Estudio del efecto de escala espacial en un modelo hidrológico distribuido

Miguel Ignacio Barrios Peña

Tesis Doctoral

Director: Dr. Félix Francés García

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Universitat Politècnica de València, 2011


Introducción

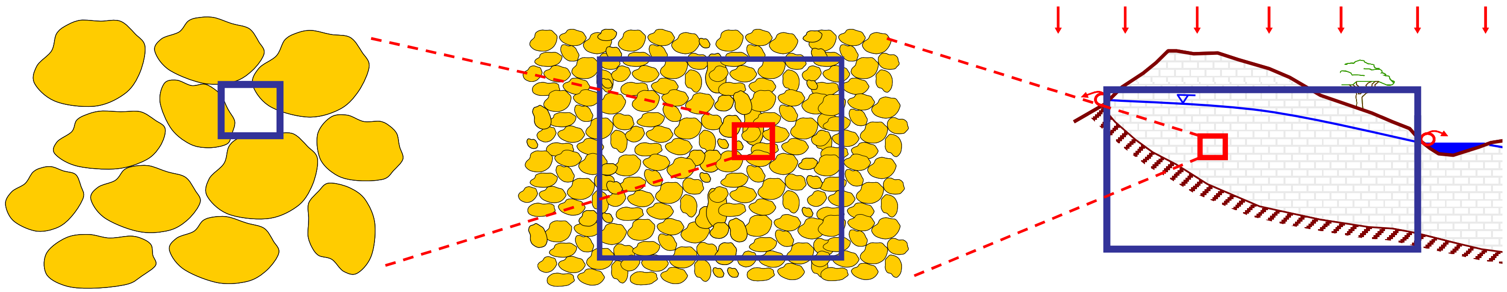
Limitaciones para la representación de procesos a diferentes escalas:

- Heterogeneidad de características ambientales (parámetros)
- Variabilidad espacio-temporal de input
- No-linealidad en procesos hidrológicos
- Propiedades emergentes

Introducción

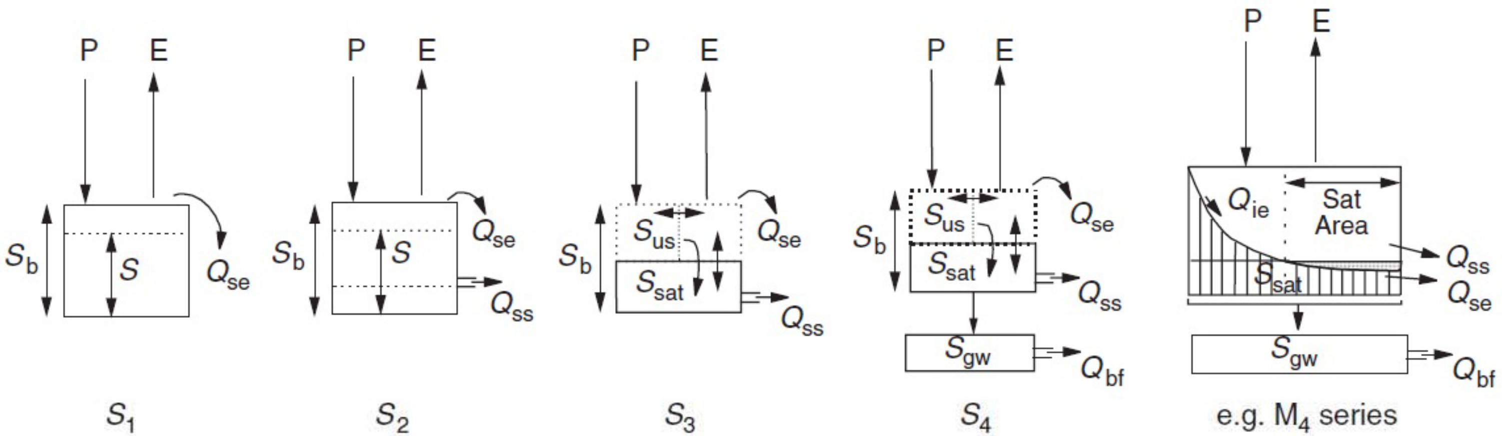
- “Upwards”

(Klemes, 1983;Dooge, 1986)



- “Downwards”

(Francés, 2011)



(Sivapalan, 2005)

Introducción

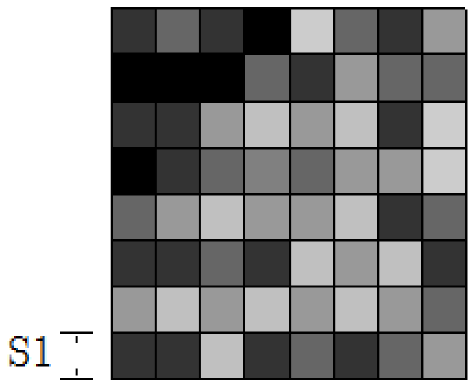
¿Por qué estudiar *Efectos de escala* y *Escalado?*

- Necesidad de vincular «microestados» y «macroestados»
- Reconciliar "upwards" y "downwards"
- Mejorar el conocimiento de las macro no-linealidades

Introducción: escalas espaciales de estudio

Microescala:

Soporte mínimo en el cual son válidas las ecuaciones



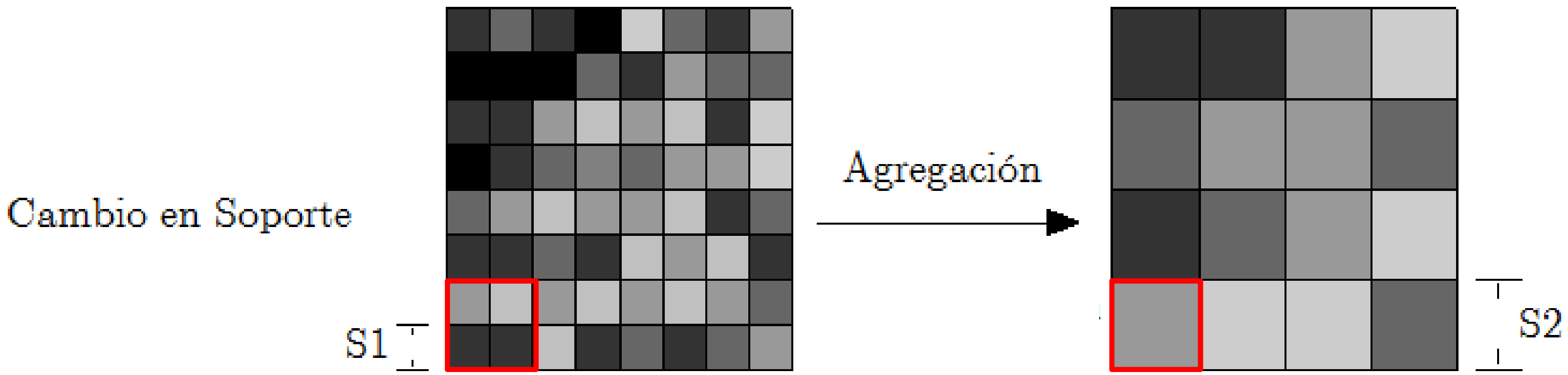
Introducción: escalas espaciales de estudio

Microescala:

Soporte mínimo en el cual son válidas las ecuaciones

Mesoescala:

Escala mayor en la cual se utilizan parámetros efectivos



Introducción

Efecto de escala agregando procesos no lineales:

$$Y(S_2) = \langle g[\theta(S_1), X(S_1)] \rangle \neq g[\langle \theta(S_1) \rangle, \langle X(S_1) \rangle]$$

Parámetro efectivo: valor que busca reproducir el proceso agregado en la mesoescala (Wigmosta y Prasad, 2005)

- No es el valor medio en la microescala
- Puede perder sentido físico en la mesoescala
- No son estacionarios


Problema de investigación

Indagar las propiedades y utilidad de la aplicación de parámetros efectivos no estacionarios en el escalado de parámetros hidrológicos


Objetivos generales

- Analizar el efecto de la heterogeneidad de los parámetros del suelo en la microescala sobre los parámetros efectivos en la mesoescala, utilizando el mismo modelo hidrológico en ambas escalas

- Proponer ecuaciones de escalado que relacionen los parámetros en la microescala con los parámetros en la mesoescala, para mejorar los resultados de modelización y evaluar su funcionamiento en una cuenca de estudio

Metodología general

1.- Efecto de escala espacial:

- Campos de parámetros
- Formulación inversa que incluye la agregación del flujo en la microescala
- Cálculo de parámetros efectivos no estacionarios en la mesoescala y
- Estudio de sus propiedades

(Barrios y Francés, 2011)


Metodología general

2.- Ecuaciones de escalado (de la microescala a la mesoescala):

- Funciones de distribución derivadas
- Ecuaciones empíricas no lineales

3.- Aplicación de las ecuaciones de escalado

- Implementación en la cuenca experimental de Goodwin Creek
- Experimento sintético
- Evaluación de resultados

(Barrios y Francés)

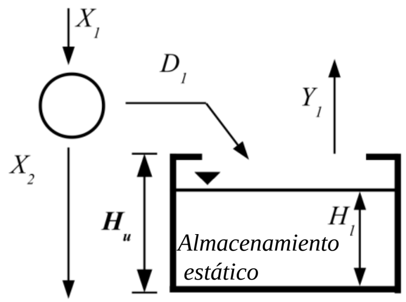
(1/3) Efecto de escala espacial

Efecto de escala espacial: procesos

Procesos no-lineales

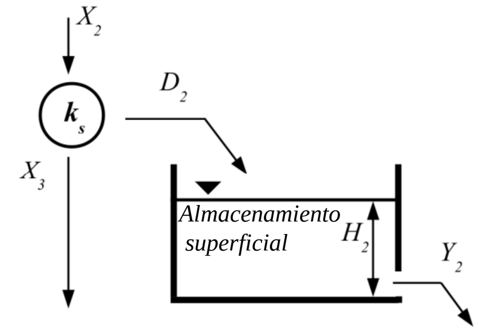
Almacenamiento estático:

- Excedente $$X_{2,t} = Max\left[0; X_{1,t} - H_u + H_{1,t}\right]$$
- Infiltración capilar $$D_{1,t} = X_{1,t} - X_{2,t}$$
- ET $$Y_{1,t} = Min\left[ETP \cdot \lambda; H_{1,t}\right]$$



Almacenamiento superficial:

- Infiltración gravitacional $$X_{3,t} = Min\left[X_{2,t}; \Delta t \cdot k_s\right]$$



(Francés et. al., 2002)


