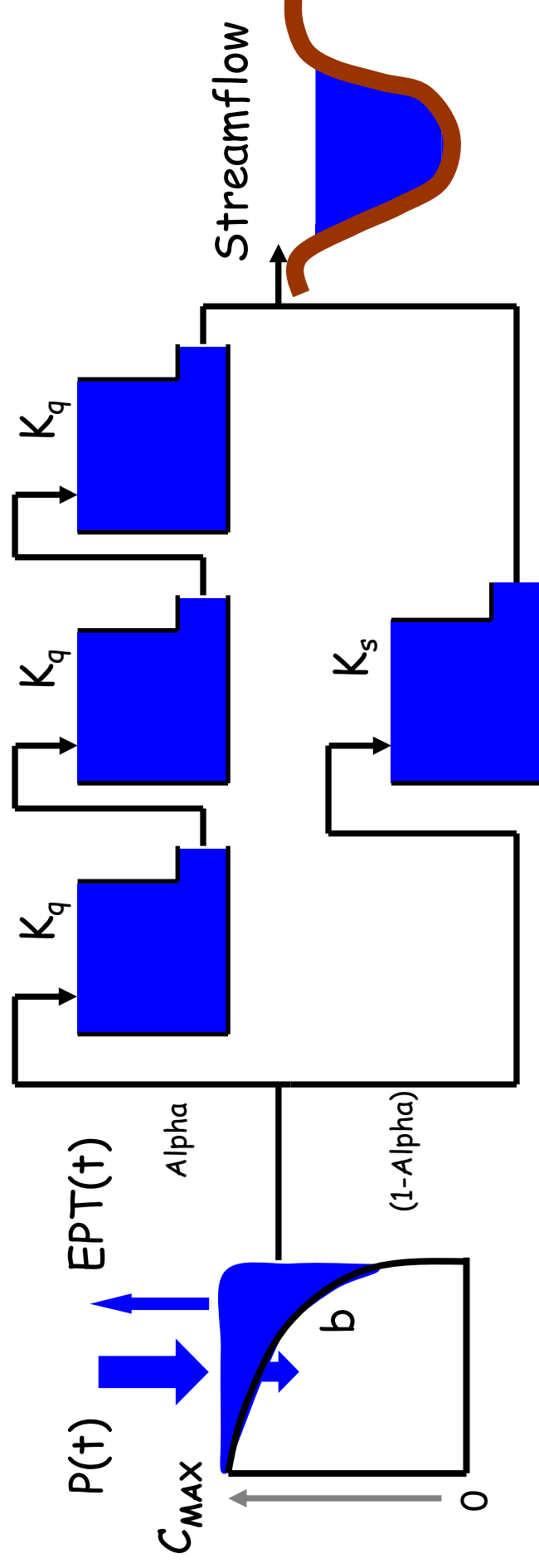
$$\rho_1 = a_0 + a_1 P + a_2 H_{\max} + a_3 \Delta H + a_4 MAP$$



“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”  
 DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)

