

Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos

Tesis doctoral

Juan José Montoya Monsalve

Director: Doctor Félix Francés García



Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Estructura de la presentación

1. Introducción
2. Formulación del modelo
3. Implementación del modelo
4. Conclusiones

Antecedentes

Aumenta el interés por el aprovechamiento sostenible de recursos naturales y la atención por cambios ambientales (antrópicos o naturales).

Se necesita entender los procesos claves en la dinámica ambiental y herramientas para la simulación y predicción de cambios.

La modelación hidrológica debe incluir no sólo procesos lluvia-escorrentía sino también procesos de producción, transporte y depósito de sedimentos. Esto permitirá analizar aspectos como:

- Localización de zonas y cuencas de producción y pérdida de suelos, tanto en laderas como en cauces.
- Cuantificación de producción de sedimentos en cuencas y estimación de tasas de sedimentación en embalses y cuerpos de agua.
- Efectos de variaciones ambientales en la dinámica de sedimentos.

Objetivos

Objetivo general:

- Desarrollar un modelo conceptual, distribuido en el espacio y en el tiempo y basado en el estado del arte actual, que permita simular la dinámica sedimentológica.

Objetivos particulares:

- Desarrollar un herramienta computacional para simular la producción, el transporte y la sedimentación (basada en un modelo hidrológico *TETIS* y la aproximación sedimentológica en el modelo *CASC2D-SED*).
- Aplicar el modelo en una cuenca natural. La cuenca debe tener medidas de lluvia, caudal líquido y sólido, información cartográfica y resultados de aplicación de otros modelos ya probados. La cuenca de *Goodwin Creek* (Estado de Mississippi, USA).

Los principios de evolución del paisaje

El análisis del paisaje como sistema dinámico comenzó con la teoría del ciclo geográfico de William Morris Davis a finales del siglo XIX.

“Toda la variedad de formas del terreno dependen de - o, como dirían los matemáticos, son función de – tres variables, que pueden ser denominadas estructura, proceso, y tiempo.”

La variabilidad temporal

- El principio del antagonismo (Scheideger, 1970)
- El principio de inestabilidad (Scheideger, 1983)
- El principio de la catena (Milne, 1935)
- El principio de selección (Gerber, 1969)
- El principio de control estructural (Scheideger, 1987)

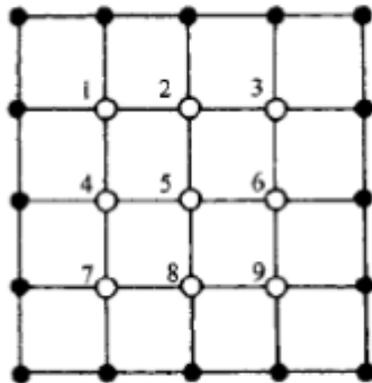
Los modelos de evolución del paisaje

Puntos en común:

- La división de la superficie del terreno en una serie de elementos discretos y conectados.
- La aplicación de leyes de conservación de masa para cada elemento del terreno.
- La definición de la dirección de flujo y la red de drenaje entre cada discretización de la superficie del terreno.

Formas de representar el paisaje (DEM):

Estructura matricial



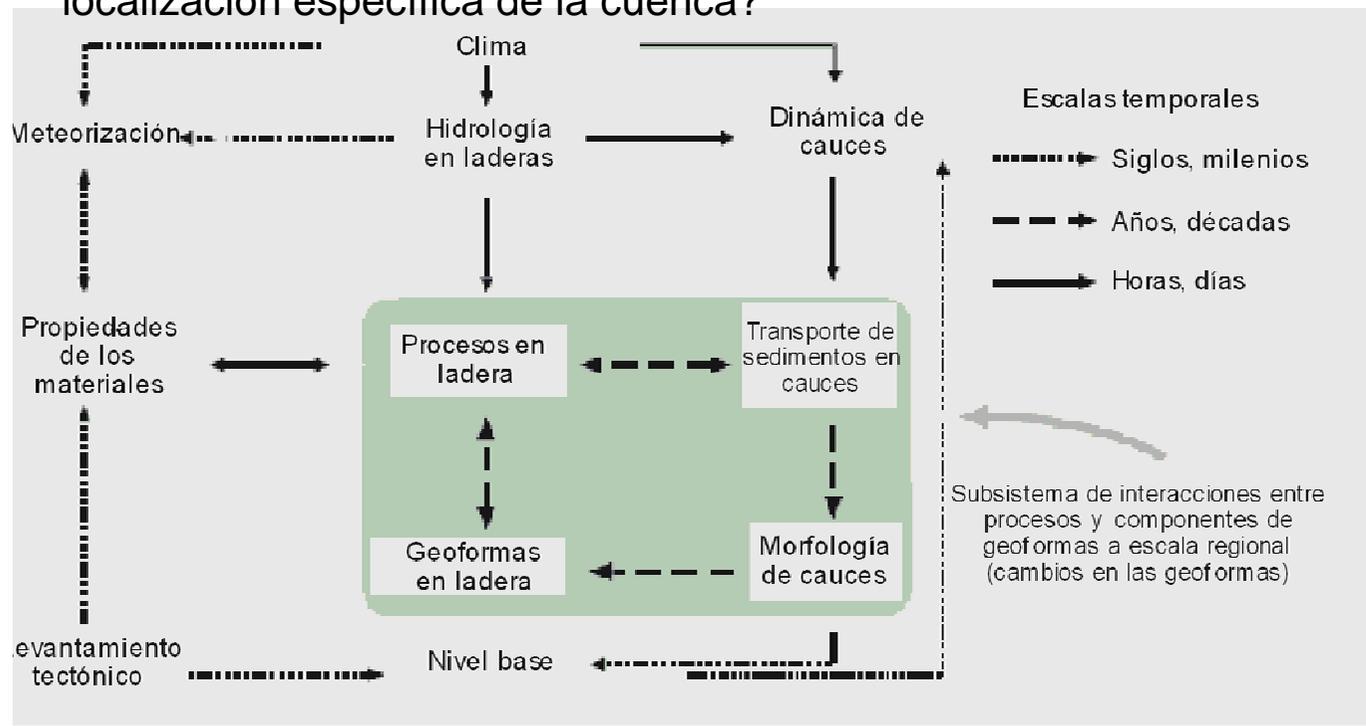
Redes de triángulos irregulares (TIN)



Preguntas básicas de un modelo de erosión

- ¿Dónde y cuándo se presenta la erosión (producción de sedimentos)?
- ¿Hasta dónde se transportan estos sedimentos?
- ¿Dónde y cuándo se depositan los sedimentos?
- ¿Cuál es el tiempo de residencia de los sedimentos en una localización específica de la cuenca?

Introducción



Componentes y procesos del sistema, Preston y Schmidt (2003)

Tipos de modelos de erosión

1. Modelos de erosión empíricos:

Basados en la USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos)

- SWAT
- ANSWER
- AGNPS
- WATEM/SEDEM
- RHINEFLOW
- EPIC

2. Modelos de erosión basados en procesos:

Utilizan relaciones matemáticas para describir los procesos que actúan.

- RILLGROW
- CREAMS
- GLEAMS
- WEEP
- LISEM
- EUROSEM
- STREAM
- CASC2D-SED
- SHETRAN

De tipo mixto (base física y factores de la USLE)



1. Introducción

2. Formulación del modelo

3. Implementación del modelo

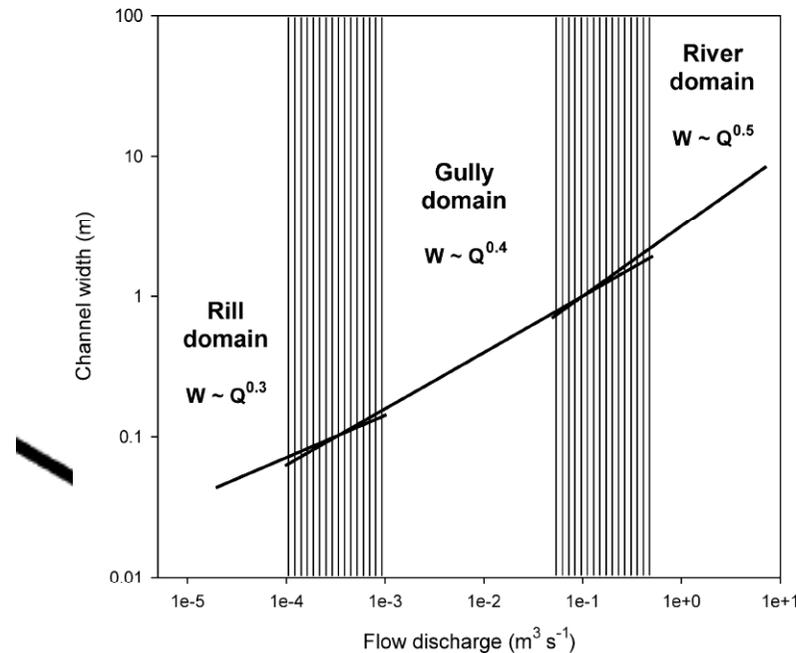
4. Conclusiones

Preguntas desarrolladas en la formulación

- ¿Cómo definir los elementos del sistema?
- ¿Cómo discretizar espacialmente la cuenca?
- ¿Cómo conectar los elementos de discretización?
- ¿Cómo definir los procesos hidrológicos y sedimentológicos relevantes?
- ¿Cuáles son las relaciones matemáticas que describen los procesos?
- ¿Cómo integrar el conocimiento previo de las condiciones físicas de la cuenca en el modelo (los parámetros y su estructura y las condiciones iniciales)?

Los elementos del sistema

A partir de relaciones topográficas y características físicas del terreno es posible diferenciar el paisaje en diversos elementos a partir de áreas umbrales que representan el inicio de la erosión concentrada (en surcos, cárcavas o ríos).



Relación potencia-Relación idealizada entre caudal y ancho de canales (surcos, fuente y el cauce de ríos, Nachtergaele, et al. (2002) y Detritch (1989)

Los elementos del sistema

Localización de surcos y cárcavas

Patton y Schumm (1975) $S = a \times A^b$

- Vandaele, *et al.* (1996) $F_c = S \left(\frac{A}{w} \right)^{0,4} > 0,5$

- Moore, *et al.* (1988) $F_c = S \left(\frac{A}{w} \right) \geq 18 \therefore \ln \left(\frac{A/w}{S} \right) \geq 6,8$

- Vandaele, *et al.* (1996) $F_c = S \geq 0,025 \left(\frac{A}{10000} \right)^{-0,4}$

- Desmet y Govers (1997) $F_c = S \left(\frac{A}{w} \right)^{0,4} > 0,72$

- Vandaele, *et al.* (1997) $F_c = S \left(\frac{A}{w} \right) \geq 40 \therefore \ln \left(\frac{A/w}{S} \right) \geq 9,8$

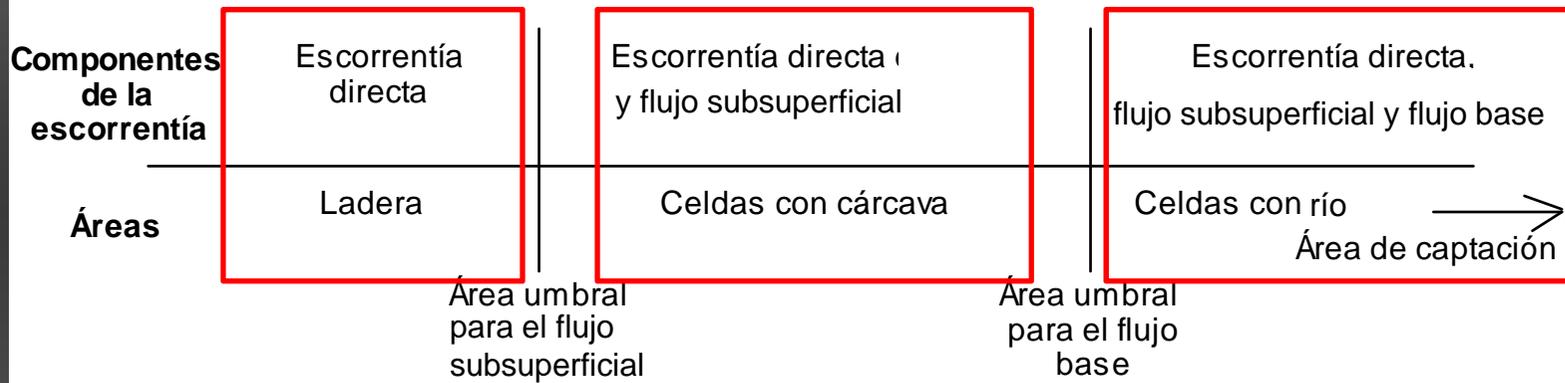
- Desmet y Govers (1997) $F_c = S \left(\frac{A}{w} \right)^{0,4} > 0,22$

F_c = umbral crítico a partir del cual se encuentra una cárcava (la última relación es para surcos)

S = pendiente (m/m), A = área de captación (m²), y w = ancho de flujo (m)

Los elementos del sistema

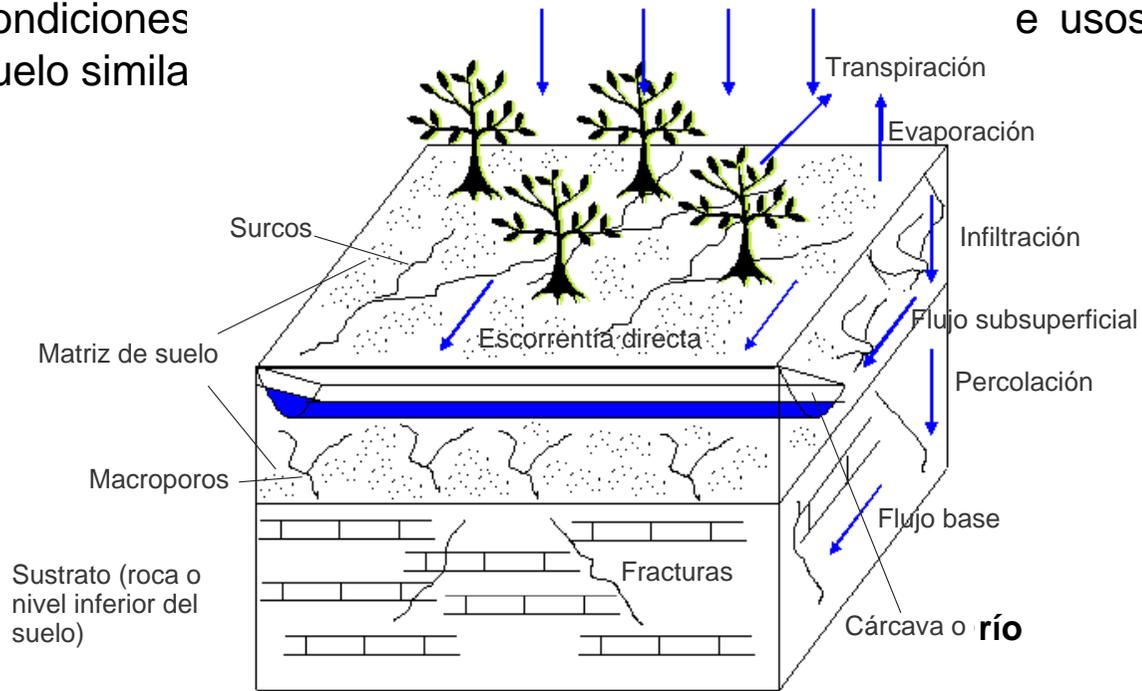
Formulación del modelo



Elementos del sistema, áreas umbrales y componentes de la escorrentía para cada área

La discretización espacial de la cuenca

- **La unidad elemental de discretización, la celda.** Unidades más simples en donde se presentan los procesos hidrológicos y sedimentológicos.
- **Las unidades geomorfológicas homogéneas.** Zonas con condiciones e usos del suelo simila