Efecto de escala espacial: campos aleatorios

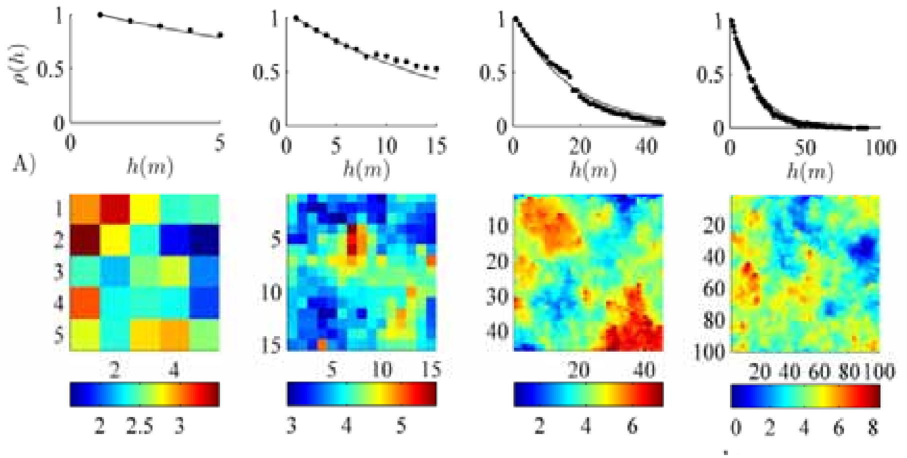
Generación de campos aleatorios de parámetros H_u y k_s:

- PDF de H_u [Beta(a,b)]: $$f = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} H_u^{a-1}(1-H_u)^{b-1}$$
- PDF de k_s [LN(μ,σ)]: $$f = \frac{1}{k_s \sigma \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln k_s - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]}$$
- Autocorrelación espacial básica tipo exponencial: $$\rho(h) = e^{\left(-\frac{3h}{a}\right)}$$

Algoritmo de muestreo (Pinder y Celia, 2006):

- Muestreo por Hipercubo Latino
- Factorización de Cholesky

Efecto de escala espacial: campos aleatorios



Escalas espaciales

Microescala S1	Mesoescala S2		# de realizaciones
	Tamaño	Notación	
[m^2]	[m^2]		
1 x 1	5 x 5	S2a	500
1 x 1	15 x 15	S2b	500
1 x 1	45 x 45	S2c	2500
1 x 1	100 x 100	S2d	5000

Estadísticos de los campos

$\mu\ (H_u)$	$\mu\ (k_s)$	CV=σ/μ
70 100	20 60	0.5 1 1.5 2

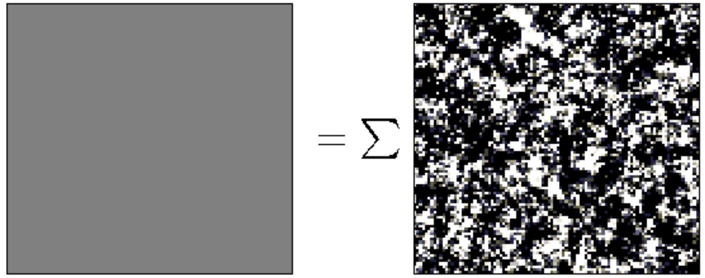
18 Longitudes de correlación:
a = 2.5, 5, 10,… 50, 75, 100, 150, 250, 500, 2500 y 5000 m

Efecto de escala espacial: parámetros en la mesoescala

❖ Agregación:

Excedente $$X_2[S2]=\sum_{i=1}^{n} X_{2i}$$

Infiltración gravitacional $$X_3[S2]=\sum_{i=1}^{n} X_{3i}$$



Agregación del flujo

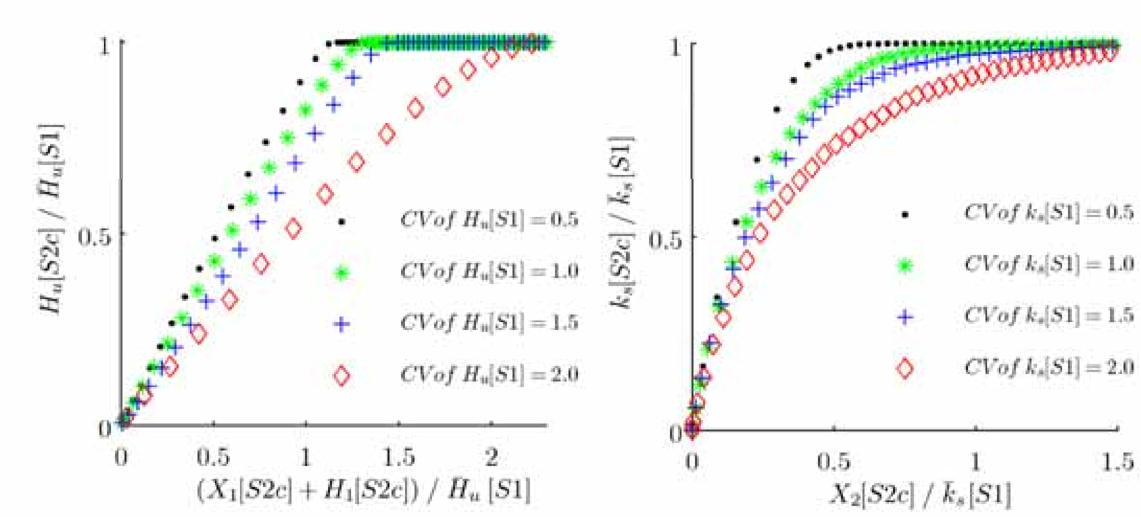
❖ Parámetros efectivos en la mesoescala (solución inversa):

$$H_u[S2]_t = X_1[S2]_t + H_1[S2]_t - X_2[S2]_t$$

$$k_s[S2]_t = \left\{ \begin{array}{ll} X_2[S2]_t \cdot (\Delta t)^{-1} & X_3[S2]_t = X_2[S2]_t \\ X_3[S2]_t \cdot (\Delta t)^{-1} & X_3[S2]_t > X_2[S2]_t \end{array} \right\}$$

Efecto de escala espacial: parámetros en la mesoescala

- ***H_u*** y ***k_s*** tienen una fuerte dependencia de las variables de estado e input, y son sensibles a la heterogeneidad en la microescala:



  - Valores sensibles al CV
  - Baja influencia de la estructura de dependencia espacial (magnitud) en contraste con CV


Efecto de escala espacial: parámetros en la mesoescala

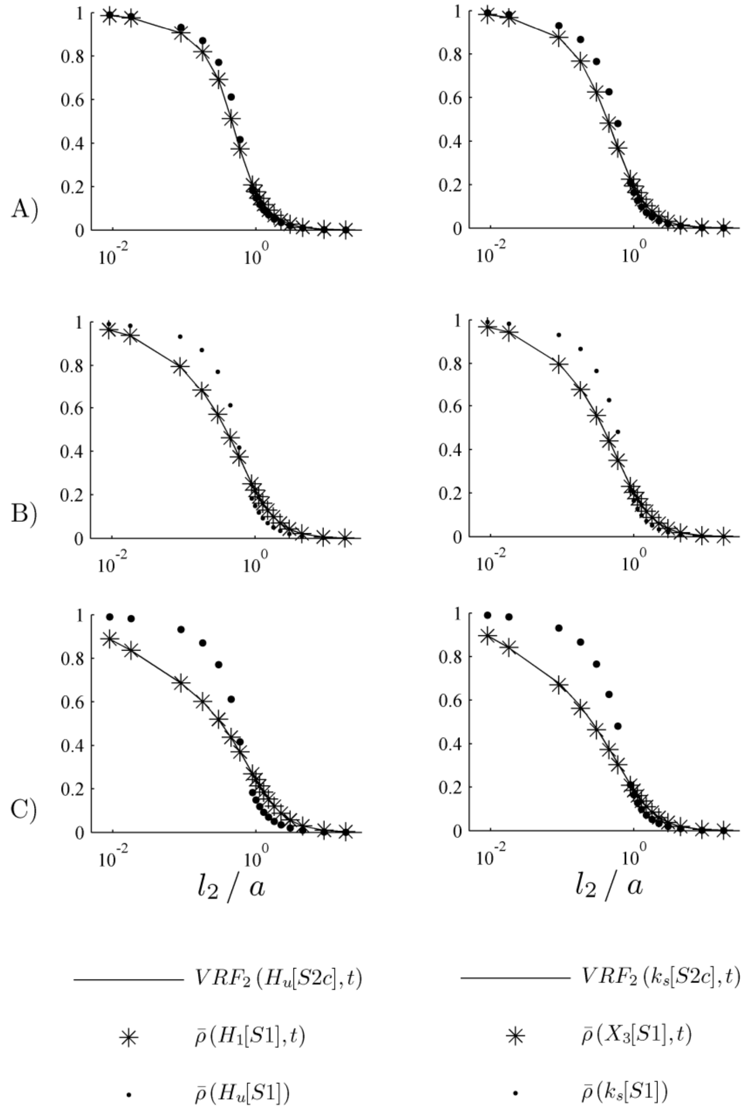
❖ Factor de reducción de varianza (VRF)

$$VRF_1(H_u) = \frac{Var\left(H_u[S2]\right)}{\sigma^2\left(H_u[S1]\right)} = \bar{\rho}\left(H_u[S1]\right)$$

$$VRF_1(k_s) = \frac{Var\left(k_s[S2]\right)}{\sigma^2\left(k_s[S1]\right)} = \bar{\rho}\left(k_s[S1]\right)$$

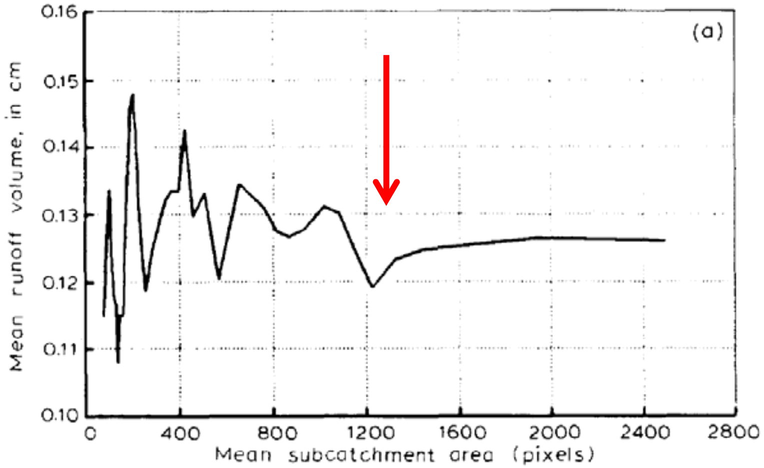
$$VRF_2(H_u, t) = \frac{Var(H_u[S2], t)}{\sigma^2(H_1[S1], t)} = \bar{\rho}\left(H_1[S1], t\right)$$

$$VRF_2(k_s, t) = \frac{Var(k_s[S2], t)\Delta t^2}{\sigma^2(X_3[S1], t)} = \bar{\rho}\left(X_3[S1], t\right)$$