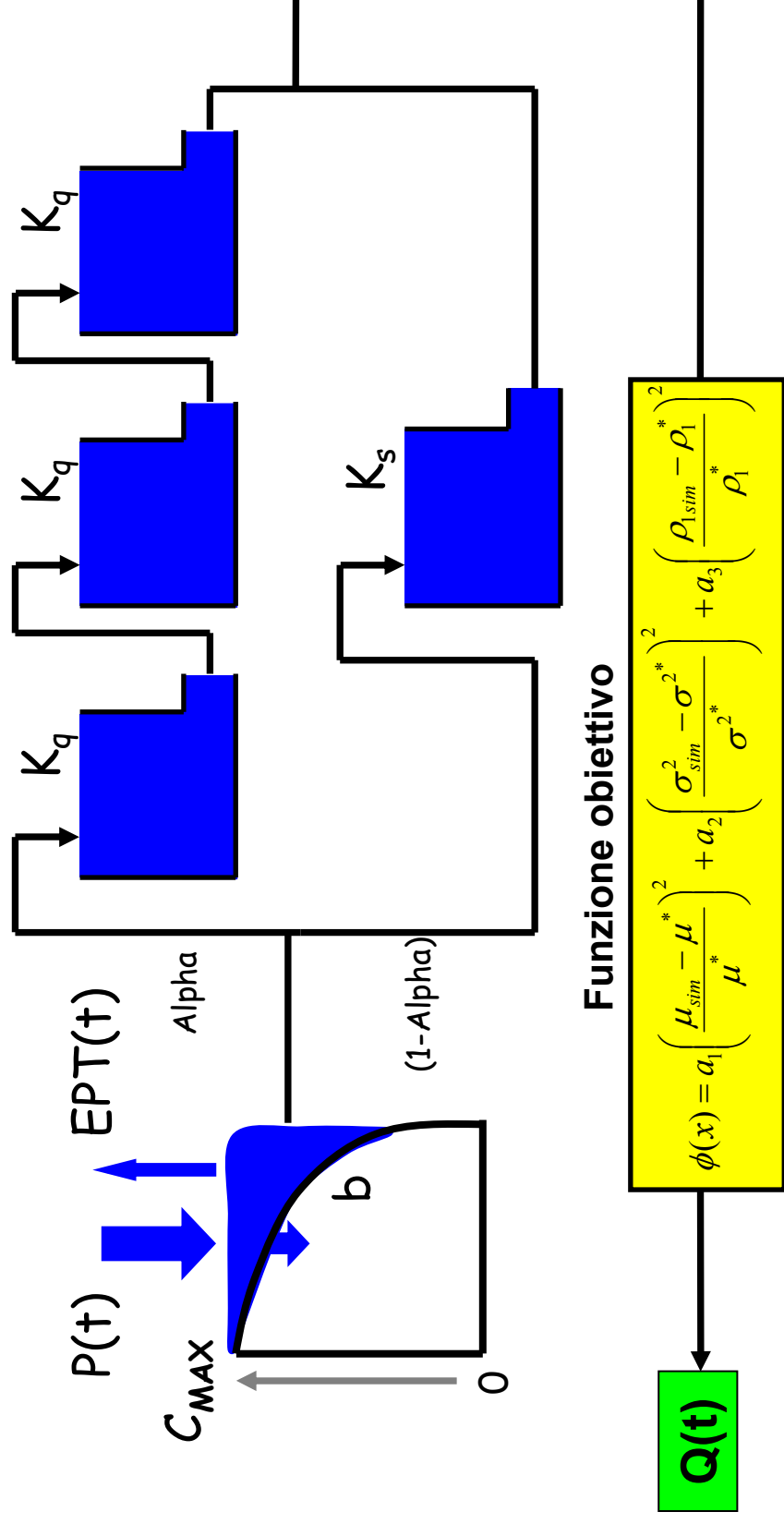


# Modello afflussi-deflussi: HYMOD



- $C_{MAX}$ : capacità massima di assorbimento del terreno [mm];
- $b$ : il grado di variabilità spaziale della capacità di umidità del suolo sul bacino [ - ];
- $\text{Alpha}$ : fattore di ripartizione del deflusso tra le due serie di serbatoi [ - ];
- $K_q$  e  $K_s$ : tempo di residenza delle due serie di serbatoi che generano rispettivamente il deflusso veloce e lento [ $\text{day}^{-1}$ ].