Esquema simplificado de una celda, procesos hidrológicos y rutas preferentes para el agua

Los procesos hidrológicos

La producción de escorrentía

Almacenamiento estático

$$X_1 = \sum_{j=1}^n \varpi_j [X_{1,j} + \beta(z - z_j)]$$

$$X_2 = \text{Max}\{0; X_1 - H_u^* + H_1\}$$

$$Y_1 = \text{Min}\{ETP \times \lambda(m); H_1\}, m = 1, \dots, 12$$

Almacenamiento superficial

$$X_3 = \text{Min}\{X_2; \Delta t \times K_s\}$$

$$Y_2 = \alpha \times H_2 \quad \alpha = 1 - \frac{\Delta x}{\Delta x + v^* \times \Delta t}$$

Almacenamiento gravitatorio

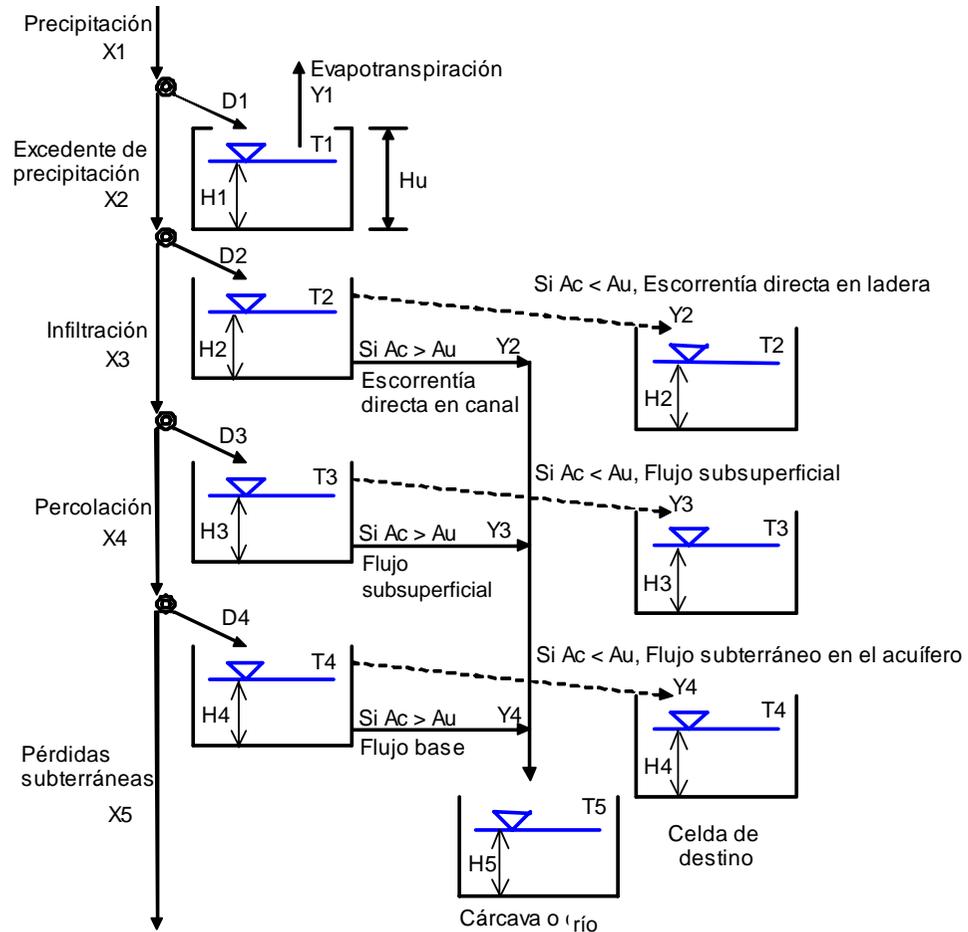
$$X_4 = \text{Min}\{X_3; \Delta t \times K_s\}$$

$$Y_3 = \alpha \times H_3 \quad \alpha = 1 - \frac{\Delta x}{\Delta x + K_{ss}^* \times \Delta t}$$

Almacenamiento subterráneo

$$X_5 = \text{Min}\{X_4; \Delta t \times K_p\}$$

$$Y_4 = \alpha \times H_4 \quad \alpha = 1 - \frac{\Delta x}{\Delta x + K_b^* \times \Delta t}$$



Conexión hidrológica entre tanques para cada celda, adaptado de Vélez (2001)

Los procesos hidrológicos

La propagación del flujo, Onda cinemática geomorfológica (Velez, 2001)

Ecuación de conservación de masa:

$$Q_t \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{1}{v_t} + 1 \right) = \frac{1}{\Delta t} \left(\sum_j I_{j,t} + S_{t-1} \right)$$

Simplificaciones de la OC:

- Se desprecian los términos de presión e inercia en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento (línea de energía = pendiente del cauce).
- La velocidad y profundidad se pueden relacionar mediante una ecuación de pérdida de energía, suponiendo un flujo uniforme (Ecuación de Manning):

$$v_t^* = \frac{1}{n} \left[\frac{A_t}{w_t} \right]^{2/3} S_0^{1/2}$$

NO ES POSIBLE MEDIR PARA CADA CELDA LA GEOMETRÍA Y LA RUGOSIDAD DEL CAUCE. SOLUCIÓN DE LA OCG: RELACIONES GEOMORFOLÓGICAS

Los procesos hidrológicos

La propagación del flujo, Onda cinemática geomorfológica (Velez, 2001)

Leopold y Maddock (1953) y Leopold *et al.* (1964) :

$$y = K_y \Lambda^{\varphi(\beta_1 - \beta_2)} Q^{\beta_2}$$

$$w = K_w \Lambda^{\varphi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} Q^{\varepsilon_2}$$

$$v = K_v \Lambda^{\varphi(\lambda_1 - \lambda_2)} Q^{\lambda_2}$$

COEFICIENTES Y
EXONENTES DE VALIDEZ
REGIONAL

Generalización de la rugosidad (Velez, 2001): $n = \Omega \Lambda^{\sigma_1} y^{\sigma_2} S^{\sigma_3}$

Los procesos hidrológicos

La propagación del flujo, Onda cinemática geomorfológica (Velez, 2001)

Leopold y Maddock (1953) y Leopold *et al.* (1964) :

$$y = K_y \Lambda^{\varphi(\beta_1 - \beta_2)} Q^{\beta_2}$$

$$w = K_w \Lambda^{\varphi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} Q^{\varepsilon_2}$$

$$v = K_v \Lambda^{\varphi(\lambda_1 - \lambda_2)} Q^{\lambda_2}$$

COEFICIENTES Y
EXPONENTES DE VALIDEZ
REGIONAL

Generalización de la rugosidad (Velez, 2001): $n = \Omega \Lambda^{\sigma_1} y^{\sigma_2} S^{\sigma_3}$

Ecuación en diferencias finitas:

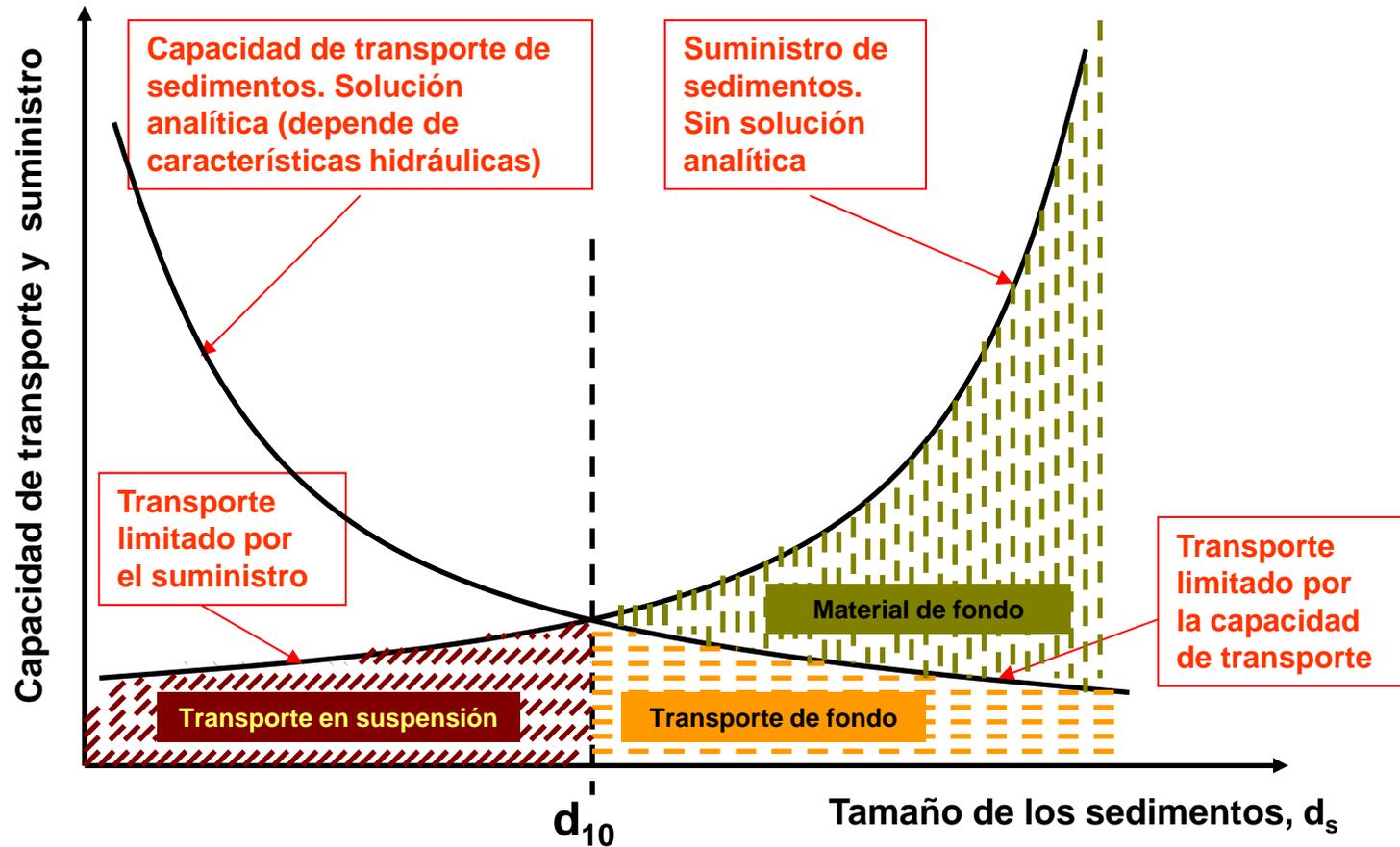
$$Q_t \left(1 + \frac{\Omega \Lambda^{\sigma_1} S_0^{\sigma_3}}{\left(K_y \Lambda^{\varphi(\beta_1 - \beta_2)} Q^{\beta_2} \right)^{2/3 - \sigma_2} S_0^{1/2}} (\Delta x / \Delta t) \right) = \frac{1}{\Delta t} \left(\sum_j I_{j,t} + S_{t-1} \right)$$

- 9 Parámetros geomorfológicos regionales
- 2 características obtenibles desde el MED (S_0 , Λ)

Los procesos sedimentológicos

La cantidad de material que puede transportar un flujo depende de dos grupos de variables:

Formulación del modelo



Capacidad de transporte vs suministro de sedimentos, adaptado de Julien (1998)

Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos

Los procesos sedimentológicos en ladera

- Procesos en áreas entre surcos:

- Erosión por el impacto de las gotas de lluvia.
- Erosión por flujo laminar en ladera.

- Procesos en surcos:

- Erosión por flujo concentrado y turbulento.

Aproximaciones físicas:

EUROSEM, LISEM,
GLEAMS, WEEP,
CREAMS.

Gran cantidad de
parámetros a estimar con
alta incertidumbre
(geometría y densidad de
surcos)

Capacidad de transporte en ladera a partir de análisis
dimensional (Julien y Simons, 1985):

Los procesos sedimentológicos en ladera

- Procesos en áreas entre surcos:

- Erosión por el impacto de las gotas de lluvia.
- Erosión por flujo laminar en ladera.

- Procesos en surcos:

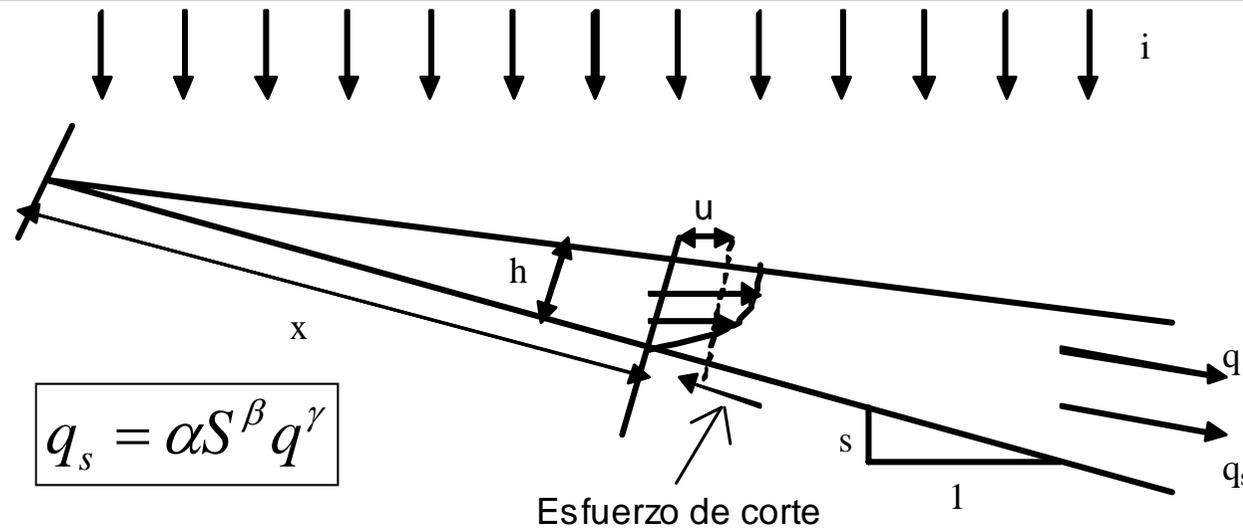
- Erosión por flujo concentrado y turbulento.

Aproximaciones físicas:

EUROSEM, LISEM,
GLEAMS, WEEP,
CREAMS.