Efecto de escala espacial: tamaño de celda - REA

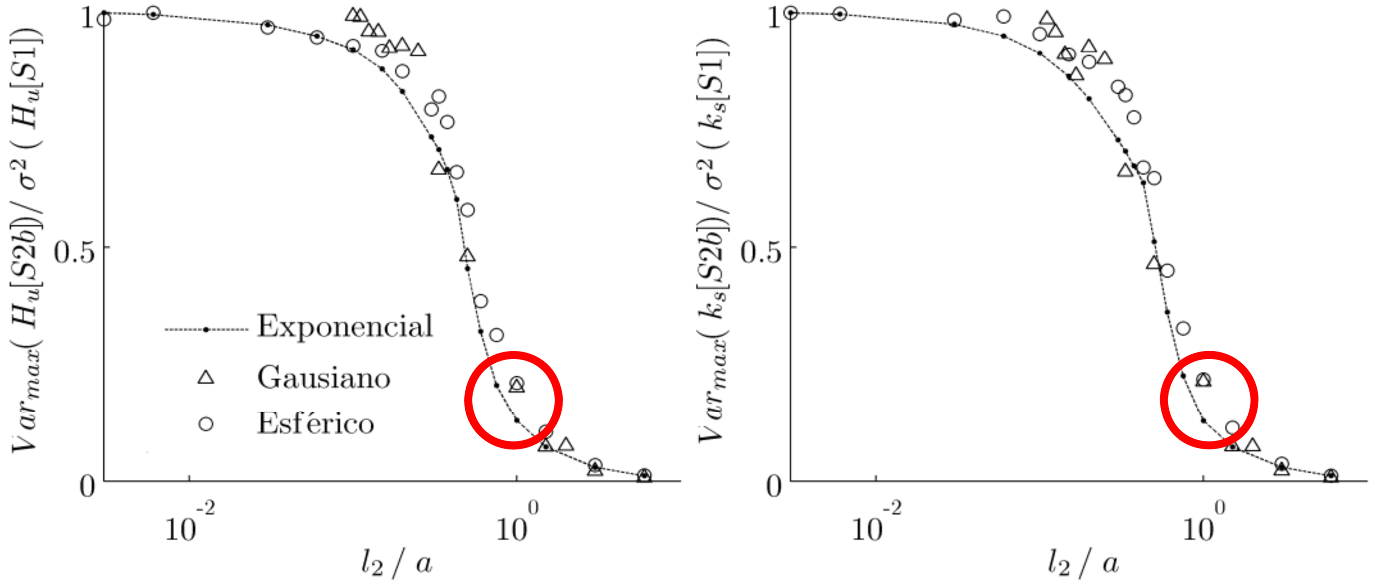
REA: la escala más pequeña en la cual se minimiza el efecto del patrón de variabilidad espacial, área umbral en la que se puede identificar una respuesta media similar en diferentes localizaciones



(Wood, *et al.*, 1988)

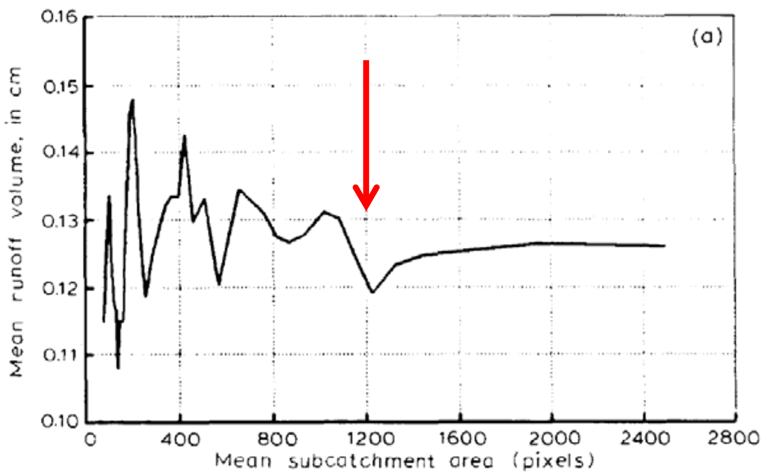
Efecto de escala espacial: tamaño de celda - REA

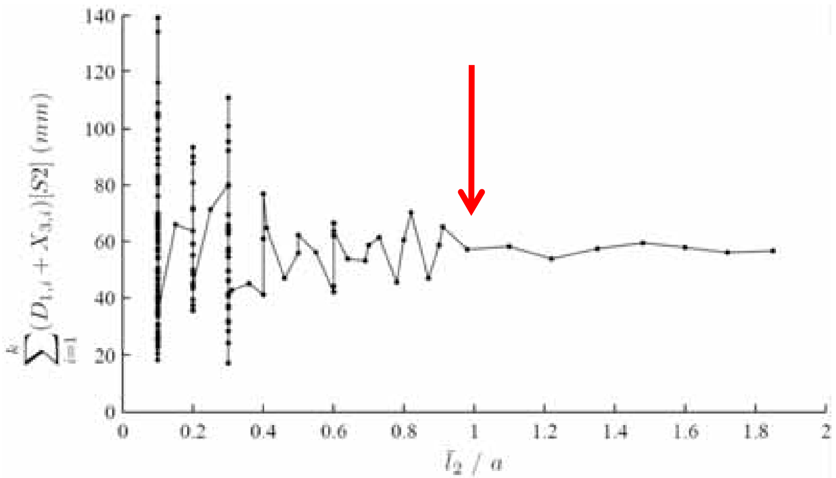
Cuando $l_2 > a$, comienza a ser menos importante la representación del patrón de variabilidad espacial



Efecto de escala espacial: tamaño de celda - REA

REA está relacionada con l_2/a y remueve el efecto del patrón espacial. La disminución de VRF en REA puede influir en la selección de un tamaño de celda óptimo





(Wood, *et al.*, 1988)


Efecto de escala espacial: selección de tamaño de celda

Tamaño de celda óptimo

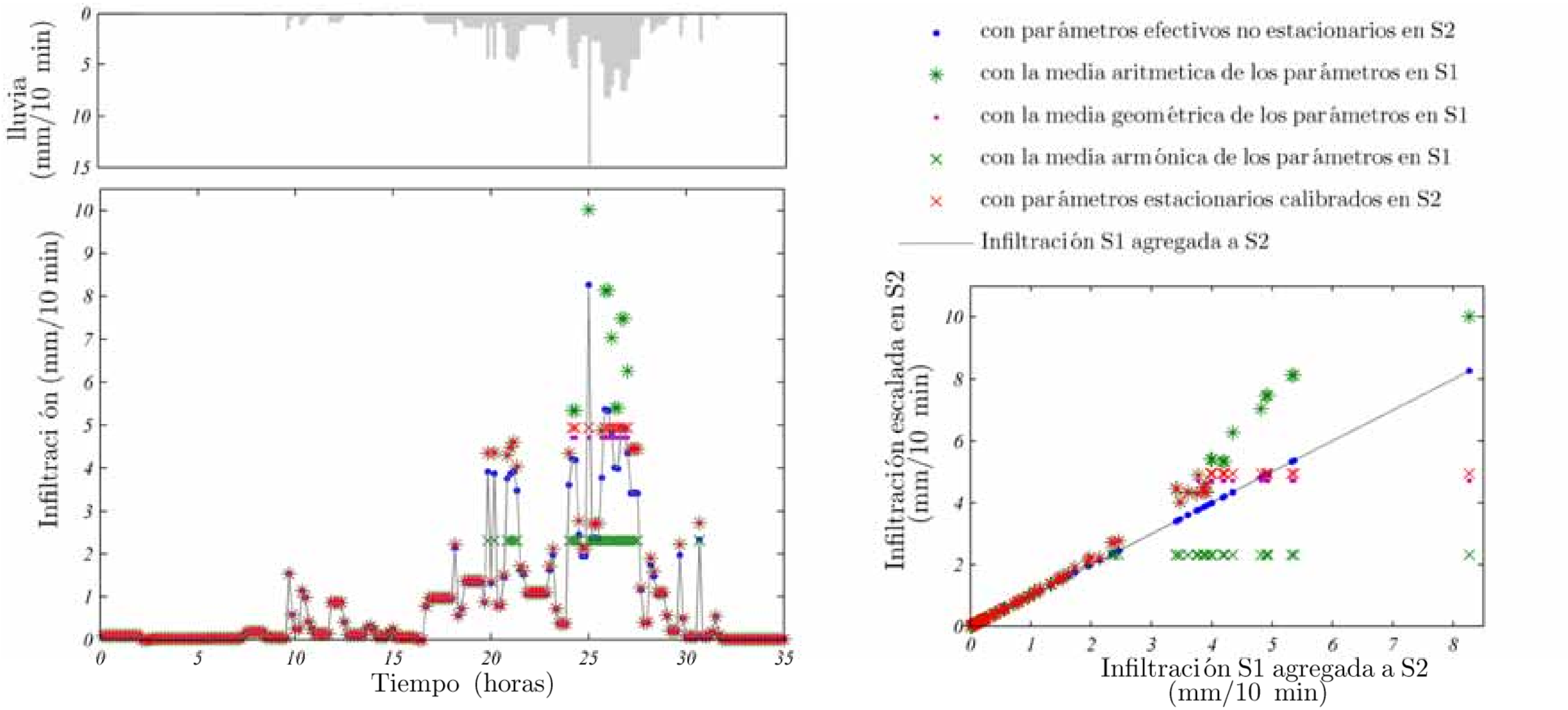
Depende de criterios adicionales muy importantes:

- *Resolución de datos de entrada disponibles*
- *Objetivos de la modelación en un caso concreto*
- *Discretización requerida para las variables de salida*
- *Escala de validez de los modelos utilizados para representar los procesos hidrológicos relevantes*

(2/3) Ecuaciones de escalado

Ecuaciones de escalado

Parametrización de heterogeneidades: de la microescala a la mesoescala



Ecuaciones de escalado: procesos no lineales

Almacenamiento estático:

- Excedente $$X_{2,t} = Max\left[0; X_{1,t} - H_u + H_{1,t}\right]$$
- Infiltración capilar $$D_{1,t} = X_{1,t} - X_{2,t}$$
- ET $$Y_{1,t} = Min\left[ETP \cdot \lambda; H_{1,t}\right]$$

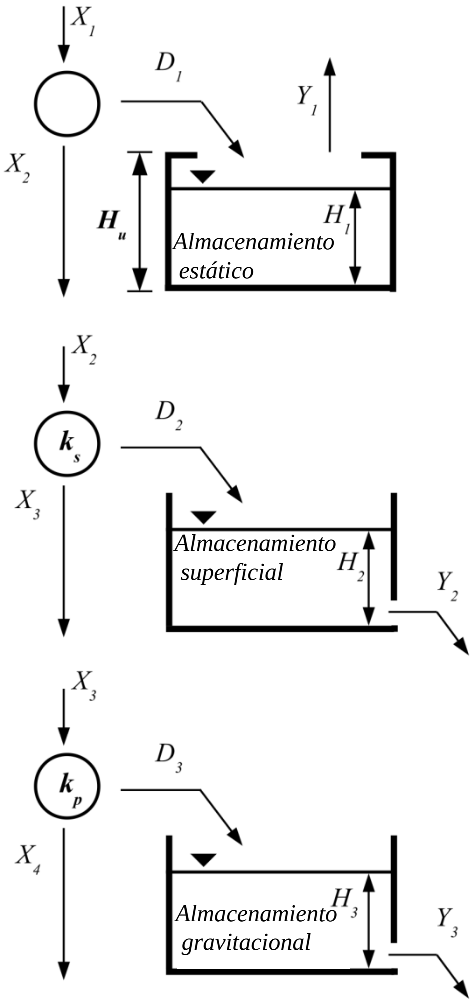
Almacenamiento superficial:

- Infiltración gravitacional $$X_{3,t} = Min\left[X_{2,t}; \Delta t \cdot k_s\right]$$

Almacenamiento gravitacional:

- Percolación $$X_{4,t} = Min\left[X_{3,t}; \Delta t \cdot k_p\right]$$

(Francés et. al., 2002)




Funciones de distribución derivadas

Método de dos pasos («*two-step approach*»):

$$Y = g(X)$$

1) Calcular la CDF de Y:

$$F_Y(y) = \mathrm{P}\big(g(X) \le y\big)$$

2) Diferenciar para obtener la PDF:

$$f_Y(y) = \frac{dF_Y(y)}{dy}$$

Funciones de distribución derivadas

¡Caso de $a = 0$!