# Modello afflussi - deflussi - deflussi: funzione obiettivo



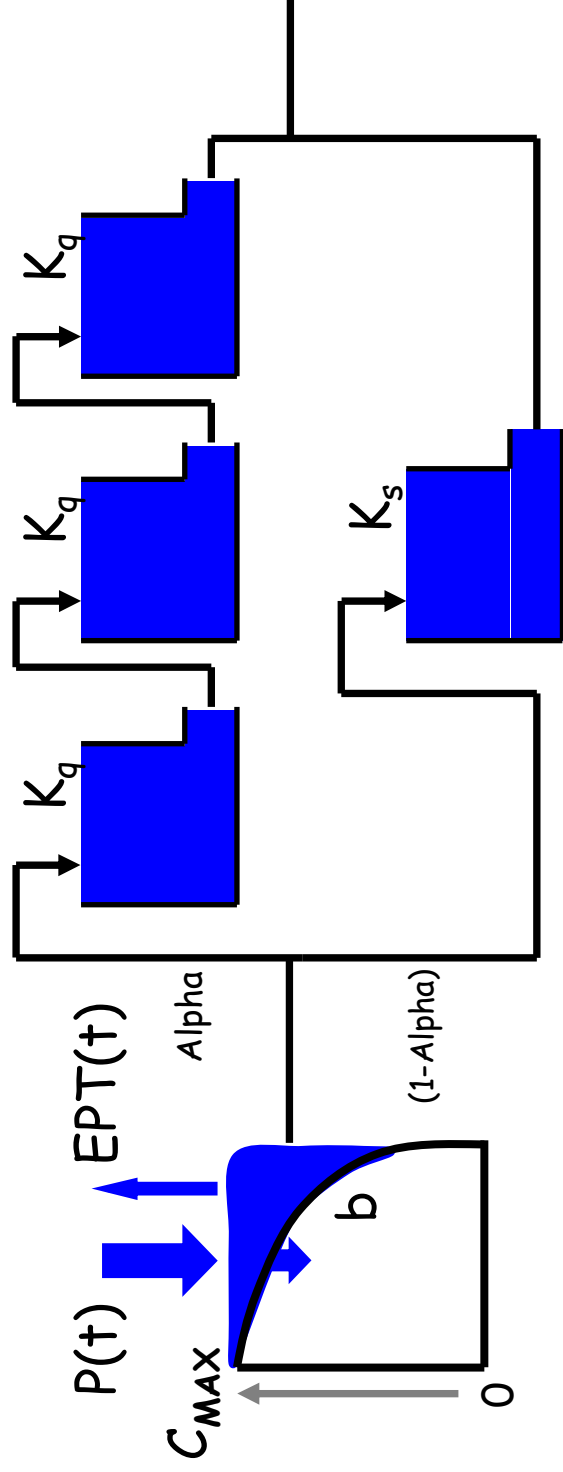
La funzione obiettivo è stata minimizzata mediante l'uso di GENOUD (GE-Netic Optimization Using Derivatives), un algoritmo genetico che combina un algoritmo evolutivo con un approccio quasi-newtoniano (Sekhon e Mebane, 1998).



“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”  
 DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)

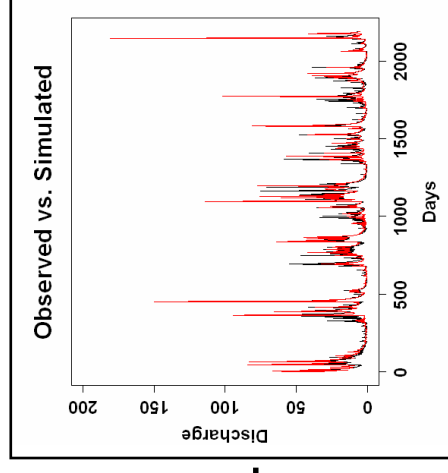


# Struttura d'indagine: Calibrazione Tradizionale



- Verificare l'applicabilità del modello afflussi – deflussi adottato.
- Fornire indicazioni circa l'influenza dovuta all'uso del modello scelto sui risultati della procedura adottata.

