

# UN MODELO CONCEPTUAL PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CARGA DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN A PARTIR DE LA ESCORRENTÍA

*López Periago, Eugenio<sup>1</sup>; Soto González, Benedicto<sup>2</sup>; Rubinos González, David<sup>2</sup>  
y Díaz-Fierros Viqueira, Francisco<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Departamento de Biología Vegetal e Ciencias do Solo, Univ. de Vigo. 35004 Ourense*

<sup>2</sup> *Departamento de Edafología Fac. de Farmacia. Univ. de Santiago. 15706 Santiago*

## SUMMARY

### **A conceptual model to estimate suspended solids from runoff**

A model for estimating suspended solids load from streamflow discharge data is proposed. The model was developed on the basis of the Einstein, Peter-Meyer and Muller equations (ROSE *et al.*, 1983 a y b, SHEN and JULIEN, 1992), which calculate bedload particle detachment from fluid shear stress data.

Comparisons of the model predictions were made with suspended solids data. Both suspended sediment load and streamflow discharge records were obtained during a monitoring program in a small agricultural watershed (10,7 ha).

Simulation results appear to be consistent with the observed sediment transport. After fitting the model parameters from measured concentrations of suspended solids, the model simulations showed that the sampling method used in the monitoring period underestimates the total sediment discharge. Finally, usefulness of the model for analysis of sediment discharge on erosion studies in small watersheds is discussed.

**Key words:** Suspended solids, runoff, sediment load model.

## RESUMEN

Se propone un modelo para la estimación de la carga de sólidos en suspensión a partir de datos de escorrentía en avenidas. El modelo se fundamenta en la ecuación de arrastre de partículas de sedimento no cohesionadas de Einstein, Peter-Meyer y Muller empleado por ROSE *et al.* (1983 a y b) y SHEN and JULIEN (1992).

Las predicciones del modelo se han realizado a partir de registros de escorrentía y los resultados de las simulaciones se compararon con los registros de caudales de sólidos en suspensión obtenidos durante el control de una cuenca de uso agrícola de 10,7 ha de superficie.

Las simulaciones efectuadas han resultado ser consistentes con el proceso de arrastre de sedimentos. Después de efectuar los ajustes de los parámetros del modelo a partir de los datos de carga de sedimentos observados, el modelo ha puesto de manifiesto la selectividad del muestreo de los sólidos respecto al tamaño de partícula. Se concluye que el modelo propuesto puede ser útil para realizar análisis de la descarga de sedimentos en estudios de erosión en pequeñas cuencas.

**Palabras clave:** Sólidos en suspensión, escorrentía, modelo de carga de sedimentos.

## INTRODUCCIÓN

Los estudios de erosión hídrica del suelo y transporte de sedimentos están orientados al análisis geográfico de los efectos del manejo y del uso del suelo. La herramienta básica que se utiliza actualmente para analizar estos procesos la constituyen los modelos de erosión y transporte.

Los esfuerzos en el diseño de la mayoría de los modelos de erosión y transporte de sedimentos que se emplean en la estimación y predicción de la pérdida de suelo están dirigidos hacia la obtención de modelos distribuidos. WEPP, CREAMS, ANSWERS son algunos de los modelos de uso mas extendido. Sin embargo, dada su naturaleza, estos modelos requieren una gran cantidad de parámetros de entrada que deben de estar distribuidos geográficamente.

Si bien este tipo de modelos son indispensables para el análisis regional de los problemas de erosión, en determinados casos es conveniente disponer de métodos de cálculo mas sencillos que permitan la estimación de la descarga de sólidos en función de pocas variables y parámetros.

El estudio intensivo de la erosión hídrica en una cuenca experimental, en el cual se dispone de registros continuos de escorrentía y descarga de sólidos en suspensión, es uno de los casos donde un modelo de este tipo puede ser utilizado para el análisis cuantitativo de los procesos de erosión y descarga de sedimentos y efectuar estimaciones de pérdida de suelo globales en una cuenca.

Los modelos no distribuidos de predicción de la carga de sólidos estan limitados a ecuaciones empíricas del transporte de sedimentos en rios (TOFFALETI, 1969) y en cauces pequeños de lecho arenoso (COLBY, 1964), ambas ecuaciones están basadas en la fórmulas de Einstein, Peter-Meyer y Muller (SHEN and JULIEN, 1992). ACKERS y WHITE (1973) describen una aproximación mas general para el transporte de sedimentos en cauces fluviales.