Gran cantidad de
parámetros a estimar con
alta incertidumbre
(geometría y densidad de
surcos)

Capacidad de transporte en ladera a partir de análisis dimensional (Julien y Simons, 1985):



Los procesos sedimentológicos en ladera

En canaletas de laboratorio, Kilinc y Richardson (1973):

$$q_s = 25500S^{1.664}q^{2.035}$$

Julien (1998) modifica la ecuación:

$$q_s = 23210S^{1.66}q^{2.035} \frac{K}{0.15} C \times P$$

Submodelo
hidrológico

DEM

K: factor de erosionabilidad del suelo

C: factor de cultivo

P: factor de prácticas de conservación

Erosión superficial total: $E_t = \int_t \int_x q_s dxdt$

Los procesos sedimentológicos en ladera

Capacidad de transporte de sedimentos (en m³):

$$Q_{s_{KR}} = \alpha \cdot S^{1.66} \cdot q^{2.035} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot x \cdot \Delta t$$

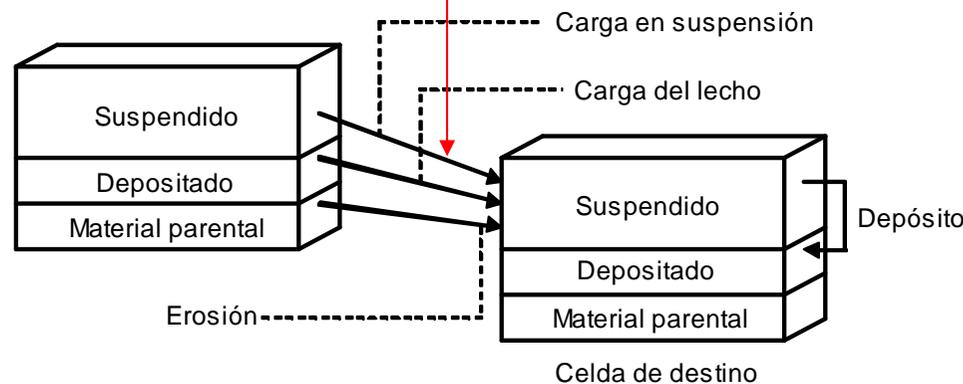
Factor de calibración

Los sedimentos en suspensión se transportan por procesos advectivos:

$$Q_{s_{SUS_i}} = \begin{cases} \text{Max} \left(Q_{s_{ADV_i}}; Q_{s_{KR}} \frac{Vol_{SUS_i}}{\sum_{i=1}^3 Vol_{SUS_i}} \right) \dots Si \dots Q_{s_{KR}} < \sum_{i=1}^3 Vol_{SUS_i} \\ Vol_{SUS_i} \dots Si \dots Q_{s_{KR}} \geq \sum_{i=1}^3 Vol_{SUS_i} \end{cases}$$

$$Q_{s_{ADV_i}} = Vol_{SUS_i} \frac{V \cdot \Delta t}{x}$$

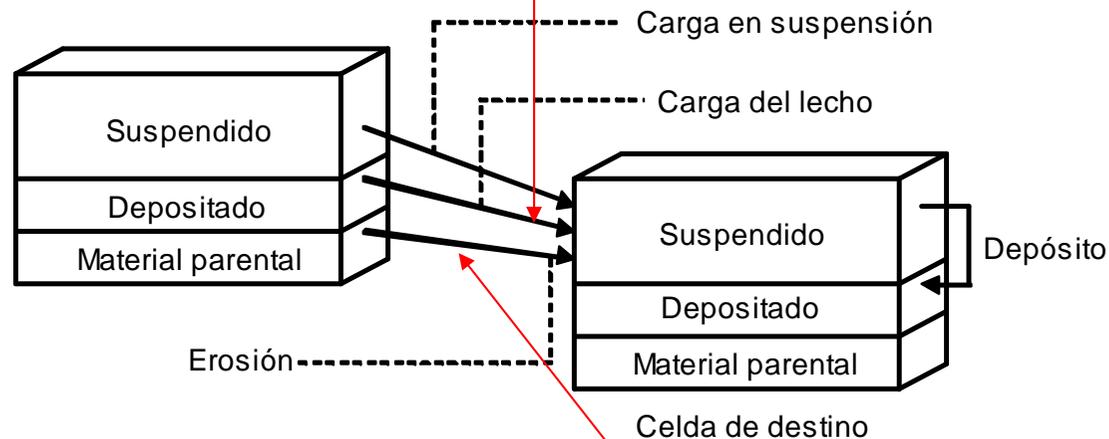
Sedimentos (m³) que pueden transportarse por procesos advectivos



Los procesos sedimentológicos en ladera

Sedimentos que se transportan como material de fondo:

$$Q_{S_{ML_i}} = \begin{cases} CapExc_{ML} \frac{Vol_{ML_i}}{\sum_{i=1}^3 Vol_{ML_i}} \dots Si \dots CapExc_{ML} < \sum_{i=1}^3 Vol_{ML_i} \\ Vol_{ML_i} \dots Si \dots CapExc_{ML} \geq \sum_{i=1}^3 Vol_{ML_i} \end{cases} \quad CapExc_{ML} = Max\left(0; Q_{S_{KR}} - \sum_{i=1}^3 Q_{S_{SUS_i}}\right)$$

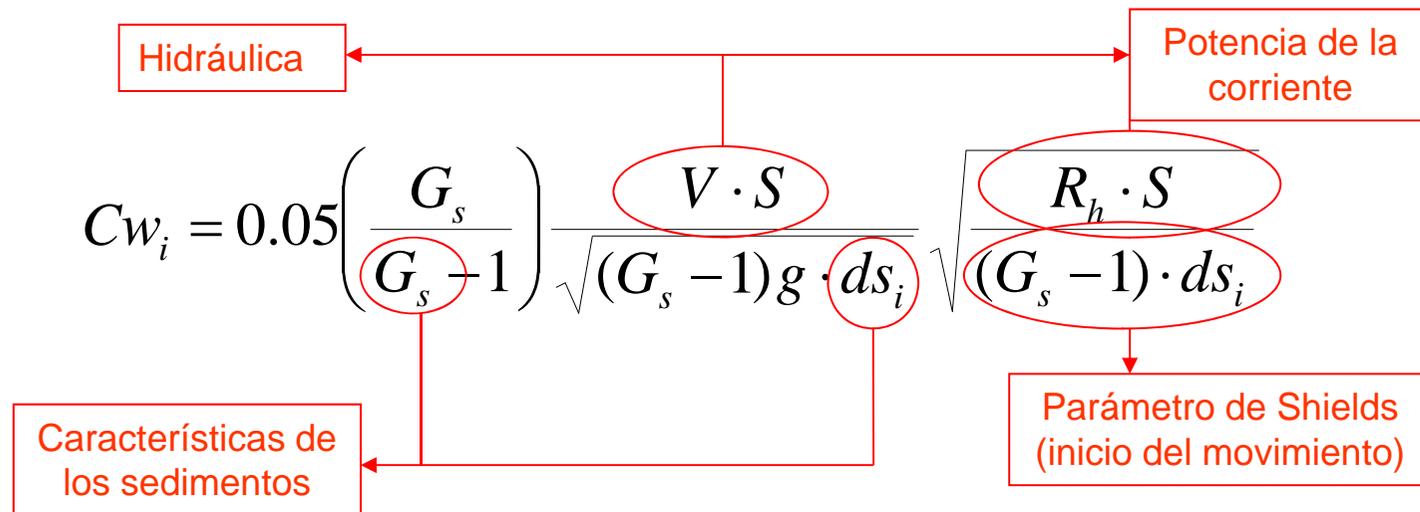


Si aún queda capacidad de transporte, el suelo se erosiona:

$$Q_{S_{EROS_i}} = P_i \left(CapExc_{ML} - \sum_{i=1}^3 Q_{S_{ML_i}} \right)$$

Los procesos sedimentológicos en cauces

Capacidad de transporte, Engelund y Hansen (1967), concentración por peso de sedimentos en un flujo:



Recomendada por Julien (1998) y por Aguirre-Pe, *et al* (2006). Buen desempeño en diversidad de cauces (naturales y de laboratorio)

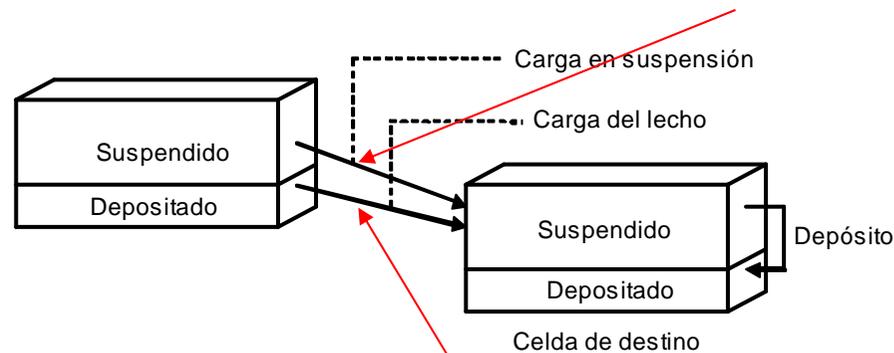
Los procesos sedimentológicos en cauces

Volumen que puede ser transportado:

$$Q_{S_{EH_i}} = \frac{Q \cdot Cw_i \cdot \Delta t}{2.65}$$

Los sedimentos en suspensión se transportan por procesos advectivos:

$$Q_{S_{SUS_i}} = Vol_{SUS_i} \frac{V \cdot \Delta t}{x}$$



Con el exceso se transporta el material de fondo:

$$CapExc_{ML_i} = Max(0; Q_{S_{EH_i}} - Q_{S_{SUS_i}})$$

Volumen de sedimentos que se transporta como material de fondo:

$$Q_{S_{ML_i}} = Min\left(CapExc_{ML_i}; Vol_{ML_i} \frac{V \cdot \Delta t}{x}\right)$$

En los canales no se permite la erosión, de esta forma la capacidad de transporte remanente no se utiliza

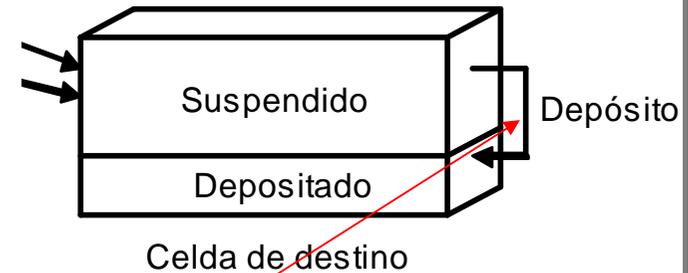
El depósito de sedimentos (laderas y cauces)

Concepto de reposo de sedimentos. Velocidad de sedimentación (Julien, 1998):

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3}(G_s - 1) \frac{g \cdot d_s}{C_D}} \quad C_D: \text{coeficiente de arrastre, datos experimentales} \quad C_D = \frac{24 \cdot v_m}{V_s \cdot d_s} + 1.5$$

$$V_s = \frac{8 \cdot v_m}{d_s} \left[(1 + 0.0139 \cdot d_*^3)^{0.5} - 1 \right] \quad d_*: \text{diámetro adimensional} \quad d_* = d_s \left[\frac{(G_s - 1)g}{v_m^2} \right]^{1/3}$$

Tamaño	d_s (mm)	V_s (m/s)
Arena	0.35	0.036
Limo	0.016	2.20E-04
Arcilla	0.001	8.60E-07



Sedimentos que se depositan:

$$Dep_{Por_i} = \begin{cases} V_{s_i} \frac{\Delta t}{h} \dots si \dots h > V_{s_i} \cdot \Delta t \\ 1 \dots \dots \dots si \dots h \leq V_{s_i} \cdot \Delta t \end{cases}$$

Los parámetros y las condiciones iniciales

Parámetros hidrológicos:

- Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo, Hu
- Conductividad hidráulica saturada del suelo, Ks
- Conductividad hidráulica saturada del sustrato del suelo, Kp

Parámetros geomorfológicos:

- Área umbral para el flujo subsuperficial
- Área umbral para el flujo base
- Parámetros para la propagación del flujo

Parámetros sedimentológicos:

- La textura del nivel superior del suelo
- Los factores K, C y P de la USLE

Condiciones iniciales:

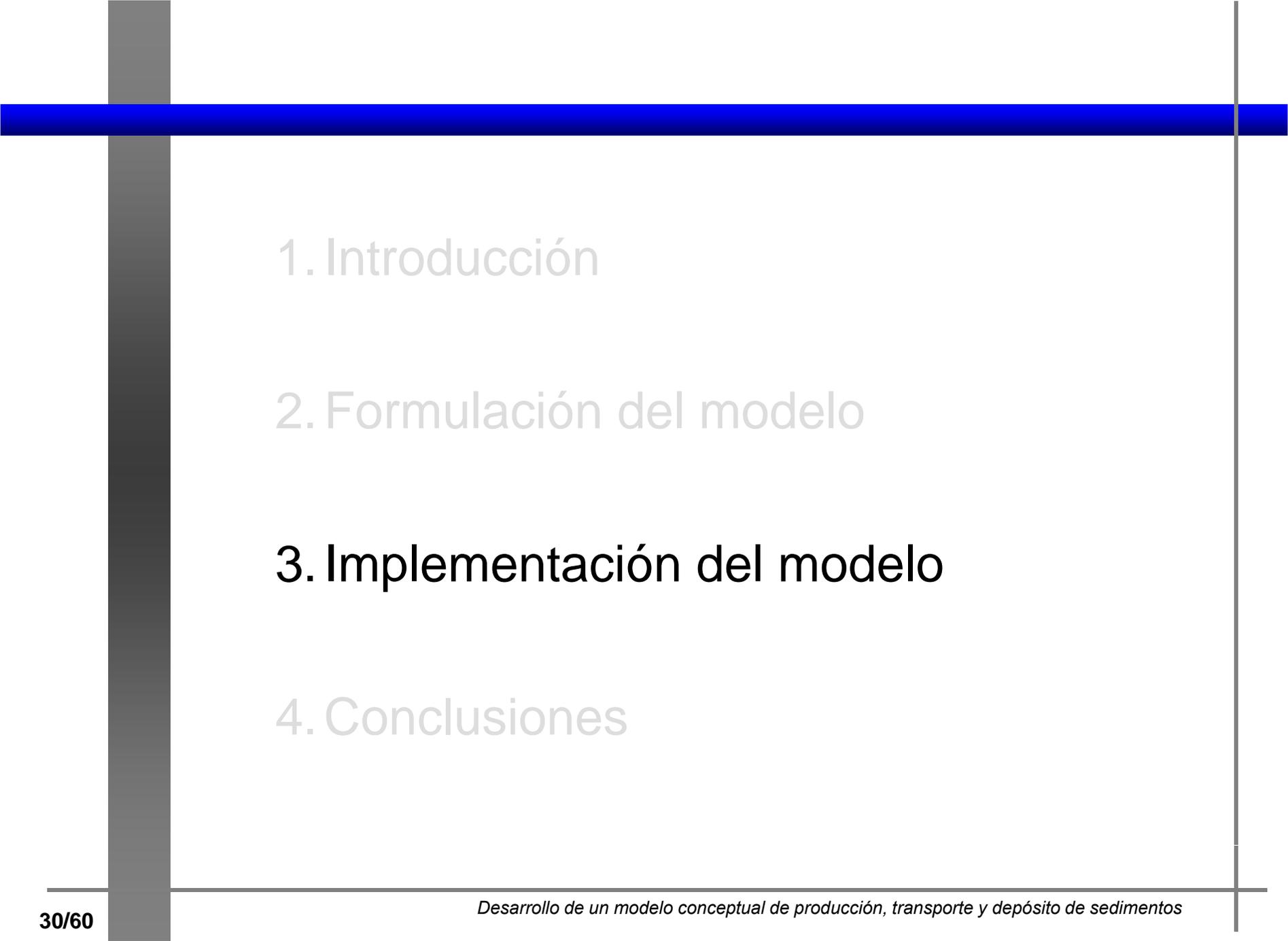
- Niveles en los tanques
- Caudal en canales
- Volumen de sedimentos depositados

La estructura de parámetros hidrológicos

Dividida en dos niveles (Francés *et al.*, 2007):

- Las características hidrológicas: con sentido físico, dan cuenta de la variabilidad espacial. Para cada celda se estima un valor.
- Los factores correctores de calibración: errores en el modelo, efectos de escala y errores en la estimación de parámetros. Son comunes para una región.