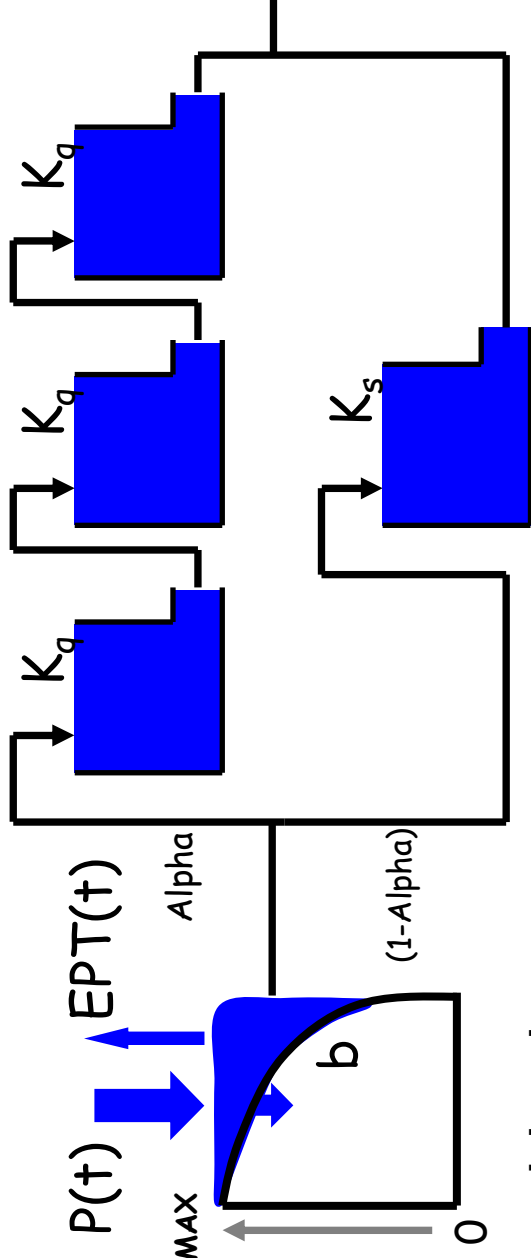
## Ottimizzazione Confronto



**Parametri modello ( $\theta$ )**

# Struttura d'indagine: Calibrazione Spettrale

- Evidenziare le approssimazioni introdotte dal confronto delle sole tre statistiche.
- Ottenere un riferimento per valutare le performance della calibrazione eseguita sfruttando le grandezze statistiche regionalizzate.
- Determinare la combinazione dei pesi  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  che generalmente si adatta meglio al caso di studio esaminato.



## Funzione Obiettivo

Parametri modello ( $\theta$ )  
Portate fluviali ( $Q$ )

$$\phi(x) = a_1 \left( \frac{\mu_{sim} - \mu^*}{\mu} \right)^2 + a_2 \left( \frac{\sigma_{sim}^2 - \sigma^{2*}}{\sigma^{2*}} \right)^2 + a_3 \left( \frac{\rho_{1sim} - \rho_1^*}{\rho_1^*} \right)^2$$

Confronto tra i valori delle statistiche derivate dalle serie di **portata osservate** con quelle simulate dal modello afflussi - deflussi