Un modelo analítico para la descripción de la producción y transporte de sedimentos es el descrito por ROSE et al. (1983). Este modelo expresa el flujo de sedimentos con el caudal de escorrentía superficial en una superficie plana en relación con factores que controlan el flujo de sedimentos. Incluye fórmulas para el cálculo de la disgregación por la energía de la lluvia, deposición de sedimentos y el aumento de concentración de sólidos.

dos en la escorrentía por la movilización de partículas debida a la propia energía del flujo de escorrentía (sediment entrainment).

La estimación del enriquecimiento en sólidos propuesta por ROSE (1988), consiste en una simplificación del modelo de transporte en lechos de ríos basado en la fórmula de Einstein. Esta fórmula simplificada permite estimar el enriquecimiento en sólidos de la escorrentía mediante la relación entre la energía de la corriente agua y la tensión de corte necesaria para desprender una partícula del lecho del río. Por sus características, el empleo de este modelo está limitado a la escala de parcela de erosión. Sin embargo, mediante la conexión de varias superficies formando un sistema de drenaje hidrológico, a partir de esta ecuación se puede construir un modelo distribuido, de hecho, CREAMS y WEPP emplean parte de la formulación de Rose para la estimación del transporte de sedimentos.

En este artículo se describe un modelo paramétrico agrupado para efectuar estimaciones de la descarga de sólidos en suspensión a escala de cuenca, empleando como única variable el caudal de escorrentía superficial. El modelo se fundamenta en la ecuación de Einstein, Peter-Meyer y Muller empleada en el desarrollo del modelo de ROSE y colaboradores (1983) y que ha sido usada en este artículo para la estimación del transporte de sólidos en la escorrentía.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Desarrollo del modelo

El inicio del movimiento de una partícula de suelo no cohesionada está controlado por la relación entre la fuerza del fluido que actúa sobre la partícula ( $F_l$ ) y la resistencia de esta al movimiento ( $F_s$ ) (SHEN and JULIEN, 1992). Una aproximación de este equilibrio de fuerzas se obtiene a partir de

$$\frac{F_l}{F_s} = \frac{\tau_o K^*}{(\rho_s - \rho_l) d} \quad (1)$$

donde  $\tau_o$  es la tensión de corte del líquido sobre la partícula,  $K^*$  es un factor adimensional de forma de la partícula,  $\rho_s$  y  $\rho_l$  son las densidades de la partícula y del fluido respectivamente y  $d$  es el diámetro de la partícula.

La tensión de corte  $\tau$  ( $\text{kg m}^{-1}$ ) se puede obtener a partir de  $\tau = \rho_l RS$ , siendo  $R$  el radio hidráulico equivalente del lecho del fluido (m) y  $S$  la pendiente del terreno ( $\text{m m}^{-1}$ ). Para la escorrentía superficial en zonas de cultivo, donde el agua circula no encajada en canales, el radio hidráulico se puede considerar igual a la altura de la lámina de agua ( $h$ ). Consecuentemente, el inicio del movimiento de una partícula está condicionado por la siguiente desigualdad

$$\frac{h_l S K^* \rho_l}{(\rho_s - \rho_l) d} > 1 \quad (2)$$

Esta inecuación no tiene términos de segundo orden y todos los efectos son multiplicativos, por tanto los términos que no varían con el tiempo se pueden agrupar en un parámetro compuesto ( $k_p$ )

$$k_p = \frac{S K^* \rho_l}{(\rho_s - \rho_l) d} \quad (3)$$

que tiene unidades de  $\text{m}^{-1}$ . El inicio del movimiento de una clase  $i$  de partículas del mismo tamaño y densidad se puede sintetizar mediante la fórmula

$$h_l k_{p(i)} > 1 \quad (4)$$

así, el movimiento de cada partícula depende de una única variable ligada al tiempo que es la altura de la lámina de agua de escorrentía superficial ( $h$ ).