Parámetro para cada celda	Descomposición
Capacidad de almacenamiento hídrico	$H_u^* = R_1 H_u$
Índice de cobertura de vegetación, por mes (m)	$\lambda^*(m) = R_2 \lambda(m), m = 1, \dots, 12$
Capacidad de infiltración	$K_s^* = R_3 K_s$
Velocidad del flujo superficial	$v^* = R_4 v$
Capacidad de percolación	$K_p^* = R_5 K_p$
Velocidad del flujo subsuperficial	$K_{ss}^* = R_6 K_{ss}$
Capacidad de percolación profunda	$K_{pp}^* = R_7 K_{pp}$
Velocidad del flujo base	$K_b^* = R_8 K_p$
Velocidad del flujo en canal en el tiempo t	$v^*(t) = R_9 v(t)$



1. Introducción

2. Formulación del modelo

3. Implementación del modelo

4. Conclusiones

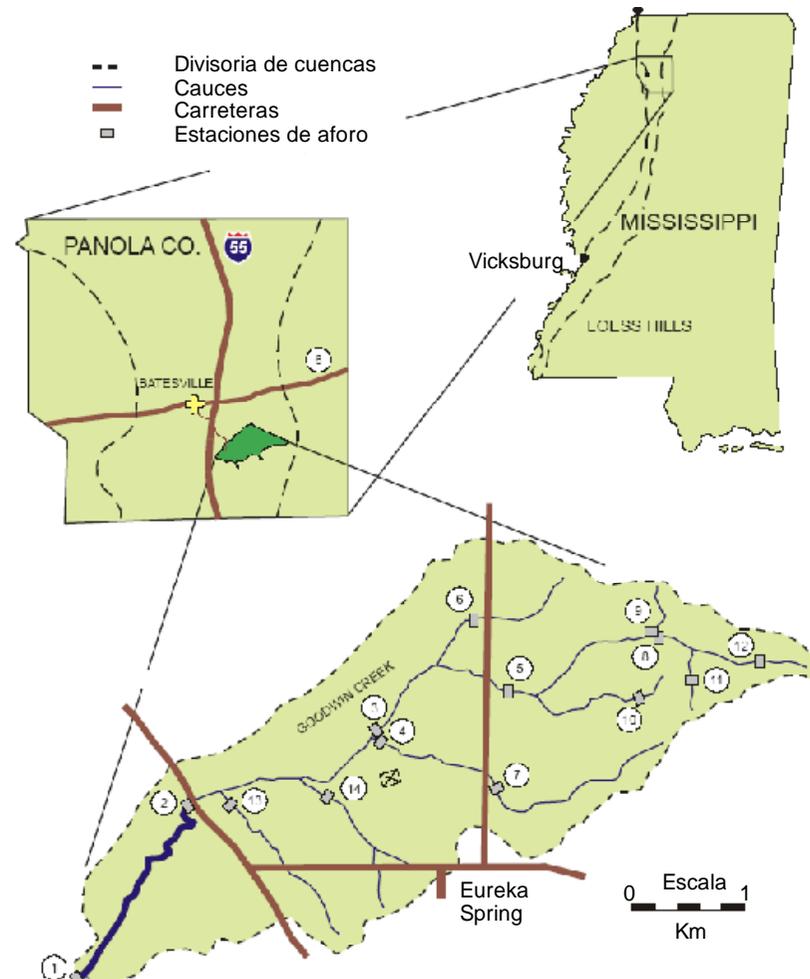
La cuenca de Goodwin Creek

Operada desde 1981 por el NSL del ARS del USDA.
<http://ars.usda.gov>.

Clima húmedo, con veranos cálidos e inviernos suaves. Temperatura media anual de 17°C y precipitación media anual de 1400 mm.

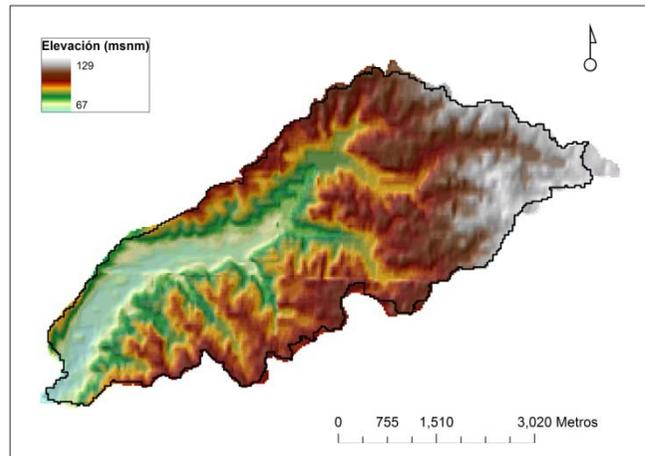
Cubierta por loess (limos transportados y depositados por el viento). Relativamente impermeables.

Área de la cuenca : 20.5 km²

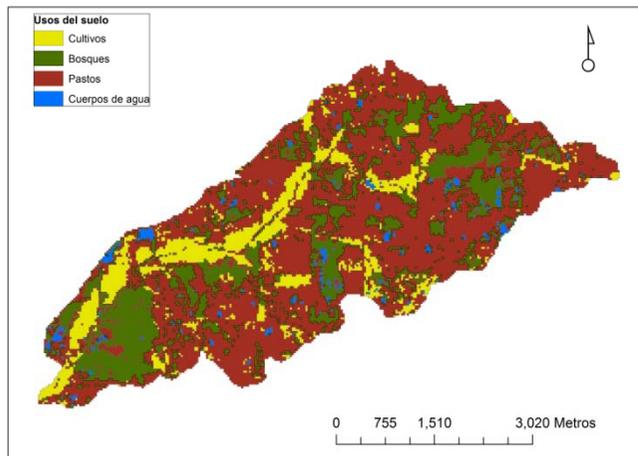
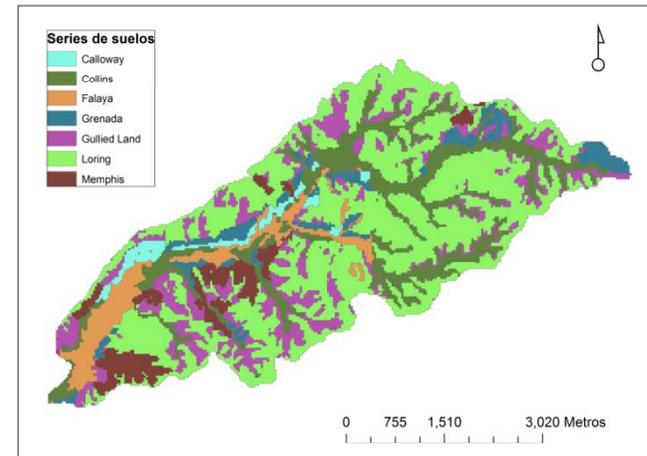


Información básica

Topografía



Edafología

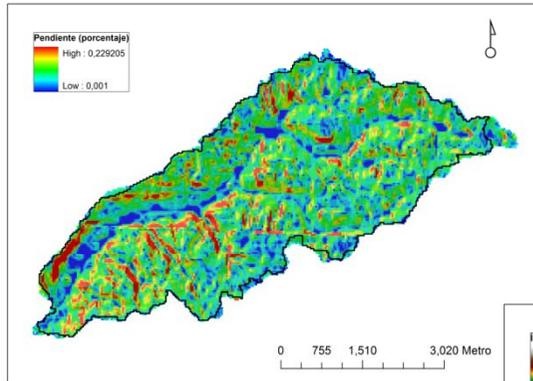


Usos del suelo

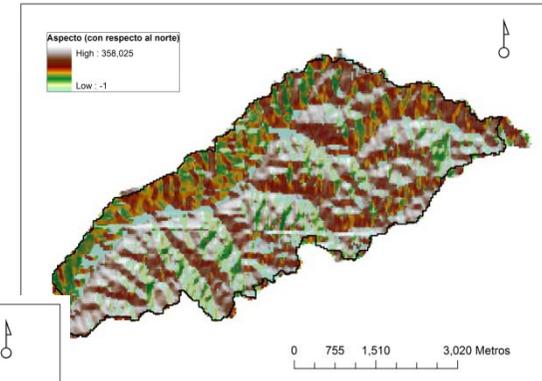
Información derivada del DEM

Implementación del modelo

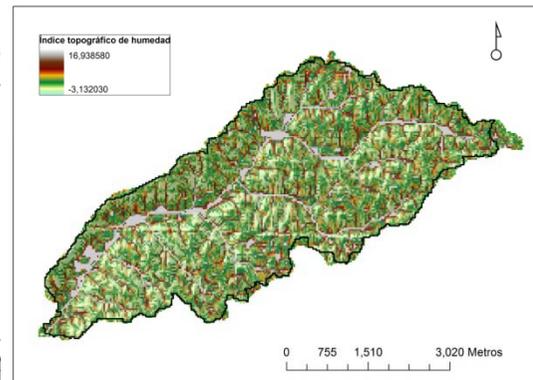
Pendientes



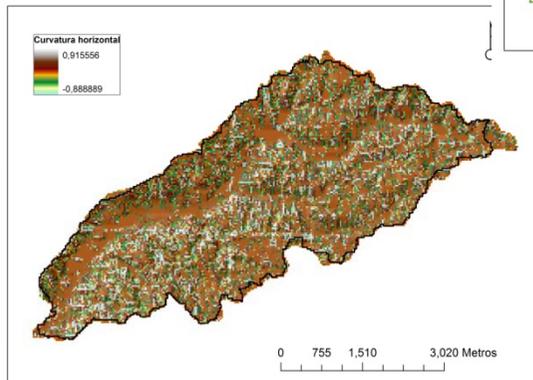
Aspecto



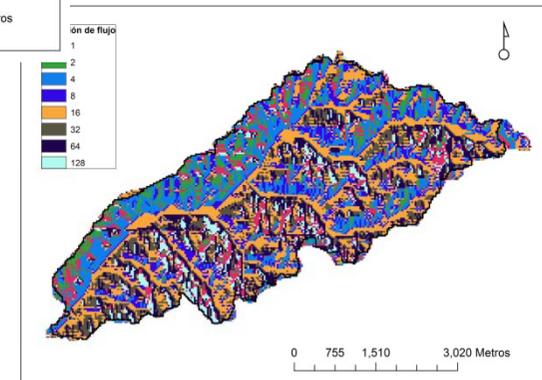
Índice topográfico



Curvatura horizontal



Dirección de flujo



La variabilidad espacial de los parámetros

Dos tendencias (Puricelli, 2003):

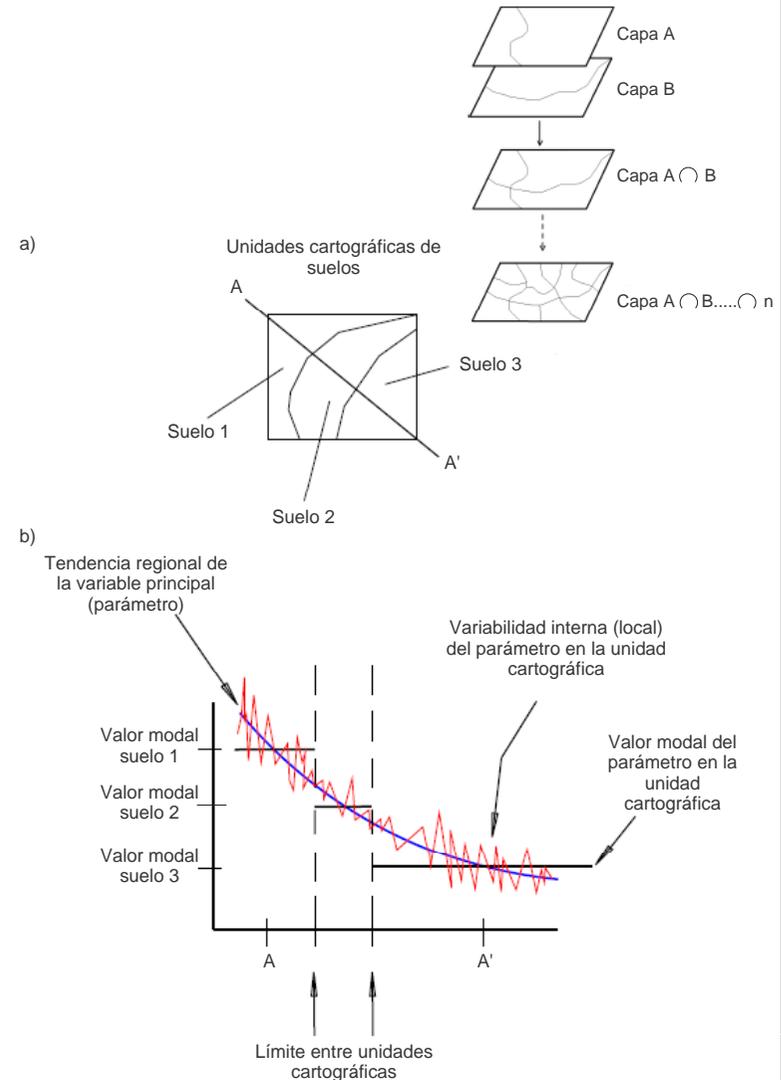
- Regional, definida por unidades cartográficas. Valor (modal) estimado de acuerdo a los perfiles de suelos y al uso del suelo.
- Local, definida por la posición topográfica relativa de cada celda y de otras variables ambientales en cada UC. Mediante regresión:

$$y_c = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{cj}$$

Forzando el valor modal en cada UC

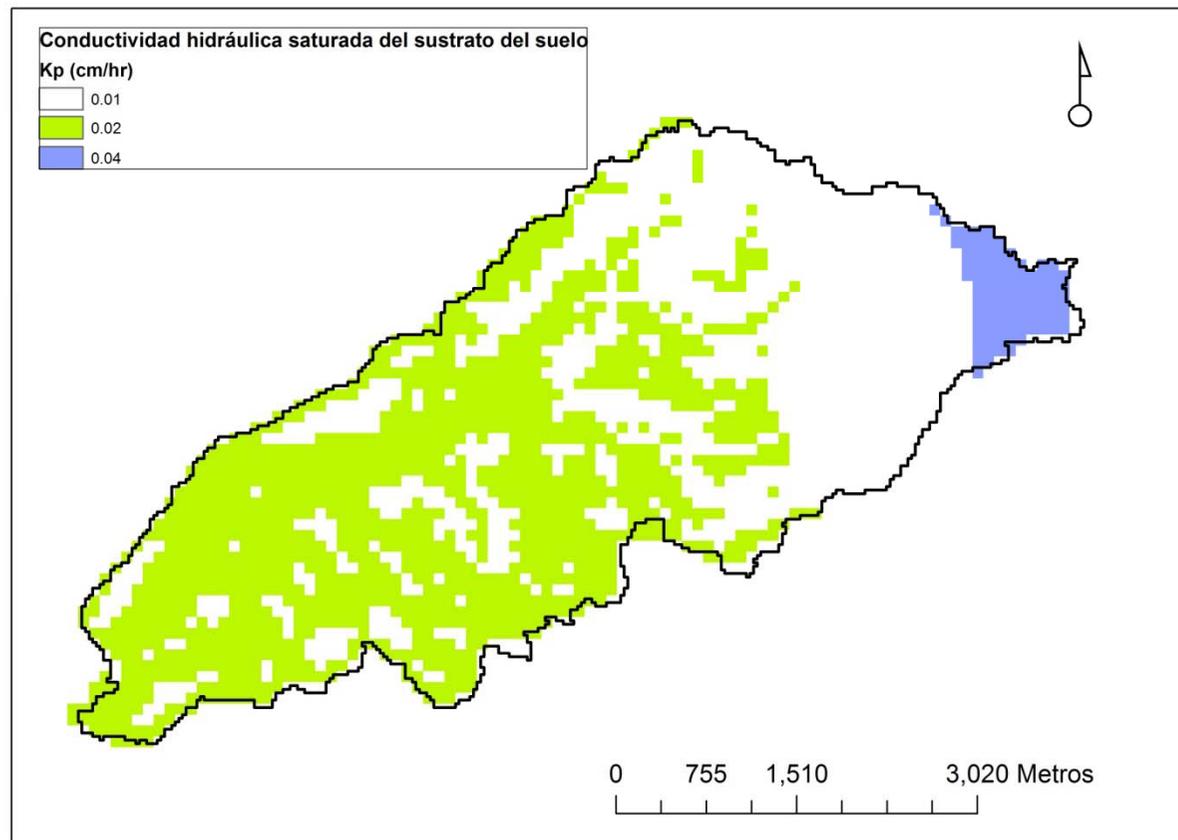
Función objetivo a minimizar:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i \left(y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right)$$