## Condizioni strumentate



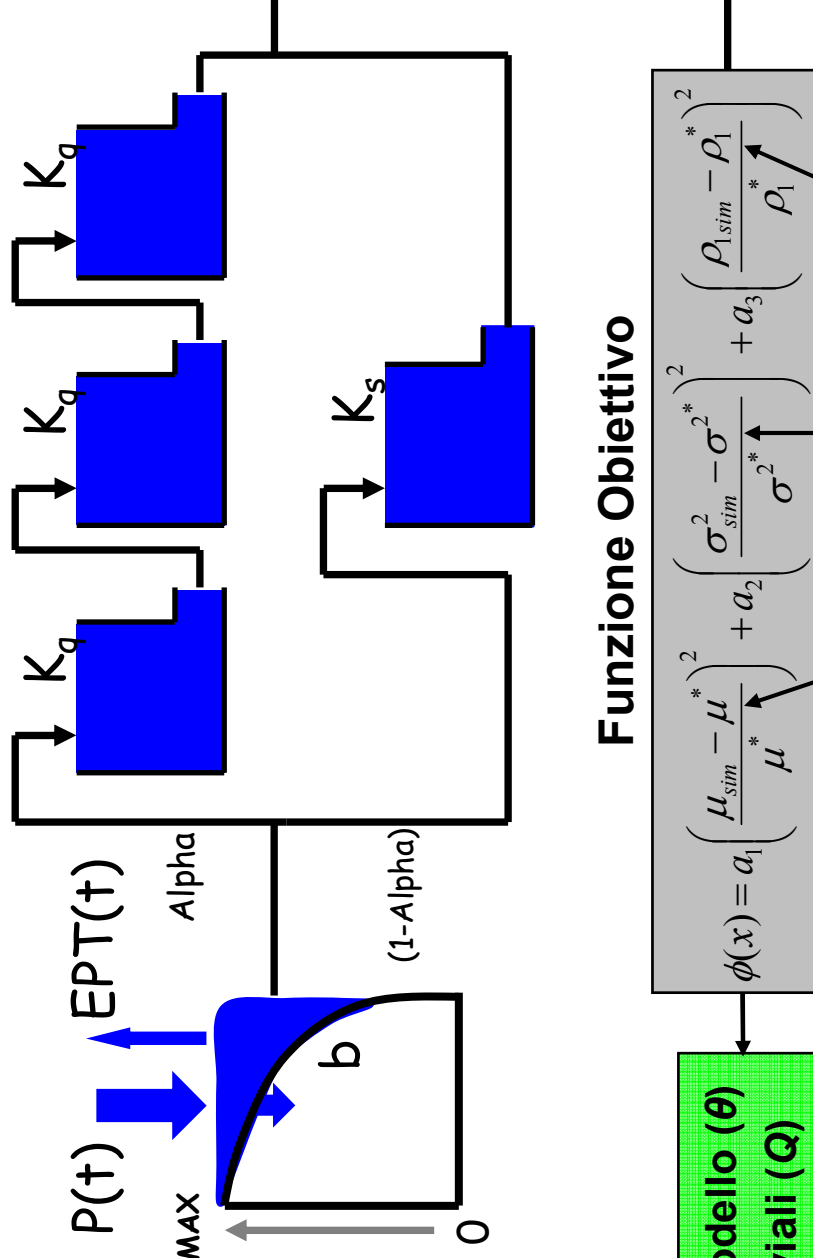
“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”  
DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)





# Struttura d'indagine: Calibrazione Spettrale

- Verificare l'efficacia della procedura di calibrazione proposta per modelli afflussi - deflussi in bacini idrografici non strumentati.



Parametri modello ( $\theta$ )  
Portate fluviali ( $Q$ )

Funzione Obiettivo

$$\phi(x) = a_1 \left( \frac{\mu_{sim} - \mu^*}{\mu^*} \right)^2 + a_2 \left( \frac{\sigma_{sim}^2 - \sigma^{2*}}{\sigma^{2*}} \right)^2 + a_3 \left( \frac{\rho_{1sim} - \rho_1^*}{\rho_1^*} \right)^2$$

Confronto tra i valori delle statistiche stimate mediante i modelli regionali con quelle simulate dal modello afflussi - deflussi

**Condizioni NON strumentate**

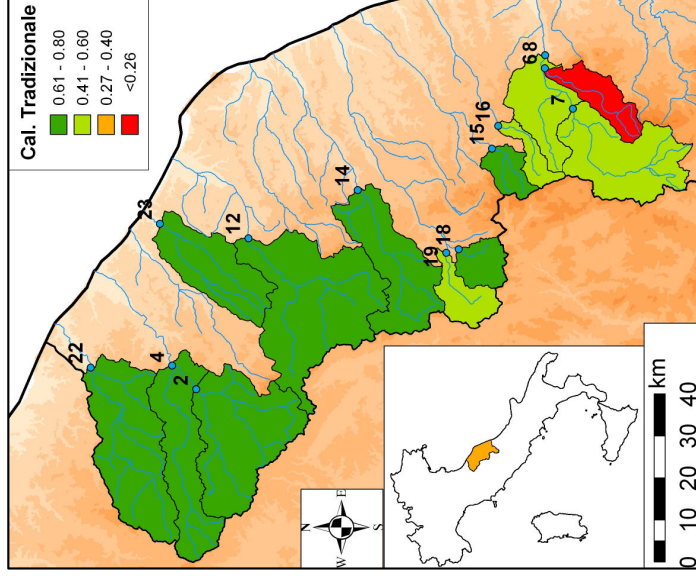


“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”  
DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)