La ecuación de Manning proporciona una relación entre la altura de la lámina de agua y el flujo de escorrentía superficial de la forma

$$U = \frac{1}{n^*} R^{2/3} \sqrt{S} \quad (5)$$

donde  $U$  es la velocidad de la lámina de escorrentía en  $\text{m s}^{-1}$  y  $n^*$  es el coeficiente de rugosidad de Manning estimado. Transformando la ecuación 5 y substituyendo  $R$  por  $h$  y  $U$  por  $Q_l/A_c$  siendo  $Q_l$  el caudal de escorrentía superficial en el cierre de la cuenca y  $A_c$  el área de la cuenca donde existe una lámina de escorrentía superficial, se obtiene

$$h_l = \left( \frac{Q_l}{\sqrt{S} A_e} n^* \right)^{3/2} \quad (6)$$

y substituyendo en (3)

$$\left( \frac{Q_l}{A_e \sqrt{S}} n^* \right)^{3/2} k_{p(i)} > 1 \quad (7)$$

se obtiene una fórmula que relaciona el arrastre de partículas de suelo con el caudal de escorrentía superficial. La cantidad de sedimento que se desplaza viene dado por la probabilidad de que para una distribución de clases partículas,  $K_p$ , exista un caudal de escorrentía tal que produzca el arrastre de una cantidad  $np$  de partículas

$$P[h_l K_p > 1] = np; \quad np = [0, 1] \quad (8)$$

siendo  $P$  la probabilidad y  $K_p$  la función de distribución de clases de movilidad de partícula. De este modo, si  $mp$  es la masa de una partícula de sedimento para una determinada función de distribución de partículas, existe una función del caudal de escorrentía superficial (Ec. 6) igual a una cantidad de sedimento en movimiento,

$$E[f(Q_l, K_p) > 1] = np mp \quad (9)$$

Para una exposición más sencilla del modelo, se asume inicialmente que la distribución de partículas es uniforme por tanto  $f(h, K_p) = h K_p$ . Esta simplificación de la función de distribución de clases de partículas que a primera vista parece excesiva, se justifica mas adelante mediante la expansión del número de reservorios de sedimentos por medio de una función de distribución arbitraria.

Si la cantidad de sedimento en movimiento es proporcional al espesor de la lámina de escorrentía y  $s$  es la cantidad de sedimento no cohesionado disponible, podemos escribir esta relación mediante la expresión

$$-\frac{ds}{dt} = s k_p h_t \quad (10)$$

esta es una ecuación diferencial de primer orden en la que si reagrupamos las variables se obtiene

$$\frac{ds}{s} = -k_p h_t dt \quad (11)$$

integrando esta expresión se transforma en

$$\ln s = - \int k_p s h_t dt + C \quad (12)$$

dada la condición inicial  $s = s_o$  cuando  $h_t = 0$ , se obtiene

$$\begin{aligned} C &= \ln s_o & \ln s &= -k_p \int h_t dt + \ln s_o \\ s &= s_o \exp\left(- \int k_p h_t dt\right) \\ s &= s_o \exp\left(-k_p \int h_t dt\right) \end{aligned} \quad (13)$$

La expresión anterior indica que la cantidad de sedimento que permanece sin arrastrar es una función del espesor de la lámina de agua de escorrentía acumulada en una serie de eventos. Esta función tiene como parámetro la resistencia al movimiento de las partículas  $k_p$ .

De acuerdo con la ecuación 5, la altura de la lámina de agua se puede expresar como una función de la escorrentía, de modo que

$$s = s_o \exp \left[ -k_p \left( \frac{n^*}{\sqrt{S}} \right)^{3/2} \int \left( \frac{Q_t}{A_e} \right)^{3/2} dt \right] \quad (14)$$

y resolviendo la integral del segundo miembro se obtiene

$$s = s_o \exp \left[ -k_p \left( \frac{n^*}{\sqrt{S}} \right)^{3/2} \int \left( \frac{Q_l}{A_e} \right)^{3/2} dt \right] \quad (15)$$

si se combinan las constantes de la ecuación 5

$$k_t = \frac{2}{5} \left( \frac{n^*}{\sqrt{S}} \right)^{3/2} \quad (16)$$

entonces la Ec. 15 se puede escribir abreviadamente,

$$s = s_o \exp \left[ -k_p k_t \left( \frac{Q_l}{A_e} \right)^{5/2} \right] \quad (17)$$

siendo la cantidad de sedimento transportado desde un reservorio  $i$

$$s_i = s_{oi} \left\{ 1 - \exp \left[ -k_p k_t \left( \frac{Q_l}{A_e} \right)^{5/2} \right] \right\} \quad (18)$$