Capacidad de almacenamiento estático:

$$H_u\,[S2]_t = \int_0^{n_t/(1-w)} \frac{H_u}{\Lambda}\cdot\frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\cdot\Gamma(b)}\cdot\left(\frac{H_u}{\Lambda}\right)^{a-1}\left(1-\frac{H_u}{\Lambda}\right)^{b-1} dH_u + \int_{n_t/(1-w)}^{\Lambda w+n_t} \frac{H_{1,t-1}+X_{1,t}}{\Lambda\cdot w}\cdot\frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\cdot\Gamma(b)}\cdot\left(\frac{H_{1,t-1}}{\Lambda\cdot w}\right)^{a-1}\left(1-\frac{H_{1,t-1}}{\Lambda\cdot w}\right)^{b-1} dH_{1,t-1}$$

Conductividad hidráulica saturada del suelo:

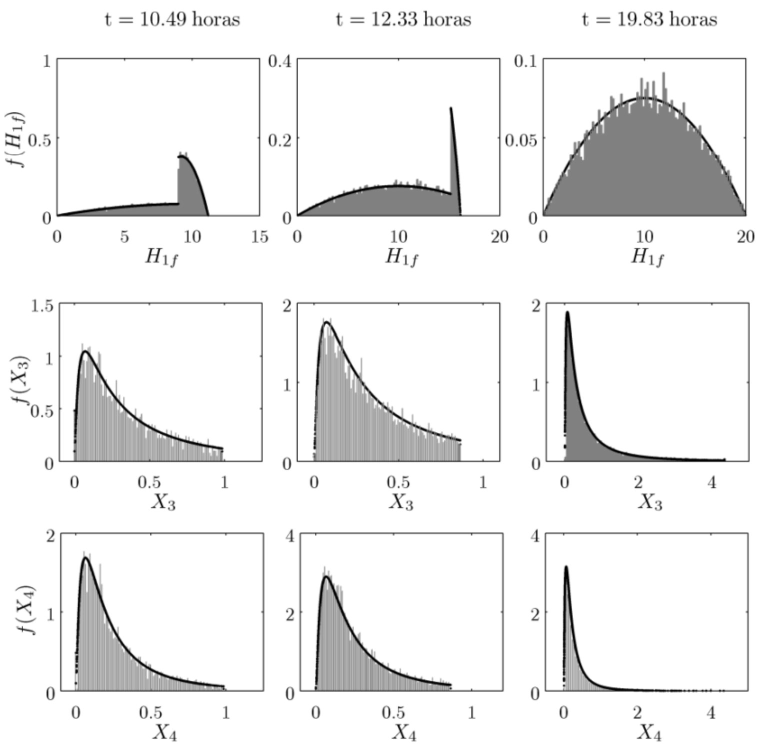
$$k_s\,[S2]_t = \frac{\int_0^{X_{3\max}} F'_{k_s}(X_3/\Delta t)+F'_{X_2}(X_3)-F'_{k_s}(X_3/\Delta t)\cdot F_{X_2}(X_3)-F_{k_s}(X_3/\Delta t)\cdot F'_{X_2}(X_3)}{\Delta t}$$

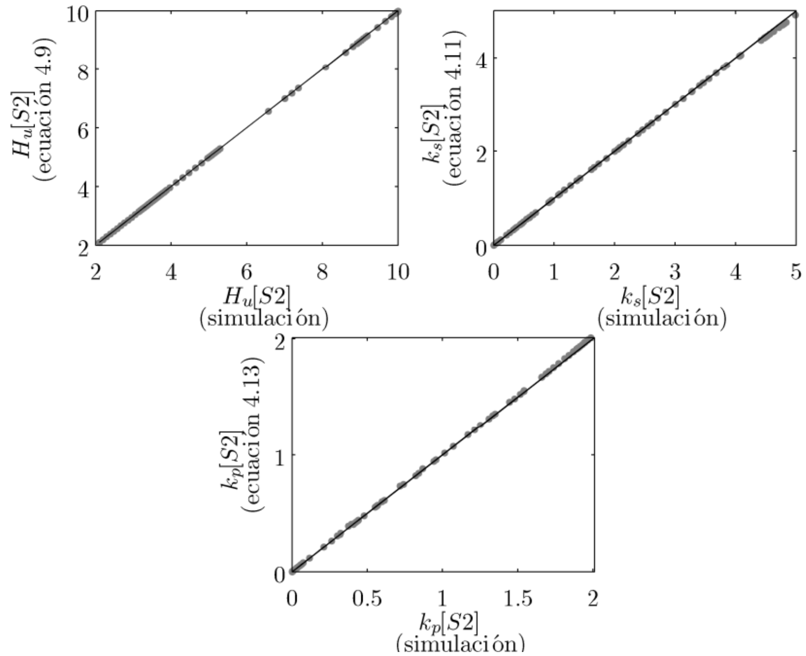
Conductividad hidráulica saturada del sustrato:

$$k_p\,[S2]_t = \frac{\int_0^{X_{4\max}} F'_{k_p}(X_4/\Delta t)+F'_{X_3}(X_4)-F'_{k_p}(X_4/\Delta t)\cdot F_{X_3}(X_4)-F_{k_p}(X_4/\Delta t)\cdot F'_{X_3}(X_4)}{\Delta t}$$

Funciones de distribución derivadas

Comprobación vía simulaciones de Monte Carlo:





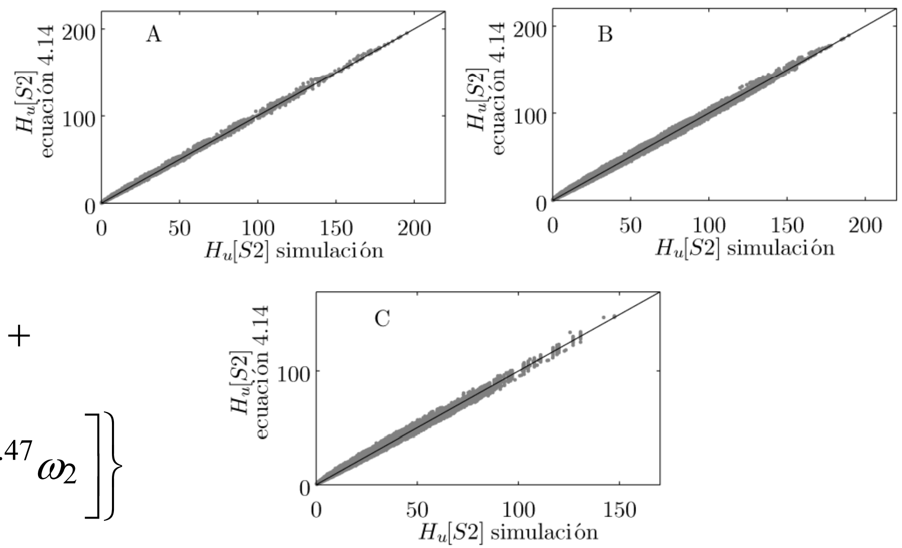
Funciones de distribución derivadas

La deducción analítica de funciones de distribución conjuntas y funciones de distribución condicionadas para incorporar dependencia espacial es bastante compleja, dada la **no linealidad** de las ecuaciones del flujo

→ Alternativa: regresión no-lineal

Ecuaciones de escalado empíricas

Capacidad de almacenamiento estático en la mesoescala:

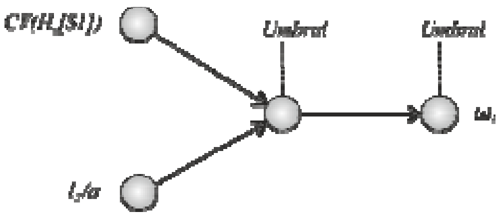


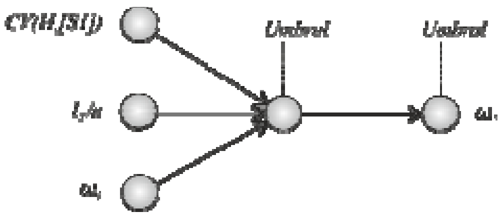
$$H_u[S2]_t = (X_{1,t}+H_{1,t})\left\{1-\Phi\left[\frac{\ln(X_{1,t}+H_{1,t}-\omega_1)}{\omega_2}\right]\right\} + \bar{H}_u[S1]\left\{\Phi\left[\frac{\ln(X_{1,t}+H_{1,t}-\omega_1)}{\omega_2} - 0.93\omega_1^{-0.47}\omega_2\right]\right\}$$

Parámetros relacionados con $CV(H_u[S1])$ y l_2/a

Ecuaciones de escalado empíricas

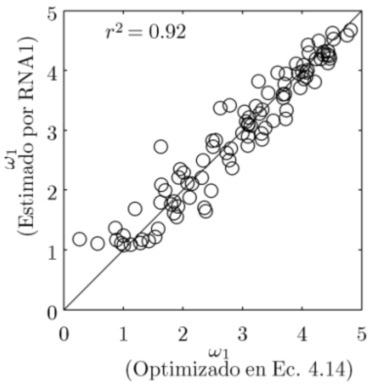
Capacidad de almacenamiento estático en la mesoescala:

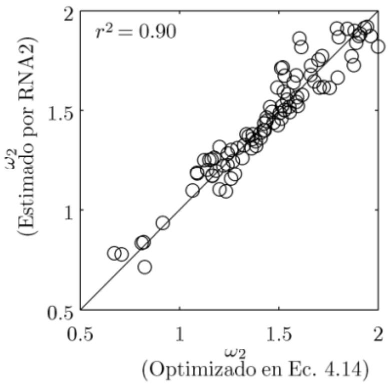


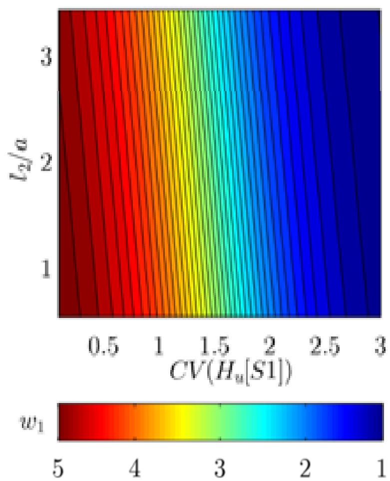


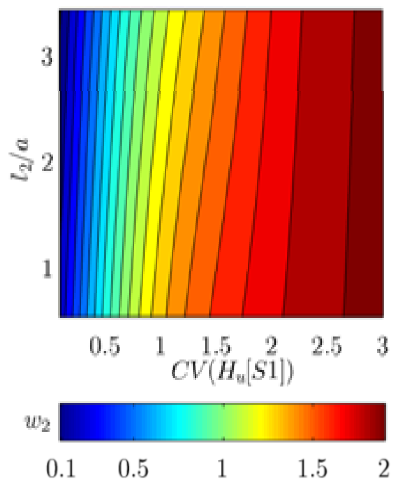
RNA1	Capa Oculta	Capa de salida
Función Activación	Tang.Hiperbólica	Lineal
Peso	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	
Bias	[illegible]	[illegible]

RNA2	Capa Oculta	Capa de salida
Función Activación	Tang.Hiperbólica	Lineal
Peso	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	
	[illegible]	
Bias	[illegible]	[illegible]



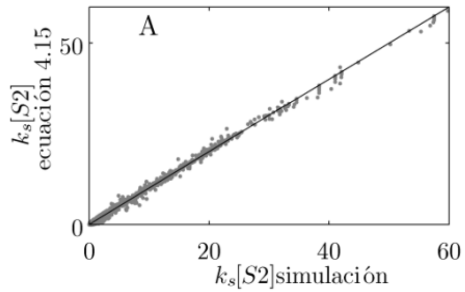


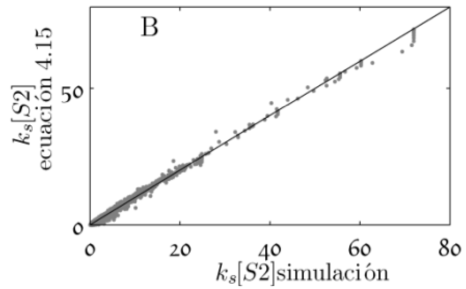




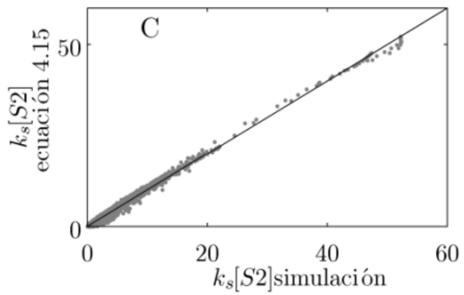
Ecuaciones de escalado empíricas

Conductividad hidráulica saturada del suelo en la mesoescala:





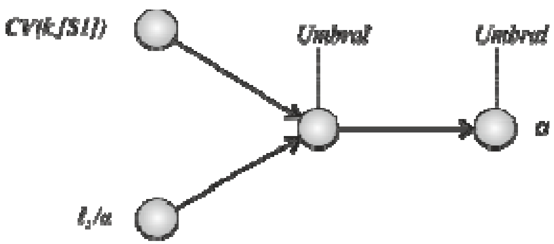
$$k_s[S2]_t = \overline{k}_s[S1]\{\varepsilon(X_2[S2]_t;\alpha)\} - X_2[S2]_t\{1-\varepsilon(X_2[S2]_t;\alpha)\}$$



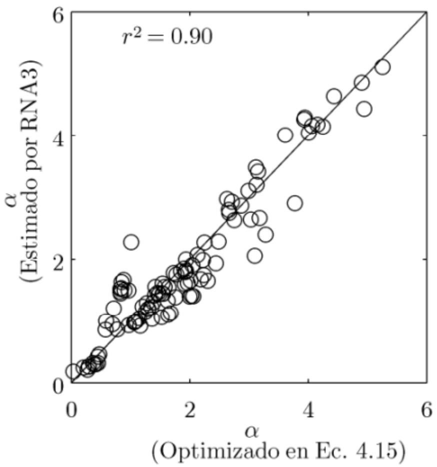
Parámetro relacionado con $CV(k_s[S1])$ y l_2/a

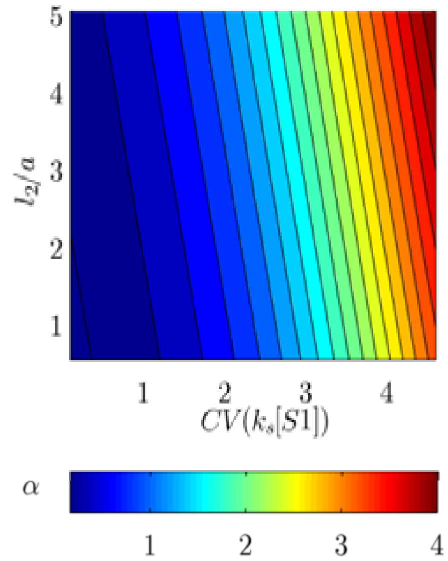
Ecuaciones de escalado empíricas

Conductividad hidráulica saturada del suelo en la mesoescala:



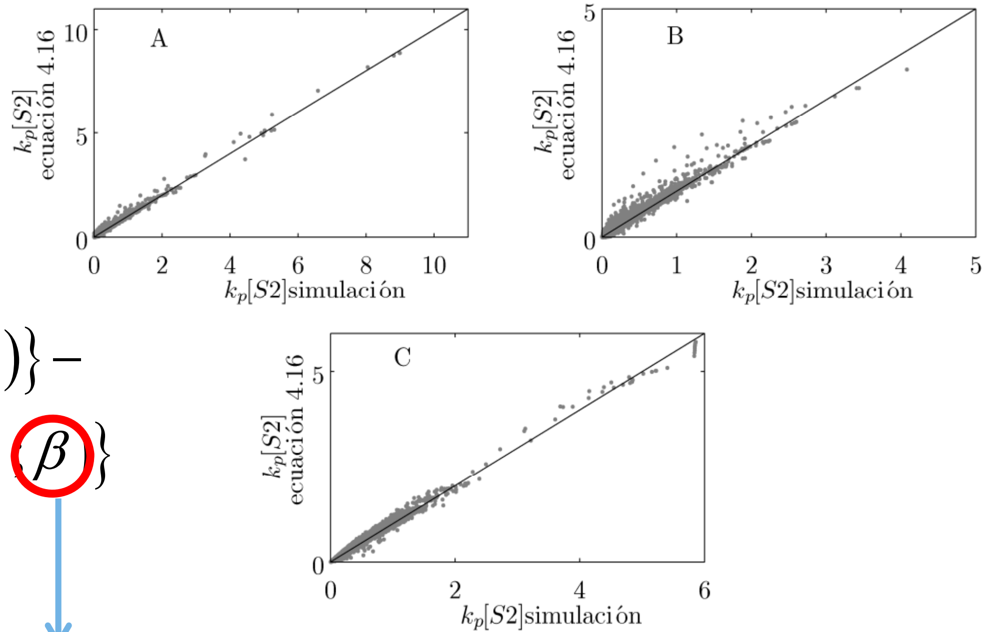
RNA3	Capa Oculta	Capa de salida
Función Activación	Tang.Hiperbolica	Lineal
Pesos	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	
Bias	[illegible]	[illegible]






Ecuaciones de escalado empíricas

<u>*Conductividad hidráulica saturada del sustrato del suelo en la mesoescala:*</u>

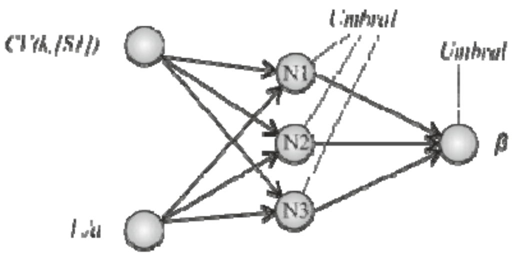


$$k_p[S2]_t = \overline{k}_p[S1]\{\varepsilon(X_3[S2]_t;\beta)\} - X_3[S2]_t\{1-\varepsilon(X_3[S2]_t;\beta)\}$$

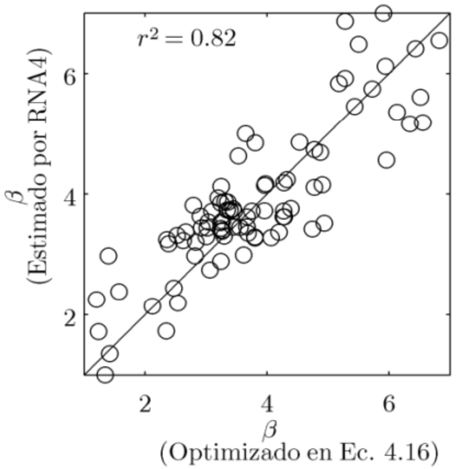
Parámetro relacionado con $CV(k_p[S1])$ y l_2/a

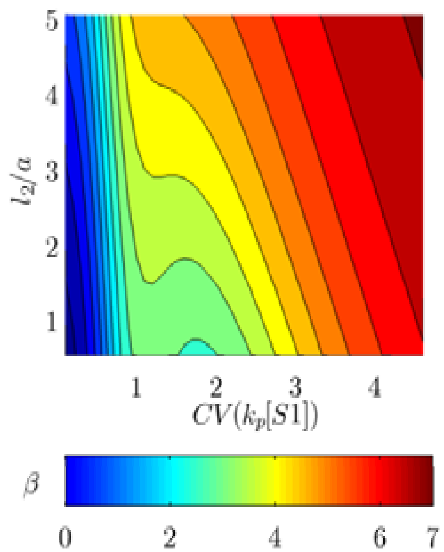
Ecuaciones de escalado empíricas

Conductividad hidráulica saturada del sustrato del suelo en la mesoescala:



RNA4	Capa Oculta			Capa de salida
Función Activación	Tang. Hiperbólica			Lineal
Pesos	N1	N2	N3	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Bias	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]