Estimación de parámetros

Flujo subterráneo irrelevante. Conductividad hidráulica saturada del sustrato del suelo no es importante. No es necesario efectuar análisis de variabilidad espacial (valores modales)

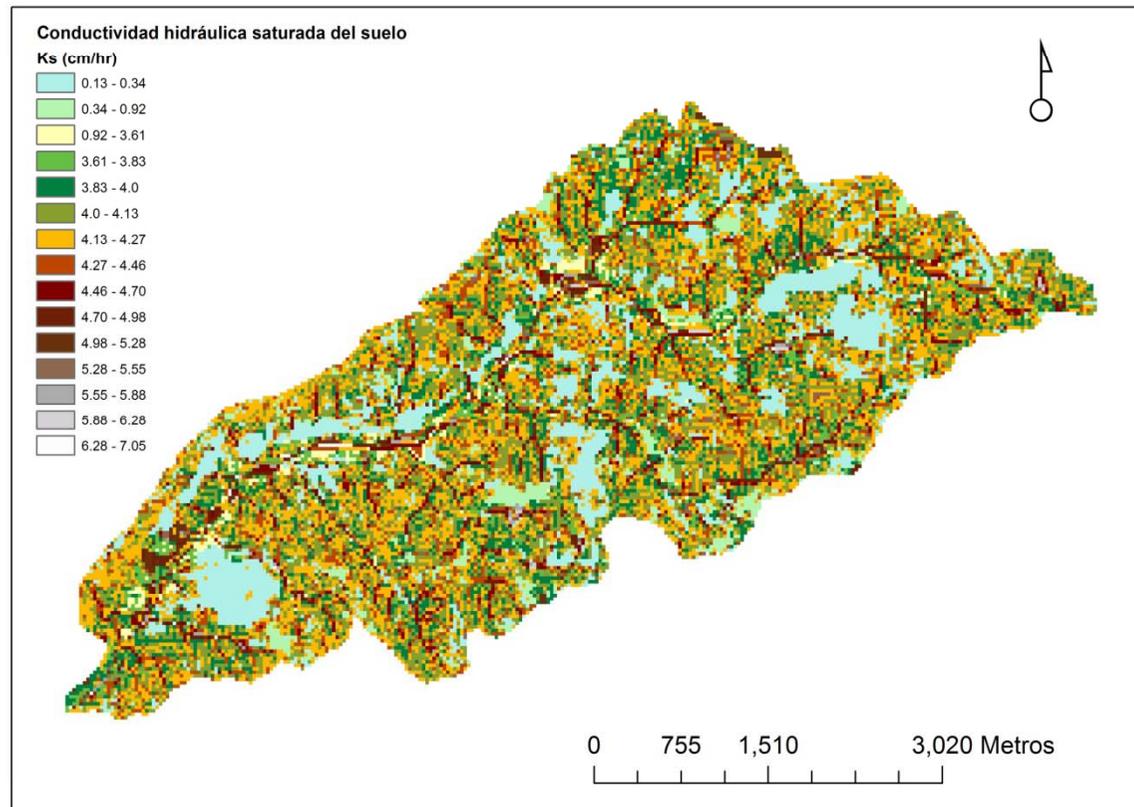


Estimación de parámetros

Modelo de regresión para el logaritmo natural de Ks:

$$\ln Ks = 0.6524 - 0.689 \cdot IT_{nor} + 0.4137 \cdot CURVA_{nor}$$

R- Cuadrado: 74.7%. P-valor 0.01

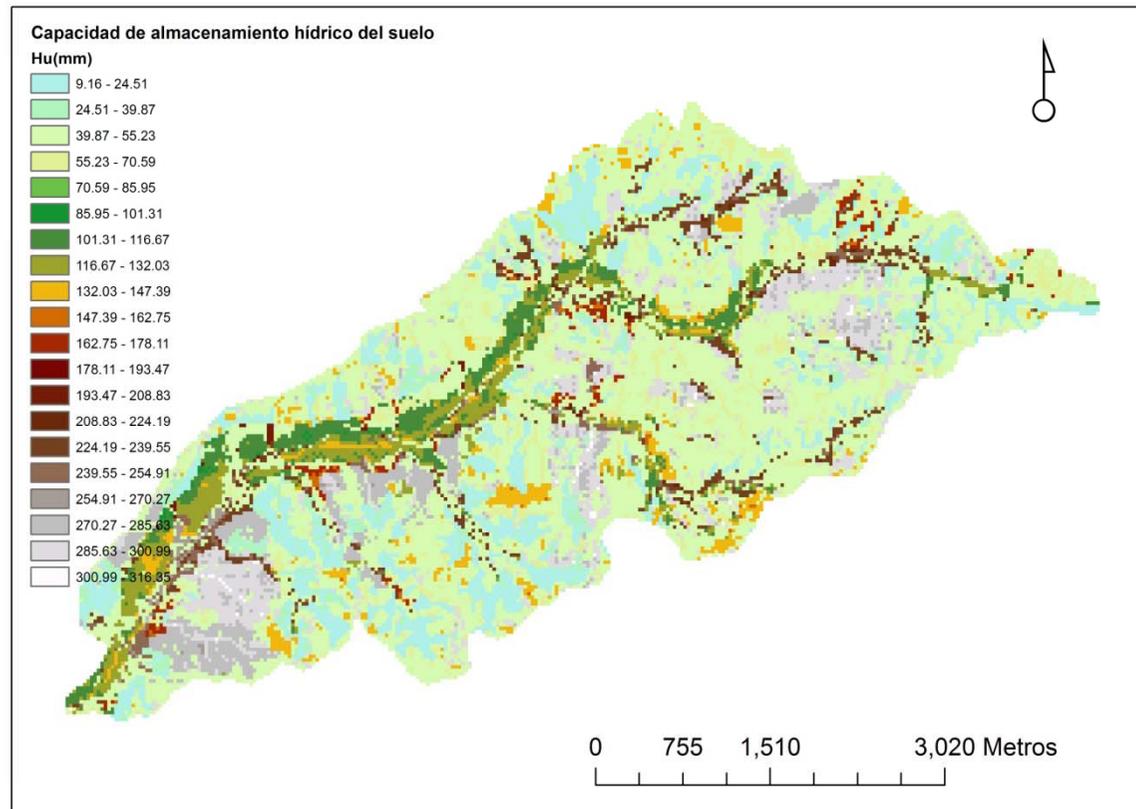


Estimación de parámetros

Modelo de regresión para la raíz cuadrada de H_u :

$$\sqrt{H_u} = 9.2788 + 1.3895 \cdot IT_{nor} - 0.8966 \cdot CURVA_{nor}$$

R- Cuadrado: 24%. P-valor 0.01

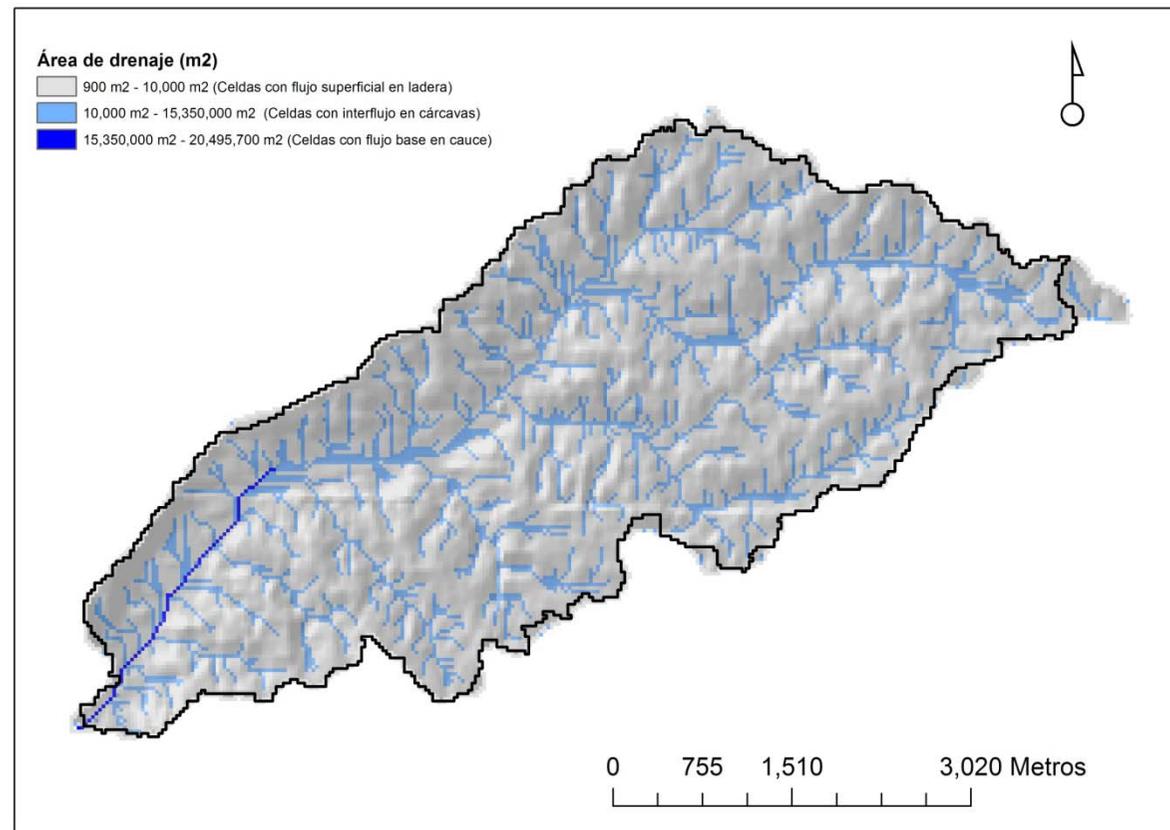


Estimación de parámetros

Área umbral para el flujo subsuperficial: 0.01 km².

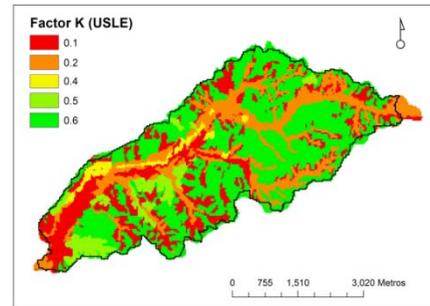
Área umbral para el flujo base: 15.35 km².

Parámetros geomorfológicos, Molnár y Ramírez (1998)

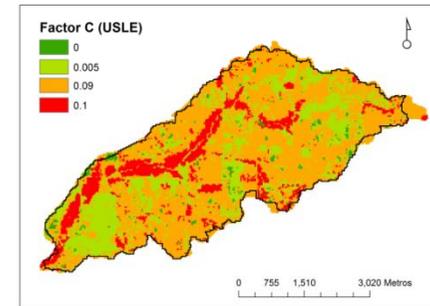


Estimación de parámetros

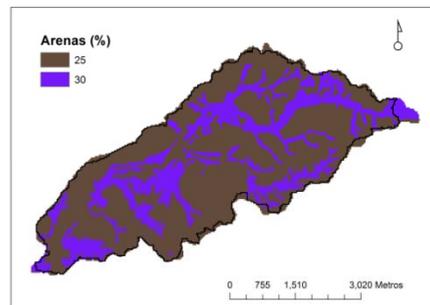
- Textura del nivel superior del suelo, Blackmarr (1995).
- Factores de la USLE, Rojas (2002).



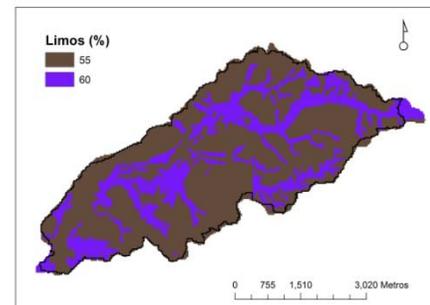
Factor K



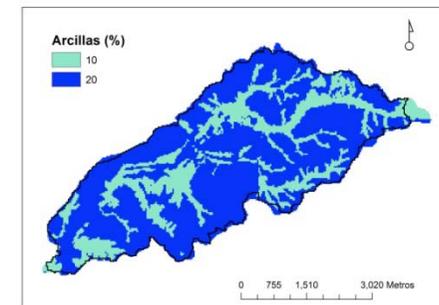
Factor C



Arenas (%)



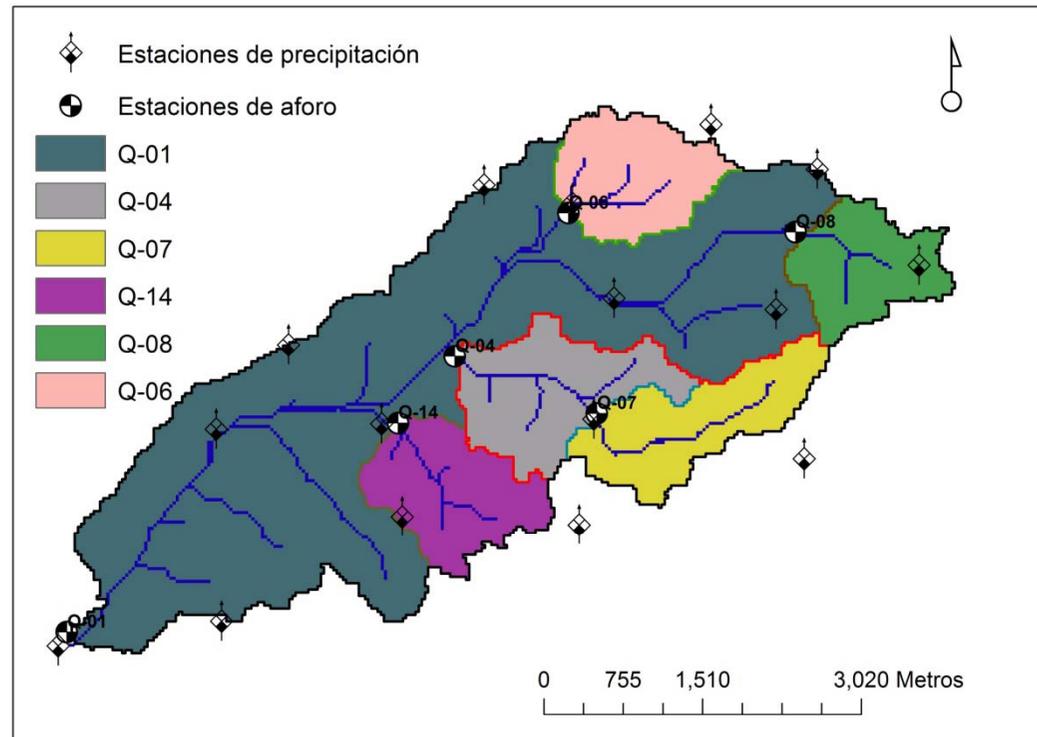
Limos (%)



Arcillas (%)

Calibración y validación

- Datos de lluvia de 16 estaciones, resolución temporal de 5 minutos.
- Celdas de 30 metros de lado (900 m² de área).
- 6 estaciones de aforo (líquido y sólido). Áreas de captación entre 1.30 km² y 20.48 km².



Calibración y validación

Se calibran automáticamente los factores correctores del modelo hidrológico, *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA)*.

Necesario un análisis de sensibilidad anterior.