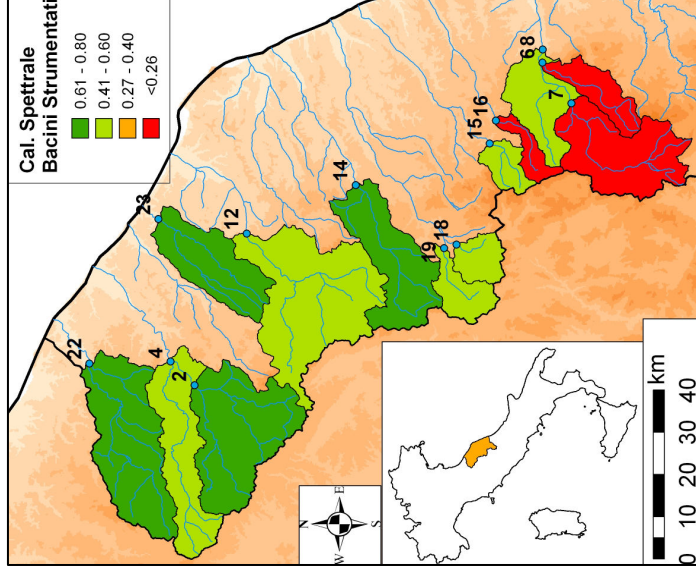
# Risultati

## Calibrazione tradizionale



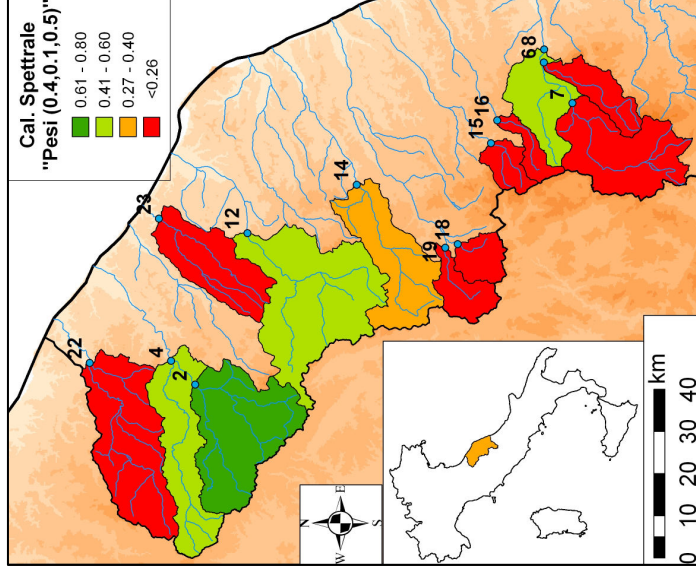
Semplificazione delle dinamiche idrologiche introdotte dall'uso del modello afflussi e deflussi

## Calibrazione spettrale Bacini Strumentati



Semplificazioni per l'uso delle sole grandezze statistiche per la calibrazione del modello afflussi - deflussi

## Calibrazione spettrale in bacini non strumentati



Influenza dell'incertezza di stima delle grandezze statistiche in bacini non strumentati (modelli multiregressivi)

# Conclusioni

- Attraverso modelli multiregressivi è stato possibile regionalizzare in modo efficiente i principali parametri statistici delle serie di portate fluviali ( $\mu$ ,  $\sigma^2$ ,  $\rho_1$ ), in funzione dei parametri geomorfologici e climatici del bacino.
- L'analisi dei risultati evidenzia che le prestazioni della calibrazione spettrale in bacini non strumentati sono fortemente influenzate dall'errore di stima delle statistiche ottenute mediante i modelli regionali.
- I risultati della calibrazione spettrale del modello mettono in luce le potenzialità della procedura proposta, i cui sviluppi possono rappresentare un'interessante alternativa per la calibrazione di modelli afflussi – deflussi in bacini non strumentati (*Castiglioni et al., Advances in Water Resources, 2010, in press*).





***Grazie per l'attenzione!***



*“Calibrazione di modelli afflussi-deflussi in bacini idrografici non strumentati”*  
DICAM, Bologna, 10 Novembre 2010 (simone.castiglioni@mail.ing.unibo.it)