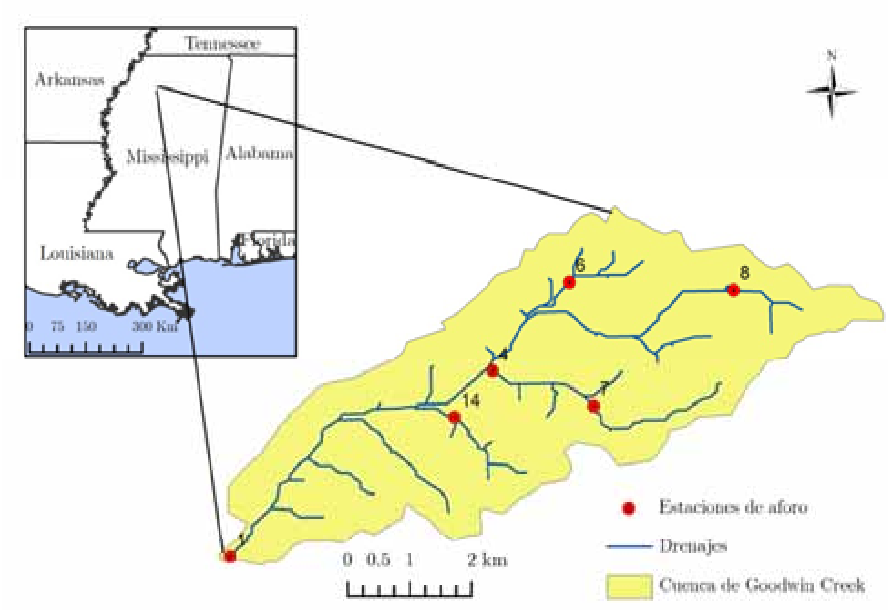


(3/3) Aplicación de las ecuaciones de escalado

Cuenca de estudio

Cuenca experimental de **Goodwin Creek**

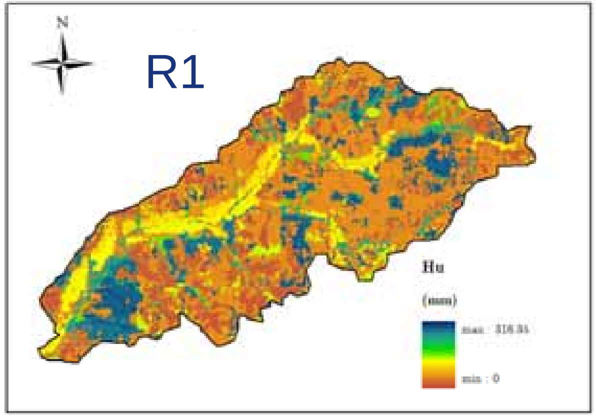
- Área de la cuenca: 21.6 km^2
- Río efímero
- Escorrentia Hortoniana
- 16 estaciones pluviográficas (resolución temporal de 5 minutos)
- 6 estaciones de aforo (calibración en la salida de la cuenca)
- DEM: 30x30 m^2
- Cinco eventos de crecida seleccionados en el periodo de 1981 a 1983: caudal pico de 38 a 106 m^3/s

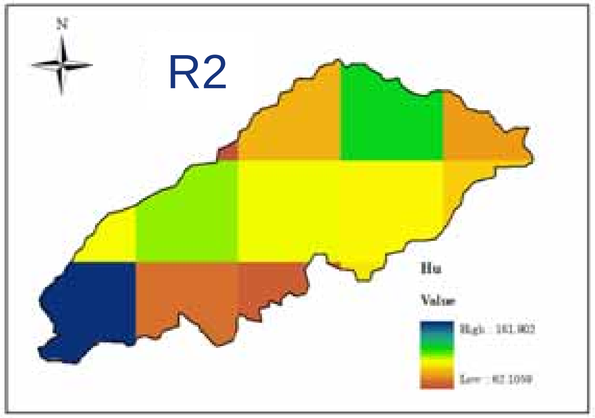


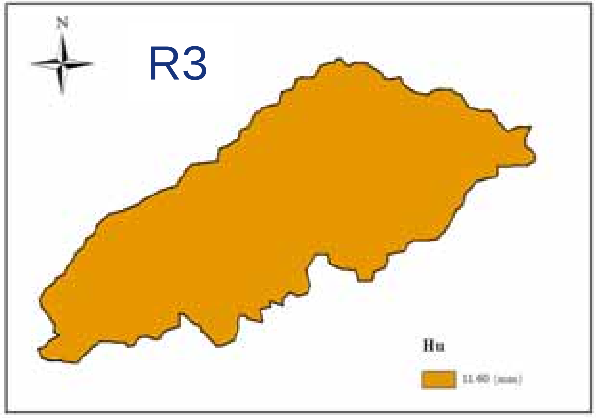
Escenarios modelados

Tres escalas de información, "con" o "sin" ecuaciones de escalado

Notación	Escenarios
R1	Mapas con resolución de 30x30 m^2, sin ecuaciones de escalado
R1+EE	Mapas con resolución de 30x30 m^2, con ecuaciones de escalado
R2	Mapas con resolución de 1740x1740 m^2, sin ecuaciones de escalado
R2+EE	Mapas con resolución de 1740x1740 m^2, con ecuaciones de escalado
R3	Mapas con el promedio para toda la cuenca, sin ecuaciones de escalado
R3+EE	Mapas con el promedio para toda la cuenca, con ecuaciones de escalado







Índices de evaluación de los modelos

Cinco índices:

Nash-Sutcliffe (NSE)

$$NSE = 1 - \sum_{t=1}^{T} \frac{\left(\hat{Q}_t - Q_t\right)^2}{\left(Q_t - \bar{Q}\right)^2}$$

Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T}\left(Q_t - \hat{Q}_t\right)^2}{T}}$$

Error en volumen (E_v)

$$E_v = \frac{V - \hat{V}}{V} \cdot 100$$

Error en caudal pico (E_Q)

$$E_Q = \frac{Q_p - \hat{Q}_p}{Q_p} \cdot 100$$

Error en tiempo al pico (E_t)

$$E_t = t_p - \hat{t}_p$$

Calibración

Calibración de factores correctores (FCs):

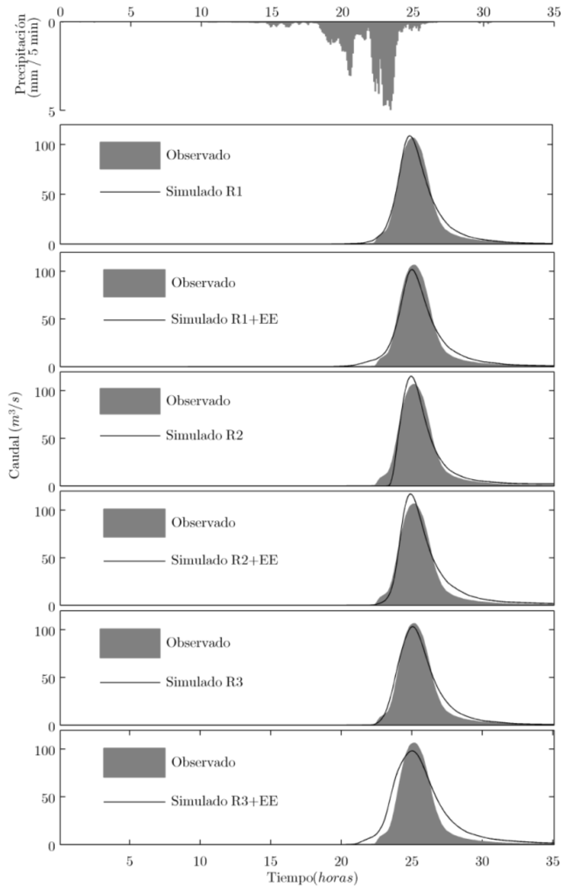
Identificador	Parámetro/Proceso afectado
FC1*	Almacenamiento estático
FC3*	Infiltración
FC4*	Velocidad del flujo en ladera
FC5*	Percolación
FC6*	Velocidad del flujo subsuperficial
FC9*	Velocidad del flujo en canales

+ 4 parámetros de EE

Calibración automática (SCE-UA)

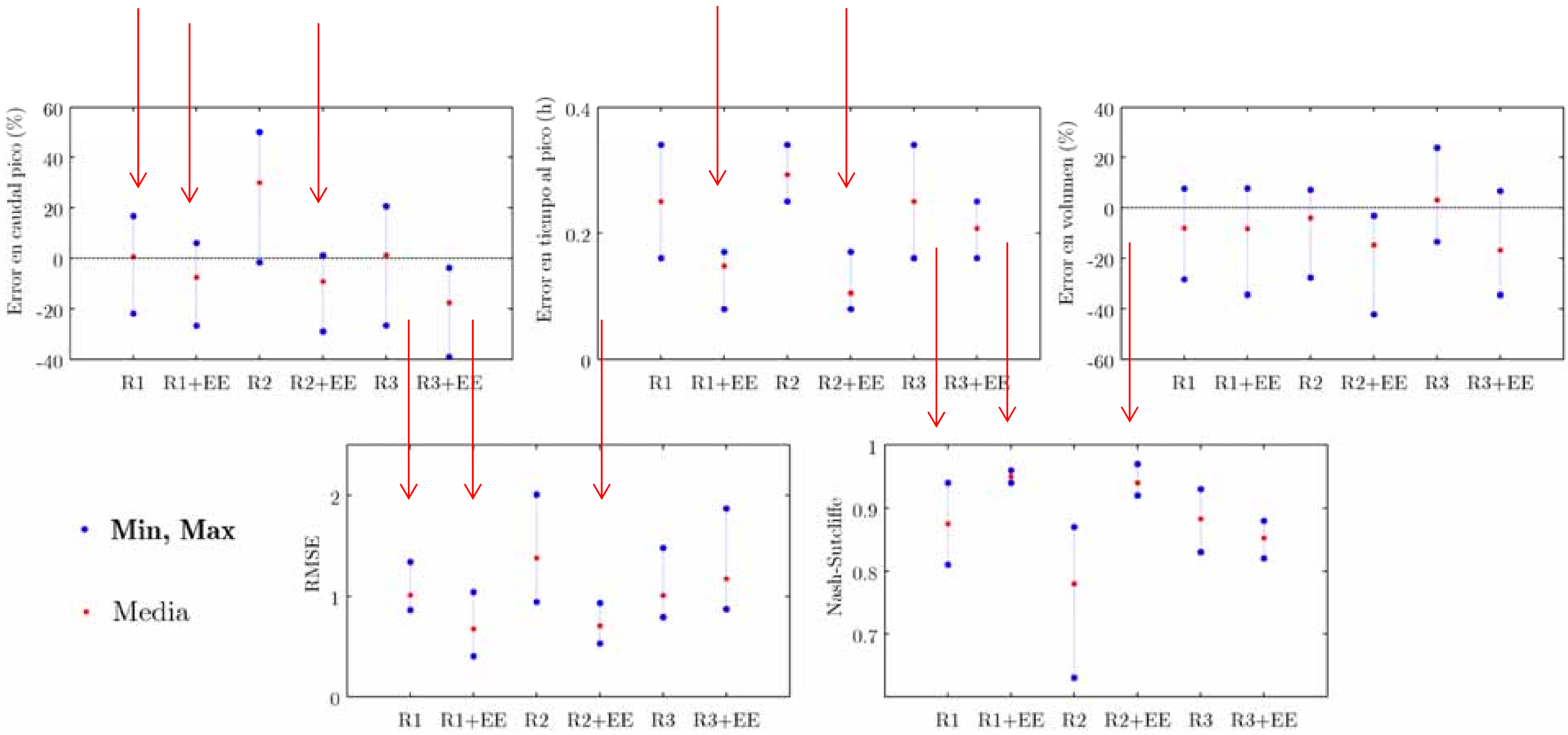
minimizar:

$$FO = 1 - NSE = 1 - 1 - \sum_{t=1}^{T} \frac{\left(\hat{Q}_t - Q_t\right)^2}{\left(Q_t - \bar{Q}\right)^2}$$