Función objetivo: *RMSE*.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (Q_{t,obs} - Q_{t,sim})^2}{T}}$$

Criterios de evaluación: índice de Nash y Sutcliffe (*E*) y error en el balance (*BE*).

$$E = 1 - \sum_{t=1}^T \frac{(Q_{t,sim} - Q_{t,obs})^2}{(Q_{t,obs} - Q_{med})^2} \quad BE = 100 \times \frac{V_{sim} - V_{obs}}{V_{obs}}$$

EN LA PARTE SEDIMENTOLÓGICA SE CALIBRA EL FACTOR CORRECTOR DE LA ECUACIÓN DE KILINC Y RICHARDSON (VOLUMEN TOTAL DE SEDIMENTOS DURANTE EL EVENTO)

Evento de calibración

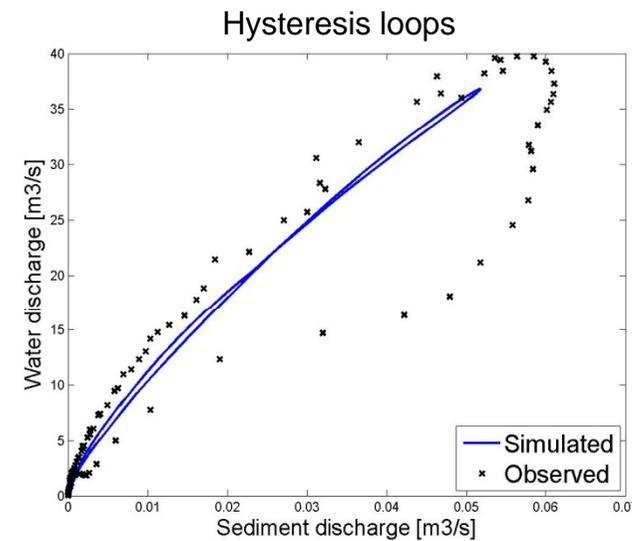
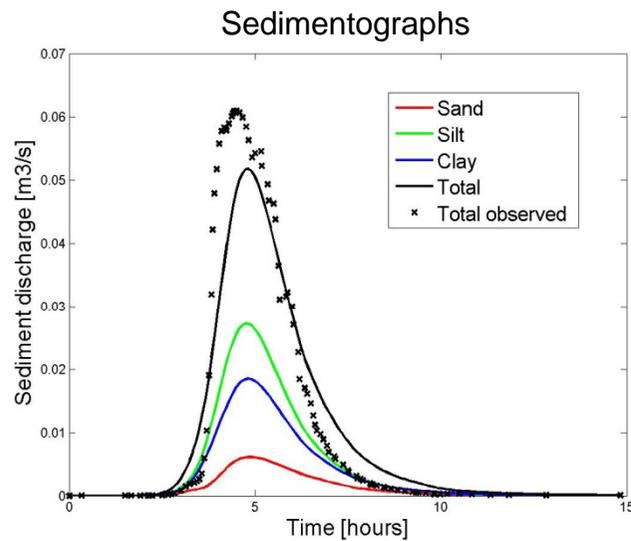
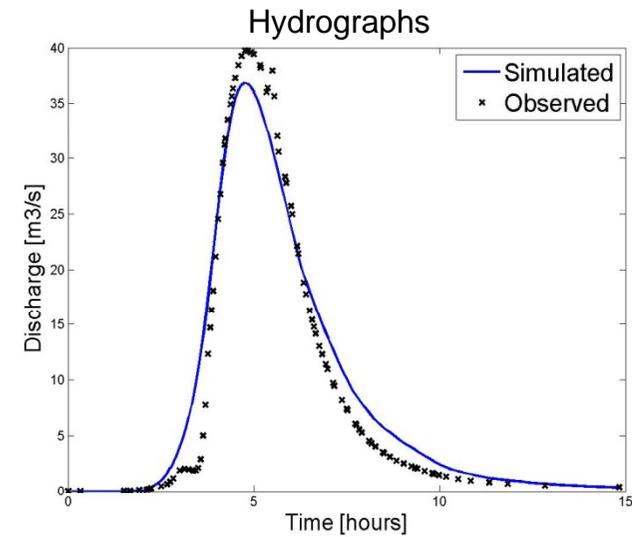
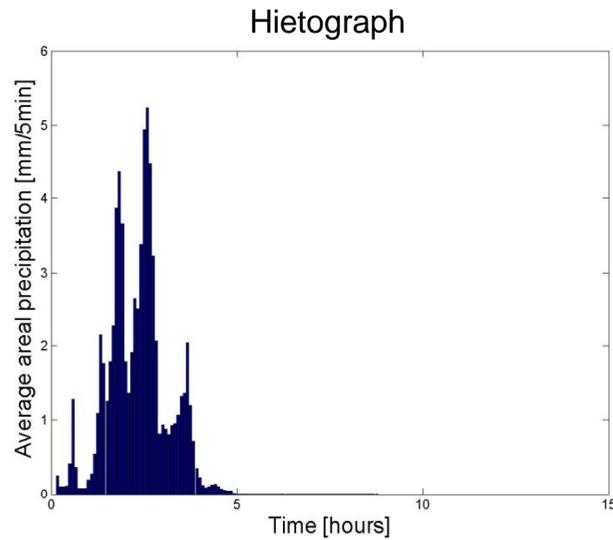
17 de octubre de 1981. Principios de otoño, luego de un verano seco y cálido.

Factor corrector	Límites		Valor inicial	Resultado calibración
	Inferior	Superior		
R1, Almacenamiento estático	0.1	1.5	0.5	0.207
R3, Infiltración	0.00001	1.0	0.1	0.00103
R4, Velocidad de flujo en ladera	0.1	1.5	0.5	0.11267
R5, Percolación	0.1	1.0	0.5	0.3954
R6, Velocidad del flujo subsuperficial	1.0	1000.0	100.0	53.989
R9, Velocidad del flujo en canales	0.1	0.8	0.4	0.3126
Factor corrector para la erosión en ladera (ecuación de Kilinc y Richardson)				76000

	Observado	Simulado	Error [%]
Caudal máximo [m ³ /s]	39.764	36.86	-7.303
Tiempo al pico [horas]	4.83	4.75	-1.656
Volumen de agua [Hm ³]	0.395	0.431	9.114
Índice de Nash	0.9645	RMSE	2.244

	Observado	Simulado	Error [%]
Volumen de sedimentos [m ³]	485.26	485.56	0.122

Evento de calibración



Validación temporal

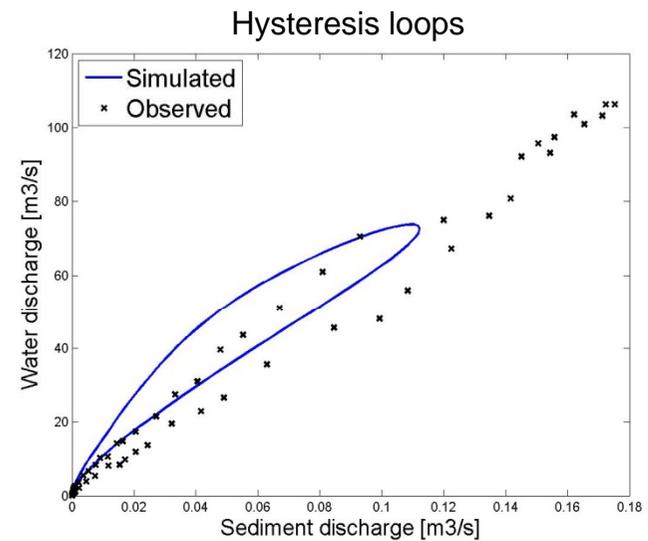
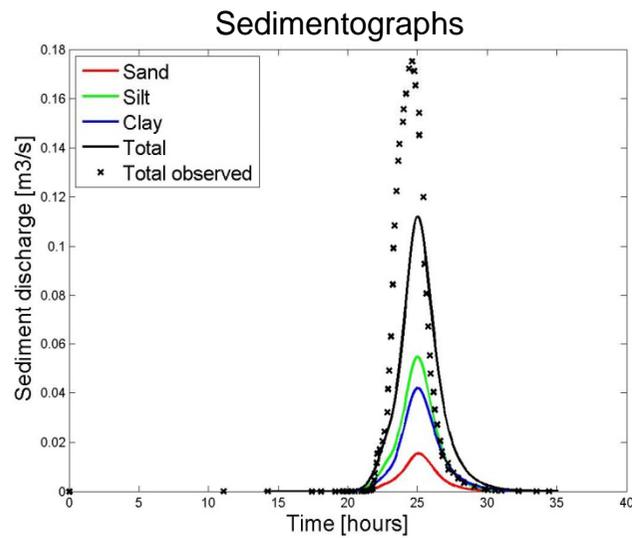
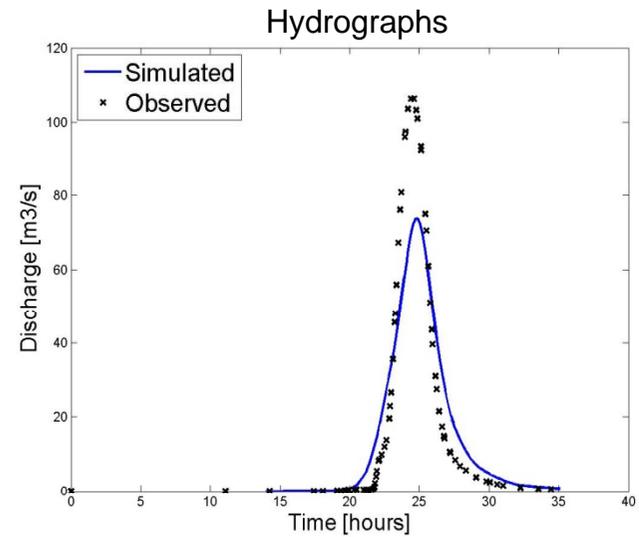
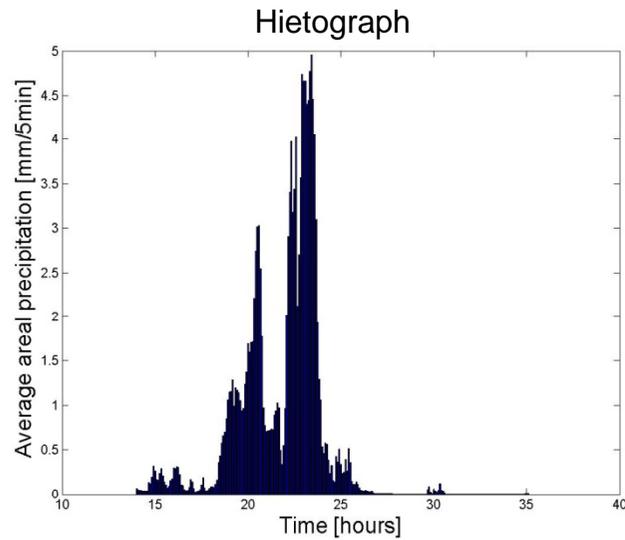
Evento de validación 2 ocurrido el 20 de septiembre de 1983. Dos veces la lluvia del evento de calibración y muy poca precipitación antecedente.

Estado de humedad inicial	Límites		Valor inicial	Resultado calibración
	Inferior	Superior		
H1, Almacenamiento estático [%]	0.0	100.0	50.0	0.0036
H5, Cauce a sección llena [%]	0.0	100.0	50.0	0.171

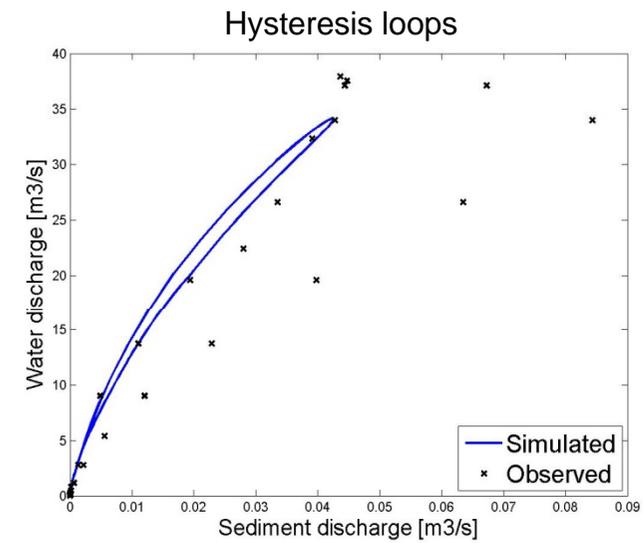
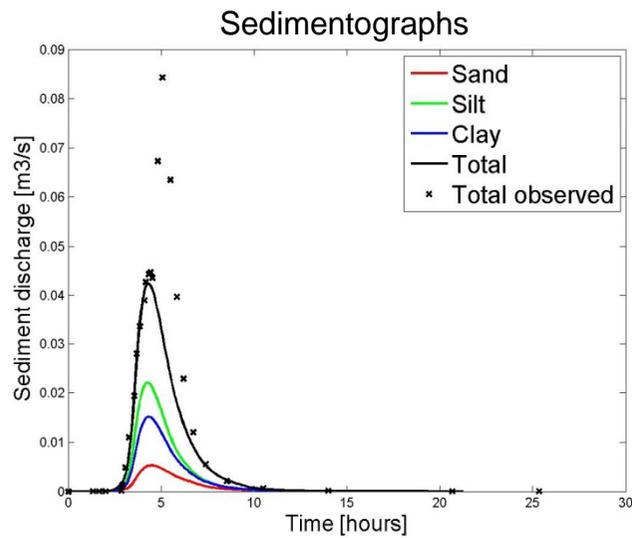
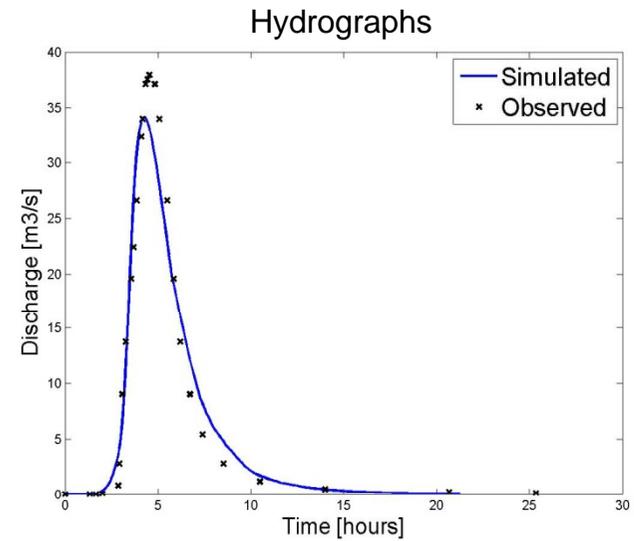
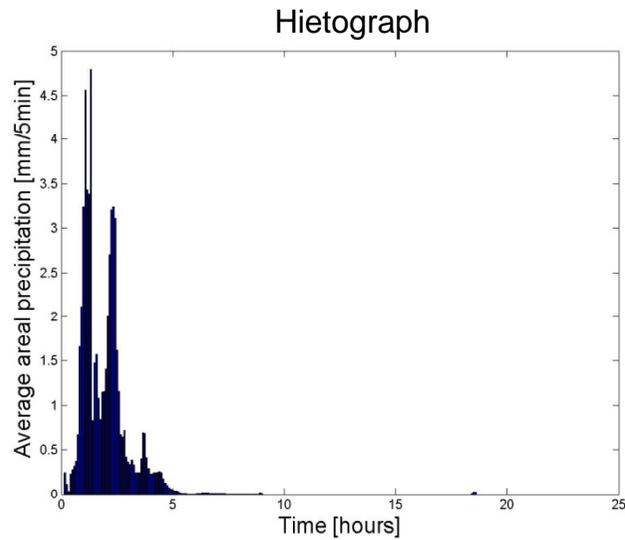
Evento de validación 3 ocurrido el 28 de agosto de 1982. Lluvia similar a la del evento de calibración y alta precipitación antecedente.