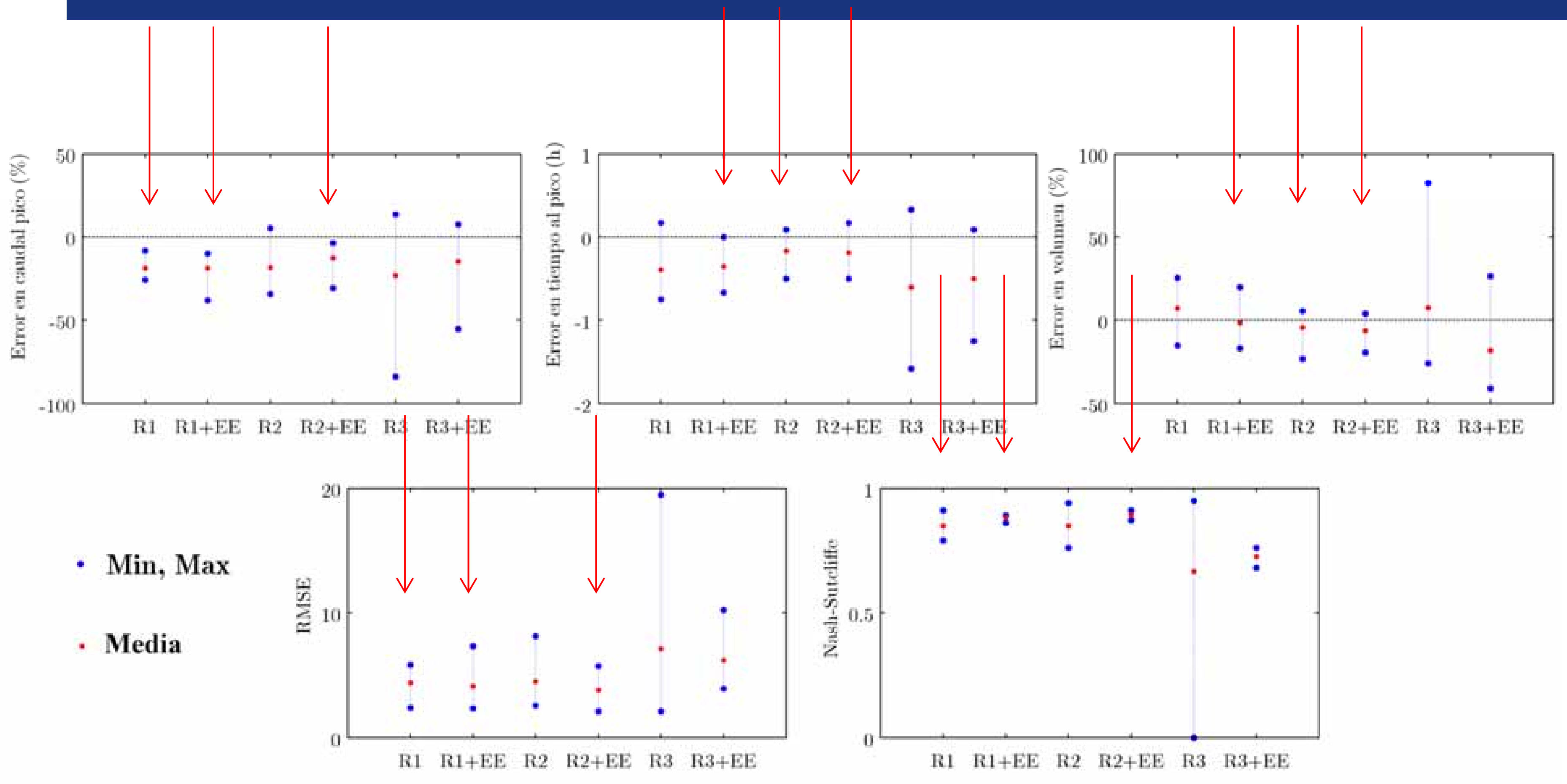


R1, R1+EE, R2, R2+EE, R3 y R3+EE: calibrados en la salida de la cuenca

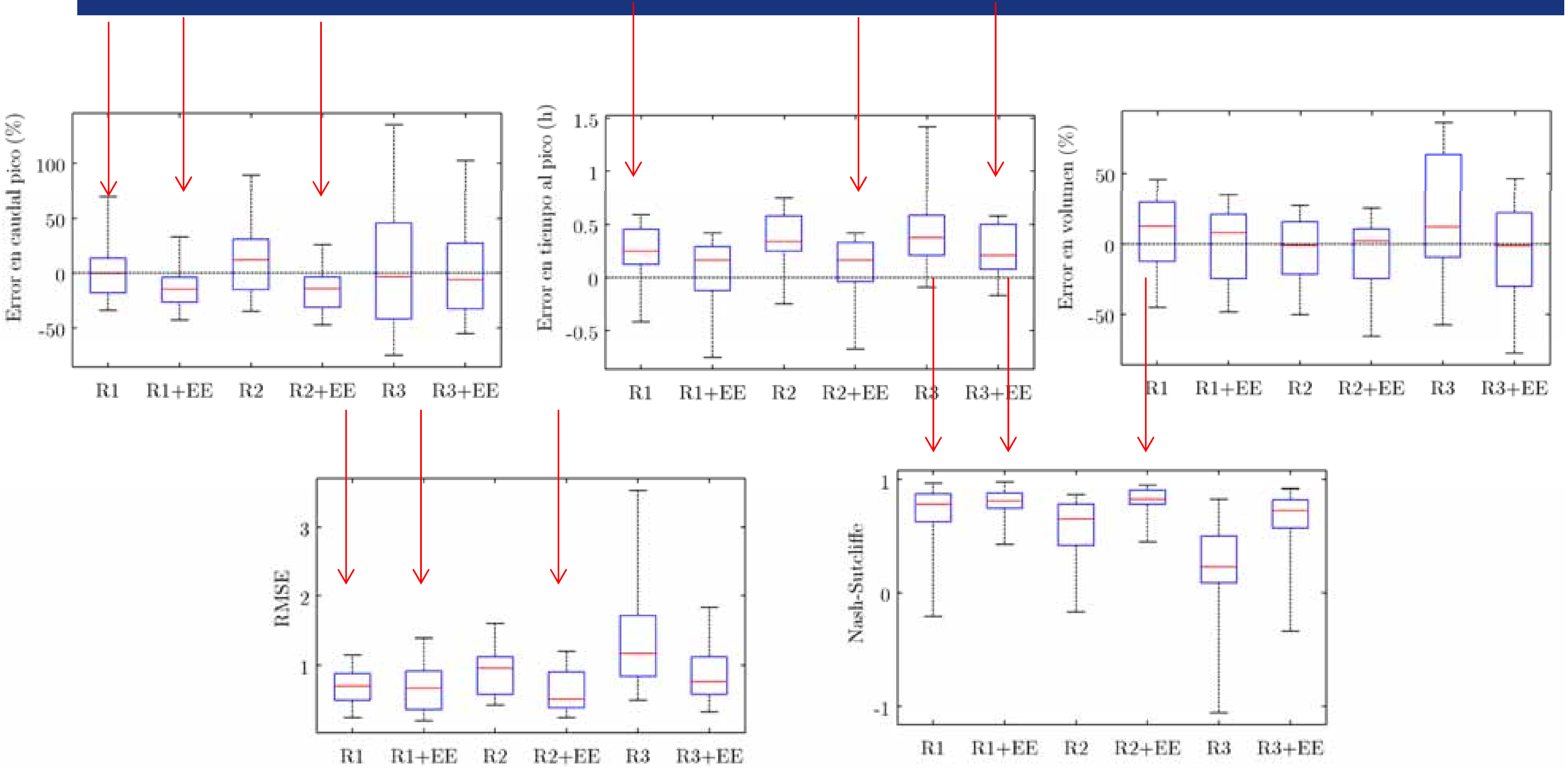
Validación espacial



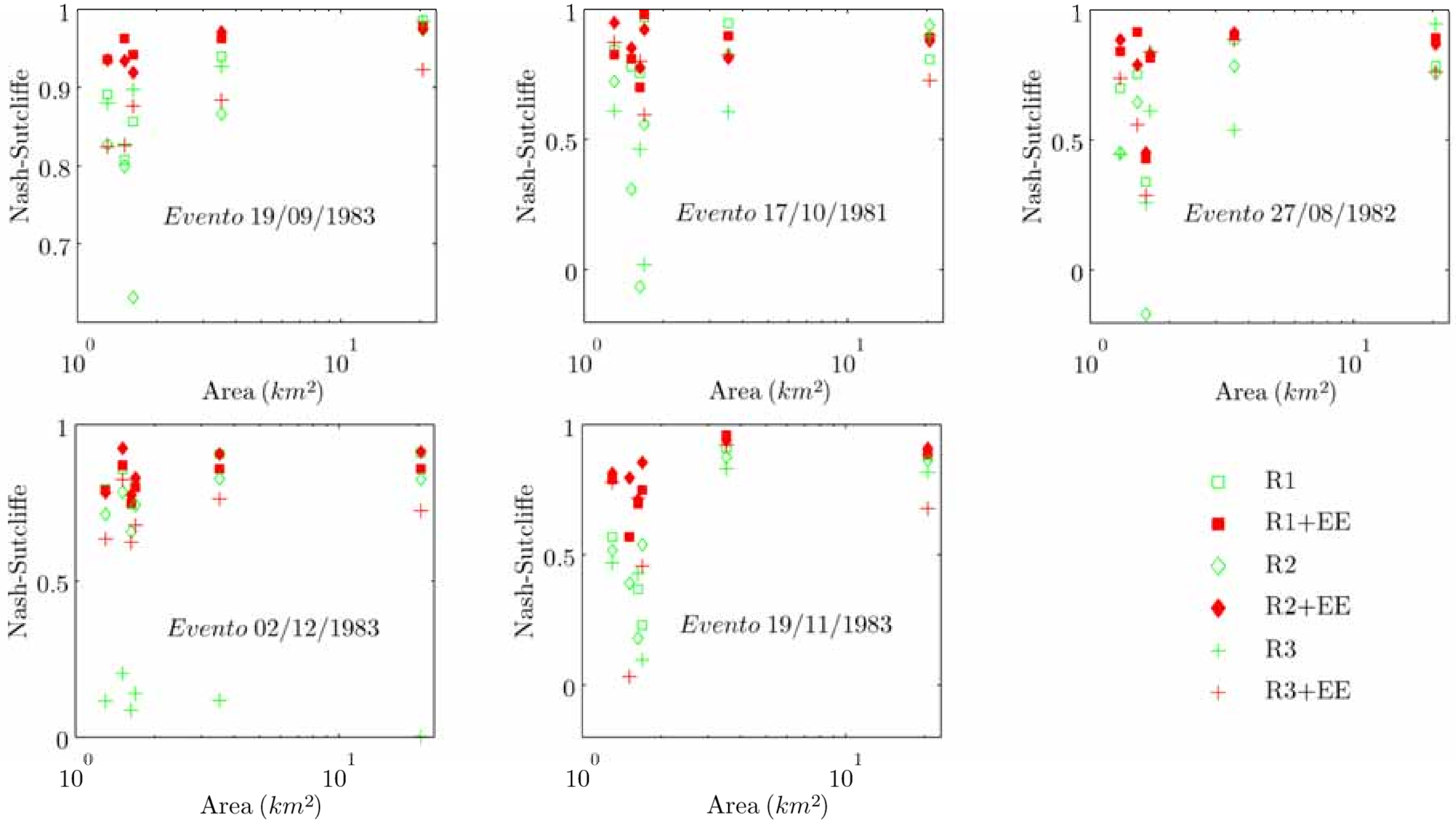
Validación temporal



Validación espacio-temporal

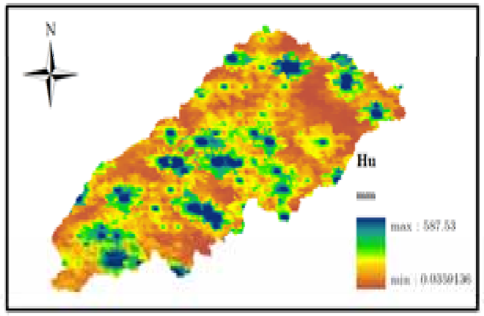


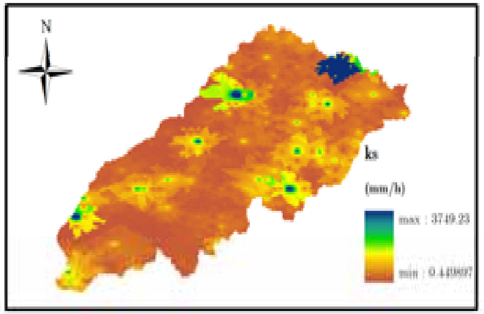
Desempeño vs. área de sub-cuenca

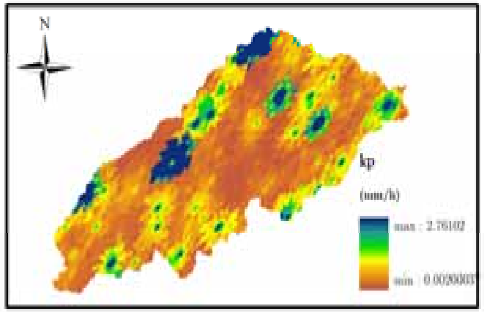


Efecto de agregación - experimento sintético

Campos de parámetros:





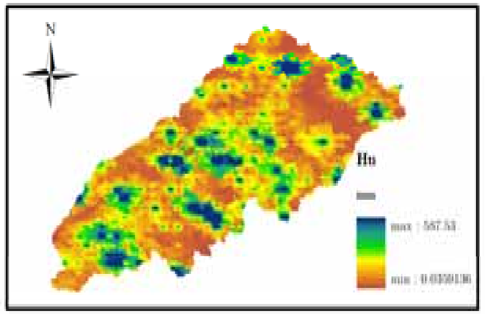


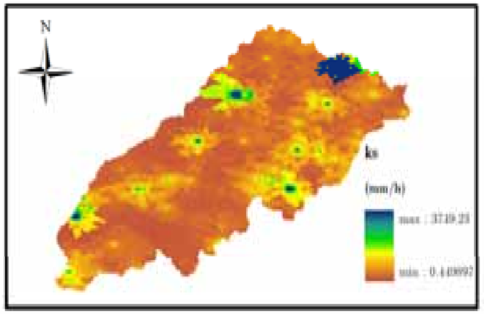
Propiedad	Parámetro		
	Hu	***ks***	***kp***
Modelo espacial	Exponencial	Exponencial	Exponencial
Rango máximo	200 m	200 m	200 m
Rango mínimo	100 m	100 m	100 m
Dirección	94.1°	92.5°	45°
Meseta	8595.7	26427	0.2177
Pepita	0	0	0
Media	44.32	40.31	0.0957
Desviación estándar	39.88	87.37	0.1154
CV	0.90	2.17	1.21

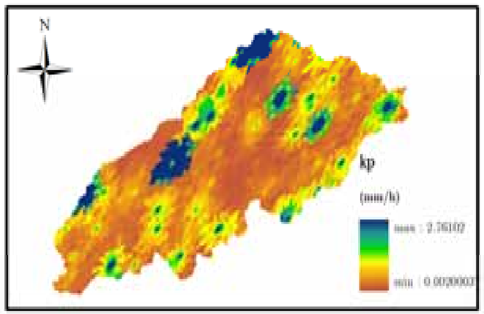
Efecto de agregación - experimento sintético

Parámetros de EE estimados:

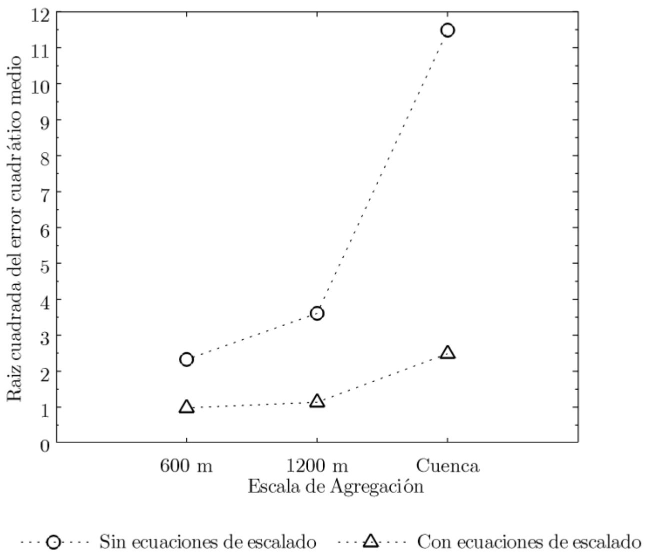
Resolución	Parámetro					
	Hu		*ks*		*kp*	
600 m	$\overline{CV} = 0.6$	$\omega_1 = 4.5$	$\overline{CV} = 0.6$	$\alpha = 0.35$	$\overline{CV} = 0.5$	$\beta = 1$
	$l_2/a > 3$	$\omega_2 = 0.8$	$l_2/a > 3$		$l_2/a > 3$	
1200 m	$\overline{CV} = 0.6$	$\omega_1 = 4.5$	$\overline{CV} = 1$	$\alpha = 0.45$	$\overline{CV} = 0.6$	$\beta = 1.2$
	$l_2/a > 3$	$\omega_2 = 0.8$	$l_2/a > 3$		$l_2/a > 3$	
cuenca	$CV = 0.9$	$\omega_1 = 3.5$	$CV = 2.1$	$\alpha = 0.6$	$CV = 1.2$	$\beta = 3$
	$l_2/a > 3$	$\omega_2 = 1.2$	$l_2/a > 3$		$l_2/a > 3$	

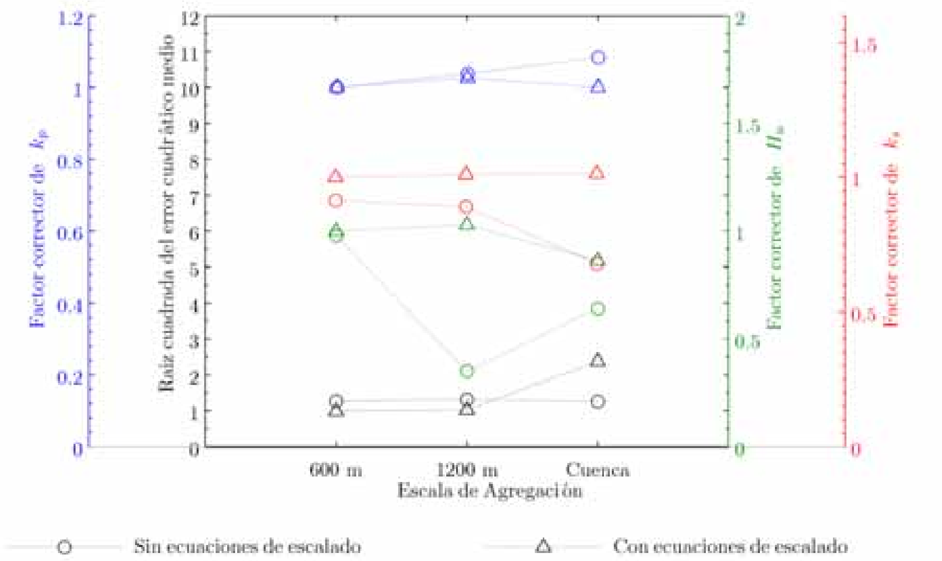






Efecto de agregación - experimento sintético





Sin calibración

Con calibración

Conclusiones

Conclusiones

- La solución inversa propuesta permitió transferir la variabilidad del sistema en la microescala a la mesoescala a través de parámetros efectivos no estacionarios

- A medida que la heterogeneidad se incrementa a nivel de microescala, es más probable encontrar valores del parámetro efectivo en la mesoescala inferiores al promedio del campo de valores en la microescala (mientras no se alcance la saturación)