Estado de humedad inicial	Límites		Valor inicial	Resultado calibración
	Inferior	Superior		
H1, Almacenamiento estático [%]	0.0	100.0	50.0	39.2
H2, Agua en superficie [mm]	0.0	20.0	5.0	0.0296
H5, Cauce a sección llena [%]	0.0	100.0	50.0	6.59

Evento de validación temporal 2



Evento de validación temporal 3



Validación temporal

Evento 2	Observado	Simulado	Error [%]
Caudal máximo [m ³ /s]	106.353	73.762	-30.644
Tiempo al pico [horas]	25.08	24.83	-0.997
Volumen de agua [Hm ³]	1.075	1.053	-2.047
Índice de Nash	0.8327	RMSE	9.476

Evento 2	Observado	Simulado	Error [%]
Volumen de sedimentos [m ³]	1611.58	1239.84	-23.067

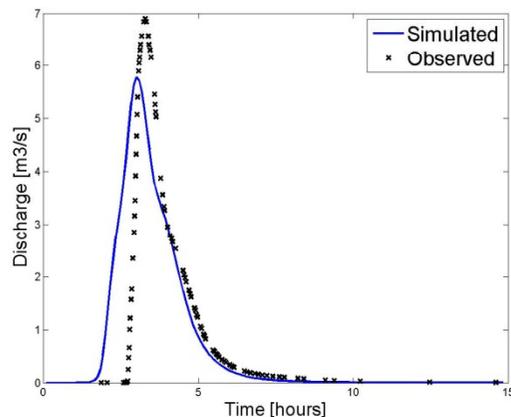
Evento 3	Observado	Simulado	Error [%]
Caudal máximo [m ³ /s]	37.829	34.19	-9.620
Tiempo al pico [horas]	4.58	4.25	-7.205
Volumen de agua [Hm ³]	0.397	0.404	1.763
Índice de Nash	0.9697	RMSE	1.589

Evento 3	Observado	Simulado	Error [%]
Volumen de sedimentos [m ³]	541.61	372.66	-31.194

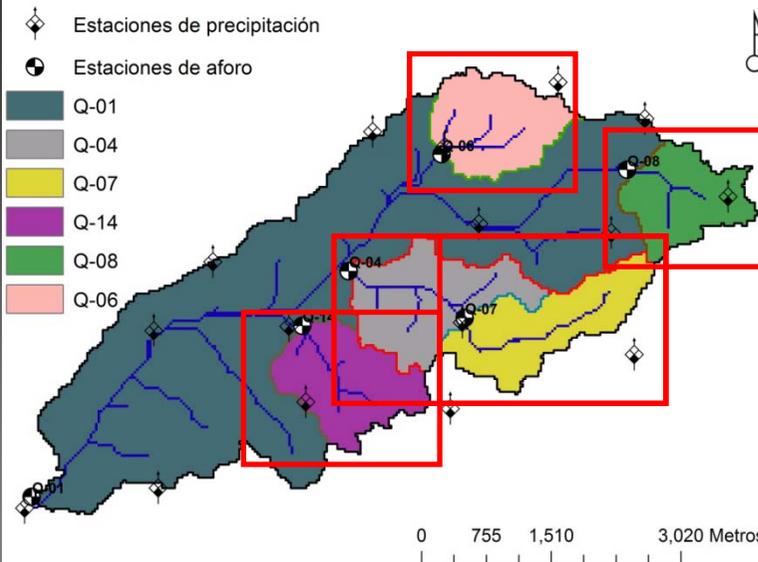
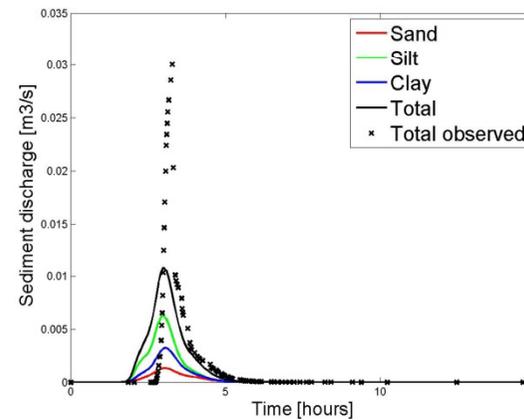
Validación espacial y espacio - temporal

Implementación del modelo

Hydrographs



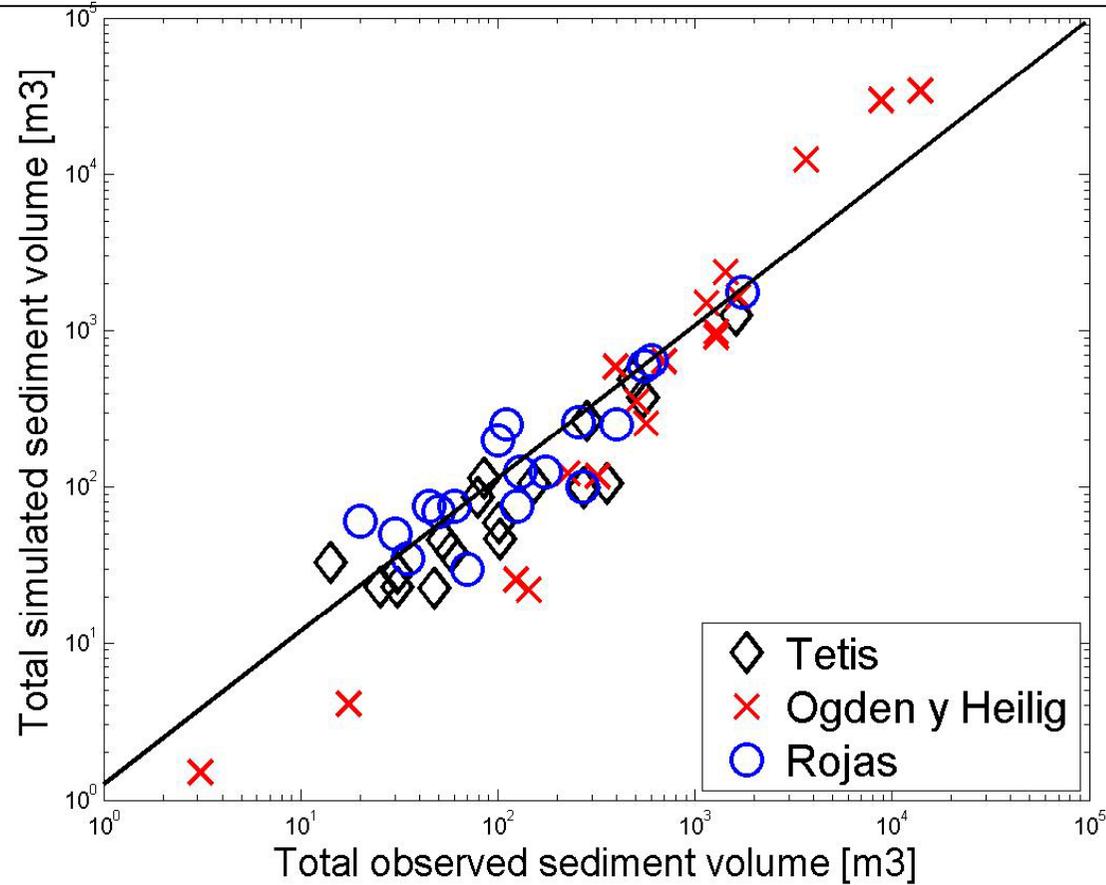
Sedimentographs



Estación Q-14. 1.63 km ² .
Validación espacial
Estación Q-08. 1.55 km ² .
Validación espacio - temporal
Estación Q-06. 1.19 km ² .
Validación espacio - temporal
Estación Q-07. 1.60 km ² .
Validación espacial
Estación Q-04. 3.57 km ² .
Validación espacial

Resultados y análisis

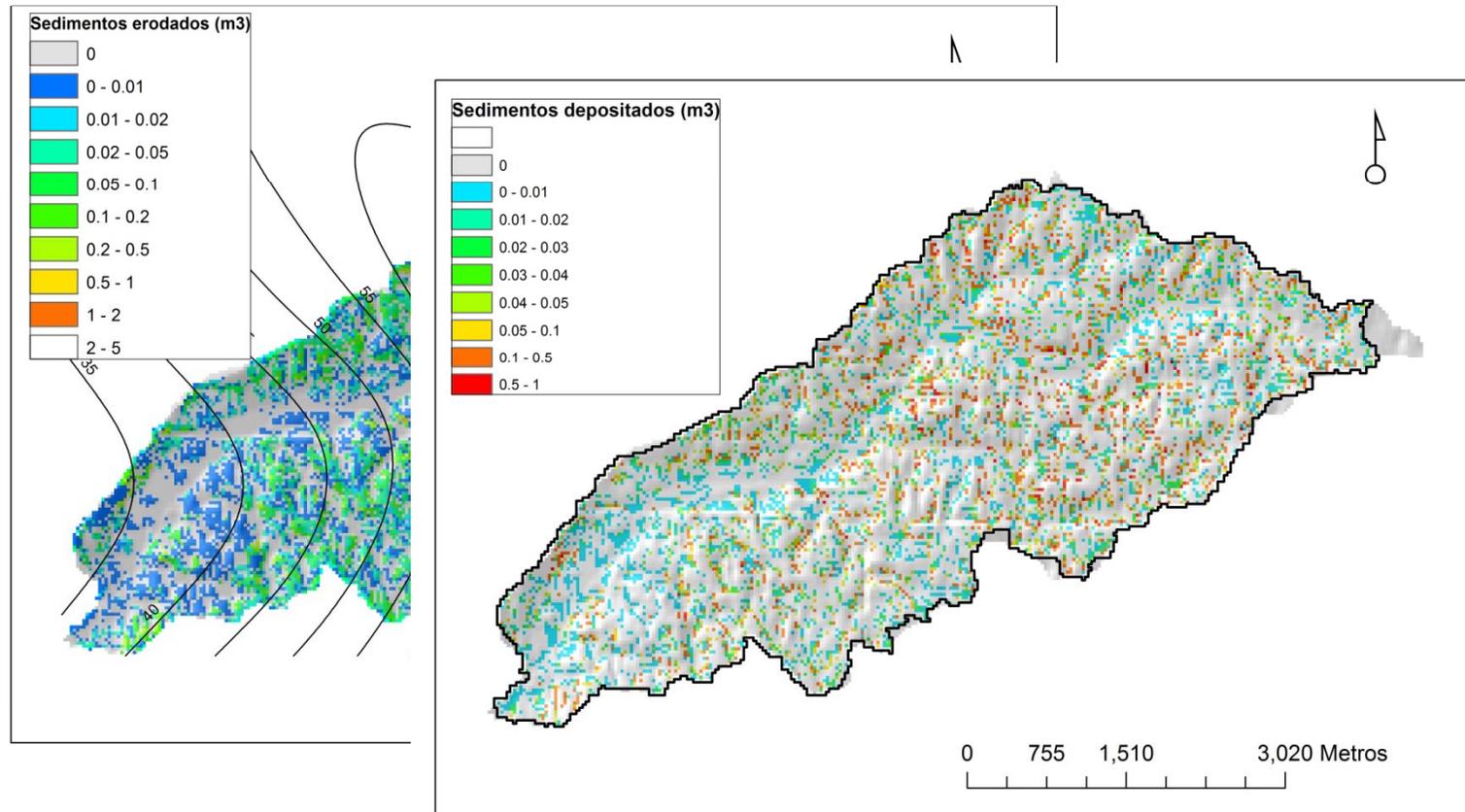
Comportamiento general del modelo. Desempeño sedimentológico



Comparación del desempeño sedimentológico con otras aplicaciones en la cuenca

Resultados y análisis

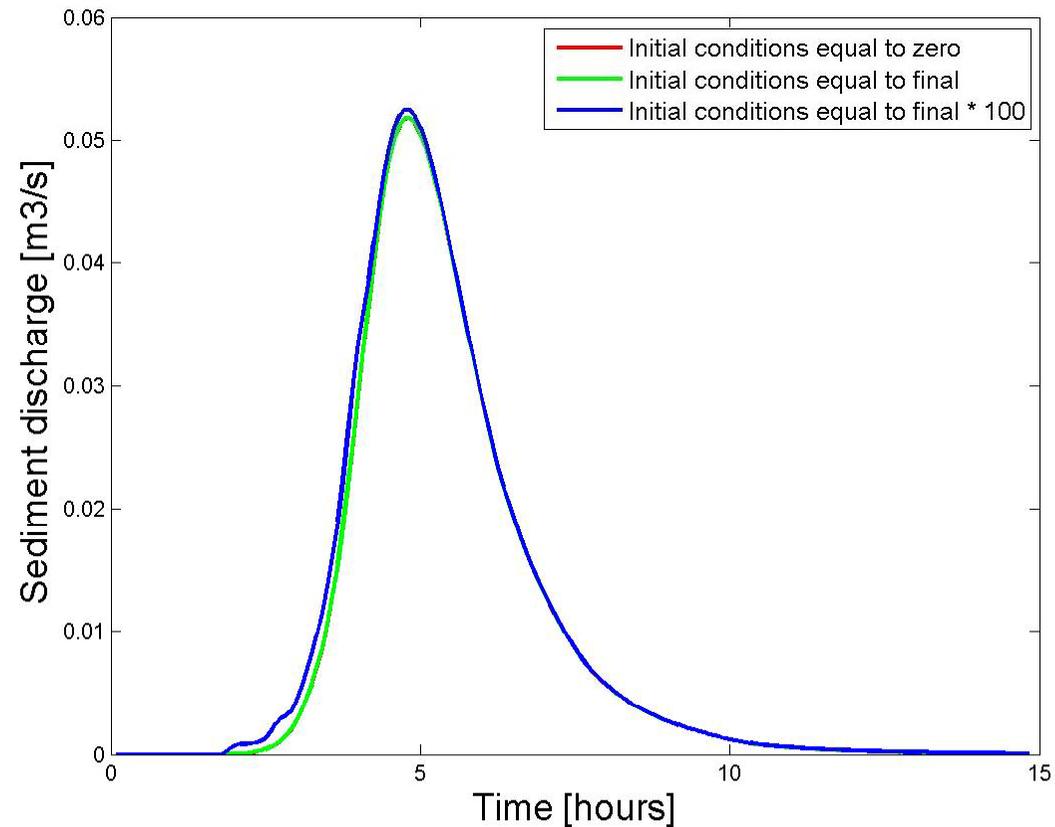
Las áreas fuentes y los sumideros de sedimentos



Evento de validación 3

Resultados y análisis

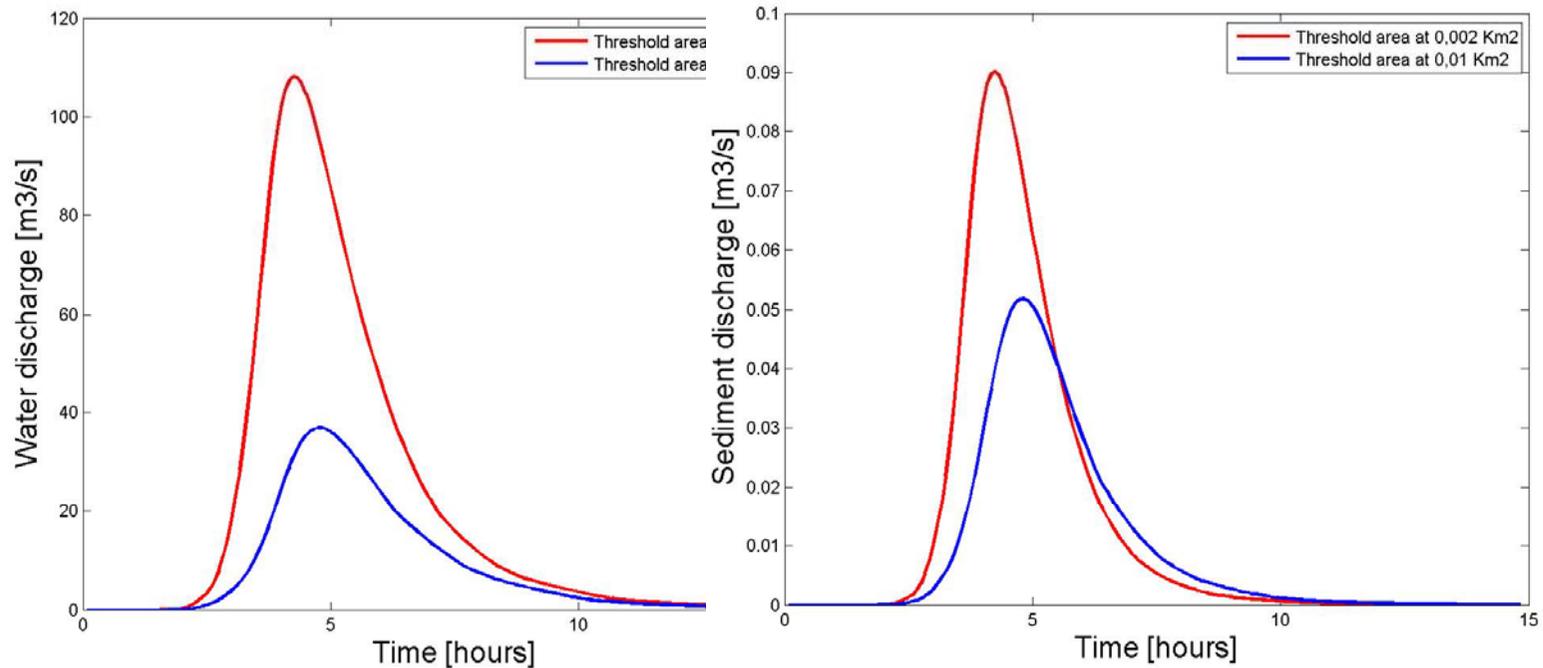
Las condiciones iniciales de sedimentos
Evento de calibración en la estación Q-01



El modelo en G-C no es sensible a las condiciones iniciales de sedimentos depositados

Resultados y análisis

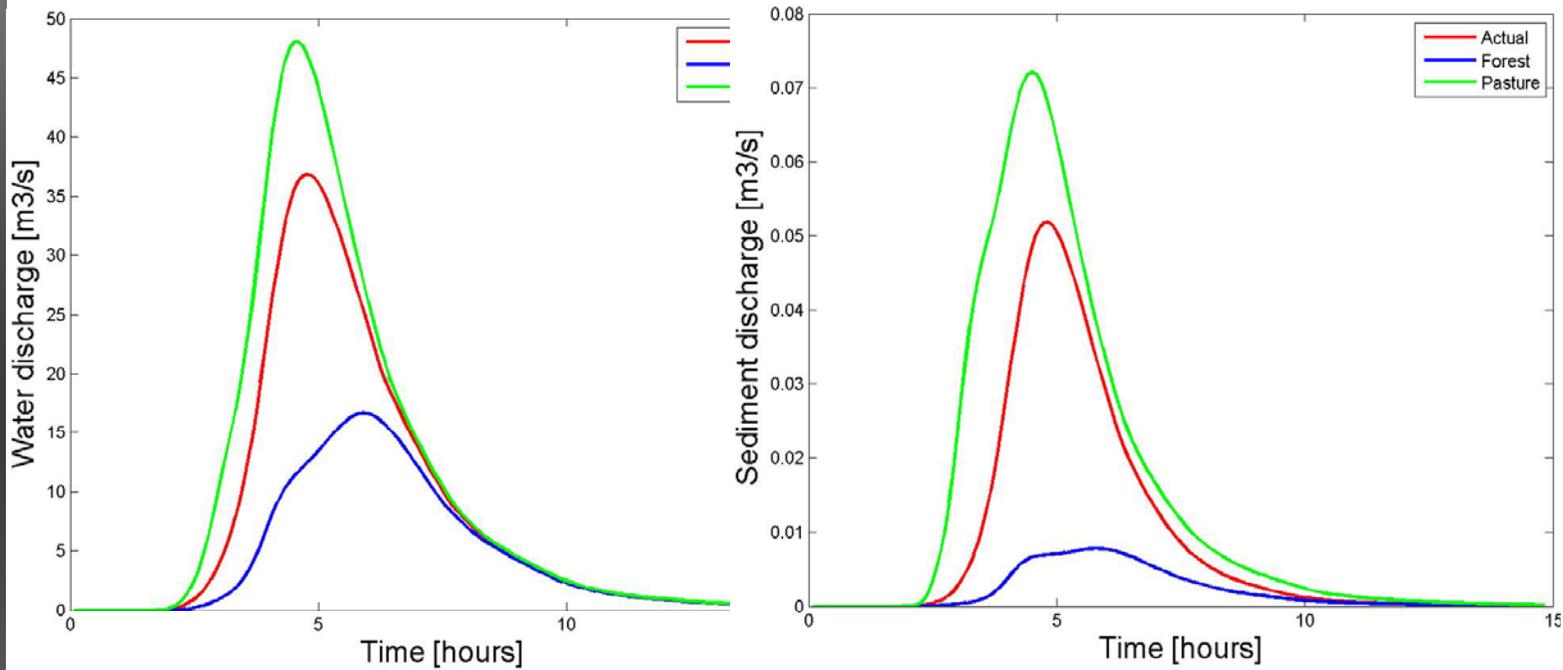
Las áreas umbrales
Evento de calibración en la estación Q-01



El modelo en G-C es altamente sensible a las áreas umbrales. Al disminuir el área umbral para el flujo subsuperficial, disminuye tanto la erosión como el depósito de sedimentos.

Resultados y análisis

Análisis de cambios ambientales. Evento de calibración en la estación Q-01



Escenario	Actual	Pastos	Bosques
Caudal máximo [m ³ /s]	36.86	48.07	16.71
Volumen de agua [Hm ³]	0.431	0.541	0.242
Sedimentos erosionados [m ³]	1257.14	3280.82	351.56
Sedimentos depositados [m ³]	770.97	2501.90	242.73
Sedimentos producidos [m ³]	485.85	777.67	108.83



1. Introducción

2. Formulación del modelo

3. Implementación del modelo

4. Conclusiones

Conclusiones de la formulación del modelo

Conclusiones

- La mejor estrategia para acercarse a la dinámica sedimentológica de una cuenca pasa por simular adecuadamente la dinámica hidrológica.
- Los procesos hidrológicos que tienen más relevancia en cuanto a la dinámica sedimentológica son los flujos superficiales y los flujos subsuperficiales de agua en los primeros niveles del suelo.
- Una formulación coherente y que tenga en cuenta todos los aspectos del modelo garantiza su aplicación en diferentes ambientes.
- Debido a la gran cantidad de parámetros que es necesario estimar y a la alta incertidumbre de estos parámetros, se justifica utilizar modelos simples con pocos parámetros.
- La utilización de la ecuación de Kilinc y Richardson, modificada por Julien (1998) y la ecuación de Engelund y Hansen son adecuadas para un modelo de erosión a escala de cuenca.
- El único elemento de calibración necesario para el submodelo sedimentológico sea el factor corrector de Kilinc y Richardson.
- Modelo robusto y parsimonioso.
- La mejor estrategia para acercarse a la dinámica sedimentológica de una cuenca pasa por simular adecuadamente la dinámica hidrológica.

Conclusiones de la aplicación del modelo

Conclusiones

- Un buen conocimiento de las condiciones físicas de la cuenca de análisis, asegura una adecuada estimación de parámetros. Esta estimación debe reflejar la variabilidad espacial.
- En la aplicación de un nuevo modelo se justifica utilizar una cuenca experimental, en la cual haya disponibilidad de datos para su comprobación.
- El desempeño del modelo es adecuado. Al contrastar los resultados del modelo, con otras aplicaciones se observa que, en general, el modelo simula con buen desempeño.
- Tomando en cuenta la complejidad inherente a las dinámicas hidrológica y sedimentológica, las diferencias entre los resultados del modelo y los datos observados son asumibles.
- El modelo en G-C es poco sensible ante las condiciones iniciales de sedimentos y las diferencias sólo son perceptibles al iniciar el evento.
- El comportamiento del modelo en G-C es altamente sensible al área umbral del flujo subsuperficial.
- De los resultados del modelo se aprende acerca de las dinámicas hidrológica y sedimentológica de la cuenca. Con el programa computacional es posible efectuar análisis cuantitativos de cambios ambientales y antrópicos ante su comportamiento hidrológico y sedimentológico. Aplicabilidad científica y práctica.

Aportes de la tesis

Conclusiones

Aportes del desarrollo del modelo:

El modelo desarrollado y la herramienta computacional obtenida son ya de por sí aportes importantes. El nuevo modelo toma ventaja de las potencialidades de los modelos en que se basa y genera aportes novedosos, como:

- Al determinar de manera precisa en que zonas de la cuenca se presentan las diferentes componentes de la escorrentía y al relacionar dichas zonas con elementos concretos, es posible aplicar las ecuaciones para erosión, transporte y depósito de sedimentos tanto en ladera como en cauces de forma correcta.
- El modelo logra relacionar de forma adecuada el tamaño de la ladera con el tamaño de celda. El modelo relaciona las zonas donde se presenta la escorrentía con elementos concretos. Así el modelo diseñado mejora la forma de conceptualizar una cuenca.
- El modelo aprovecha convenientemente el conocimiento de condiciones físicas (estructura topológica de la red de ríos) y deja de lado aspectos poco entendidos y difíciles de parametrizar (estructura aleatoria de la red de surcos en ladera).
- La inclusión del factor corrector de Kilinc y Richardson para la erosión en ladera es un aporte novedoso.
- Adicionalmente, en la herramienta computacional desarrollada se mejoraron diversos aspectos del modelo TETIS.

Aportes de la tesis

Aportes de la estimación de parámetros:

- Se desarrolló una herramienta computacional destinada a automatizar el proceso de estimación de parámetros. Con esta herramienta es posible determinar mapas de parámetros distribuidos en el espacio (a nivel de celda) sin la necesidad de tener conocimientos avanzados en SIG.
- Anteriormente el proceso final de estimación de parámetros se efectuaba según análisis de regresiones. En esta tesis se utilizaron regresiones pero con restricciones definidas a priori.

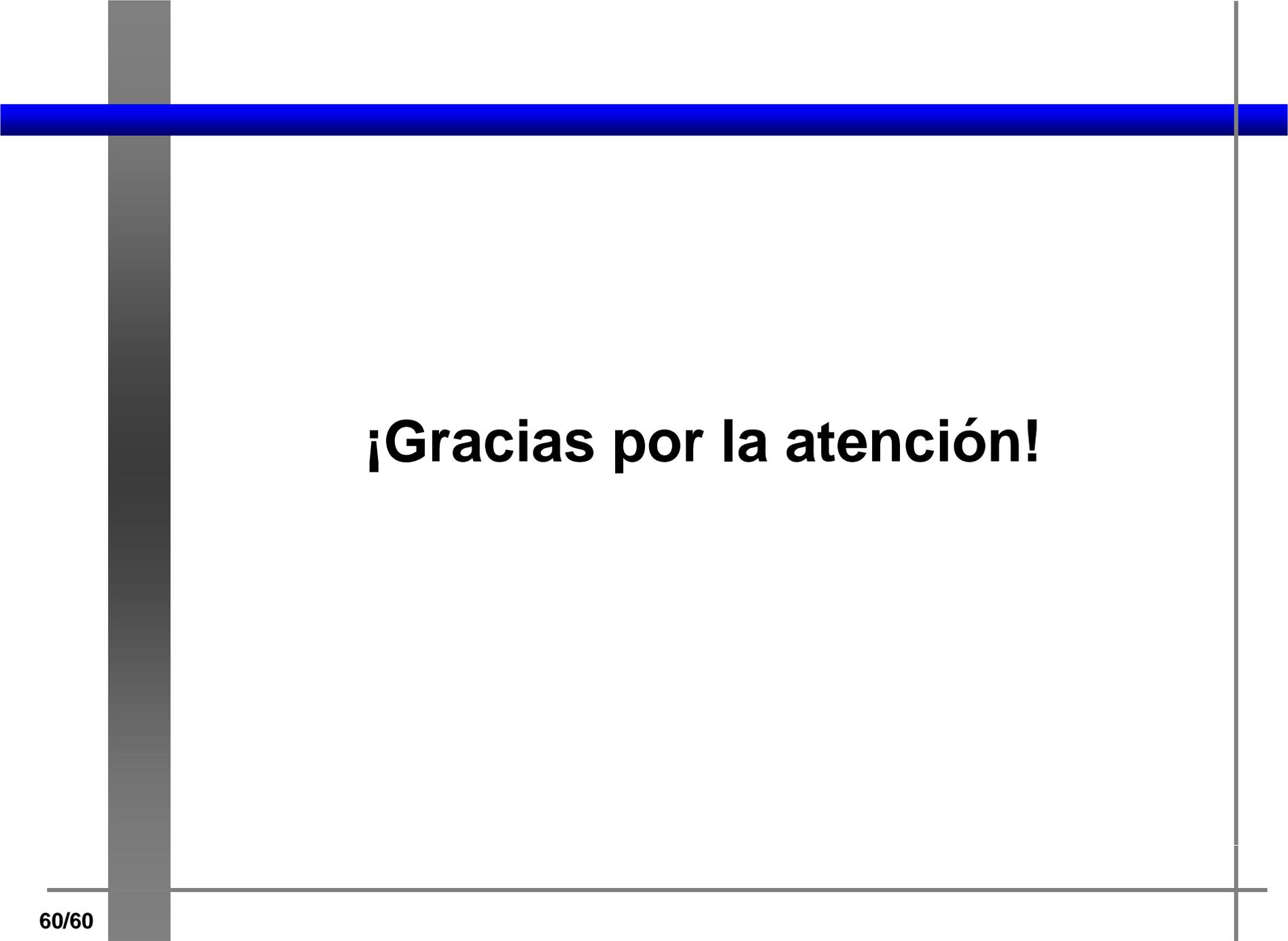
Aportes de la aplicación del modelo:

Un aporte de la tesis deriva en la aplicación en la cuenca de Goodwin Creek. A partir de esta aplicación se logra una mayor comprensión de las dinámicas hidrológicas y sedimentológicas en esta cuenca, como se comprueba con los análisis de sensibilidad ante el tamaño de ladera, el análisis ante diferentes condiciones iniciales de sedimentos y el análisis ante cambios ambientales.

Futuras líneas de investigación

Conclusiones

- El modelo considera áreas umbrales para la definición de los elementos del sistema. En realidad, el inicio y finalización de estos elementos dependen tanto del área como de la pendiente local. De esta forma, es necesario incluir la pendiente y comprobar con observaciones de campo si se mejora en la representación de los elementos.
- El modelo diseñado puede considerarse el corazón de un modelo geomorfológico de evolución del paisaje. Una línea de investigación prominente es la inclusión de procesos de escala temporal amplia y efectuar análisis de evolución del paisaje.
- El modelo en su parte sedimentológica sólo presenta un factor corrector para la erosión en ladera. Una posible mejora en el modelo es la inclusión de un factor corrector para el transporte de sedimentos en cauces, en llanuras de inundación y remansos de los cauces.
- El modelo no considera fuentes puntuales de sedimentos, tales como movimientos en masa. Una línea de investigación abierta surge de la pregunta de cómo incorporar esta información en el modelo.
- Analizar la relación entre el caudal sólido y los contaminantes que se mueven en dichos sedimentos constituye otra línea de investigación posible.
- El modelo no considera fuentes puntuales de sedimentos, tales como movimientos en masa. Una línea de investigación abierta surge de la pregunta de cómo incorporar esta información en el modelo.
- Analizar la relación entre el caudal sólido y los contaminantes que se mueven en dichos sedimentos constituye otra línea de investigación posible.



¡Gracias por la atención!