- La varianza de los parámetros efectivos estimados en la mesoescala disminuye cuando aumenta la relación entre el tamaño de celda en la mesoescala y la longitud de correlación (l_2/a). Esta propiedad es fundamental para identificar un tamaño de celda que tenga las características de REA


Conclusiones

- El efecto de la macro no-linealidad, la heterogeneidad de los parámetros y la variabilidad del input puede mitigarse mediante el uso de Ecuaciones de Escalado de parámetros efectivos no estacionarios

- La representación de la variabilidad a nivel de sub-celda es importante en la modelación hidrológica, particularmente:

  - Se observó un mejoramiento sistemático del desempeño del modelo en las validaciones en puntos internos de la cuenca y para los eventos de crecida más pequeños
  - En general, se encontró un mejor funcionamiento en validación de R1+EE y R2+EE en comparación con el modelo de referencia R1

Futuras líneas de investigación

- Se ha identificado que el efecto de escala espacial está relacionado con la magnitud del evento. Es importante investigar la existencia de umbrales de lluvia a partir de los cuales se minimice el efecto de escala espacial

- Esta tesis se ha centrado en el análisis del efecto de escala espacial en los parámetros hidráulicos del suelo (que representan dos tipos de no linealidad). Es necesario estudiar y entender los efectos de escala en otros procesos como la evapotranspiración y la propagación del flujo


Futuras líneas de investigación

- Interesa abordar desde este mismo enfoque el efecto de escala espacial en otros modelos hidrológicos distribuidos para contrastar sus resultados con los resultados de esta investigación

- Implicaciones de la utilización de las ecuaciones de escalado en la incertidumbre del modelo

- Articular el conocimiento de los diferentes procesos hidrológicos que se han conceptualizado en la mesoescala con formulaciones desarrolladas en otras escalas

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación a través de los proyectos de investigación FLOOD-MED (ref. CGL2008-06474-C02-02/BTE) y Consolider-ingenio SCARCE (ref. CSD2009-00065). Y ha contado con el soporte del Programa ALβan, Programa de Becas de Alto Nivel de la Unión Europea para América Latina, beca No. E07D402940CO.

Gracias por su atención