Finalmente, la cantidad descargada en la cuenca  $s_T$  es el resultado de la suma algebraica de la contribución de todos los reservorios, de forma que

$$s_T = \sum_{i=1}^n s_{oi} \left\{ 1 - \exp \left[ -k_p k_t \left( \frac{Q_l}{A_e} \right)^{5/2} \right] \right\} \quad (19)$$

## RESULTADOS

La comprobación del modelo se realiza a partir del registro de la escorrentía y de medidas de concentración de sólidos en suspensión durante varios episodios de lluvia en una cuenca agrícola. La cuenca está situada en el municipio de Abegondo (A Coruña), la superficie de drenaje hasta en punto de aforo es de 10,2 hectáreas, la pendiente media de la cuenca es del 6,7% y la diferencia de cotas máxima de 36 m. La medida continua del caudal se efectuó en un canal de aforo Parshall por medio de una sonda de nivel de agua acoplada a un registrador de datos. La medida de la descarga de sólidos en suspensión se realizó a partir de muestras obtenidas por un muestreador automático distribuido.



El cálculo de los valores de escorrentía se llevó a cabo mediante un programa que resuelve la ecuación 14. El término integral del miembro derecho de la Ec. 14 fué resuelto numéricamente a partir de los datos de caudal de escorrentía superficial obtenidos a partir de la separación del flujo basal en el registro de escorrentía de la cuenca.

En el programa se especificó la posibilidad de definir hasta 100 reservorios de sedimentos en la entrada de parámetros del modelo. Para cada reservorio se especifica la densidad ( $\text{kg m}^{-3}$ ), el diámetro de la partícula (m), el factor de forma  $K^*$  y la masa de cada clase de partículas (kg). Este número de reservorios puede ser utilizado para la representación de funciones de distribución de tamaños de partícula diferentes de la distribución uniforme especificada en Ec. 9.

El análisis del modelo se realizó suponiendo una distribución log-normal del diámetro de partícula del sedimento. En la figura 1 se muestra la distribución en frecuencias relativas del diámetro de partícula con media 0,5 mm y desviación típica de 5,0 mm en 60 clases.

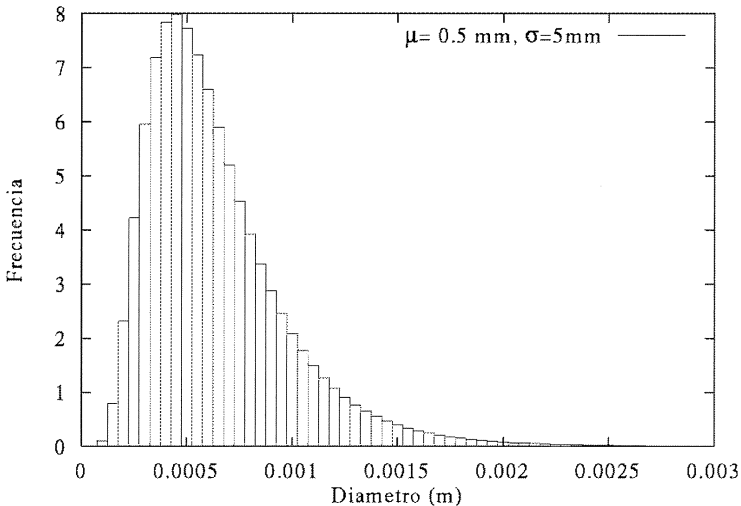


Figura 1. Función de distribución log-normal del tamaño de partícula empleada en la simulación del arrastre de sedimentos.

En la figura 2 se muestran los resultados de la simulación con la distribución de sedimentos mencionada. Se observa que el modelo reproduce el efecto de agotamiento de los sedimentos produciéndose la descarga máxima a los 40 minutos del inicio del evento, mientras el pico de caudal de escorrentía se produce a los 60 minutos. En la gráfica de concentración de sedimentos correspondiente a la misma figura, se observa que la concentración máxima se alcanza a los 30 minutos.

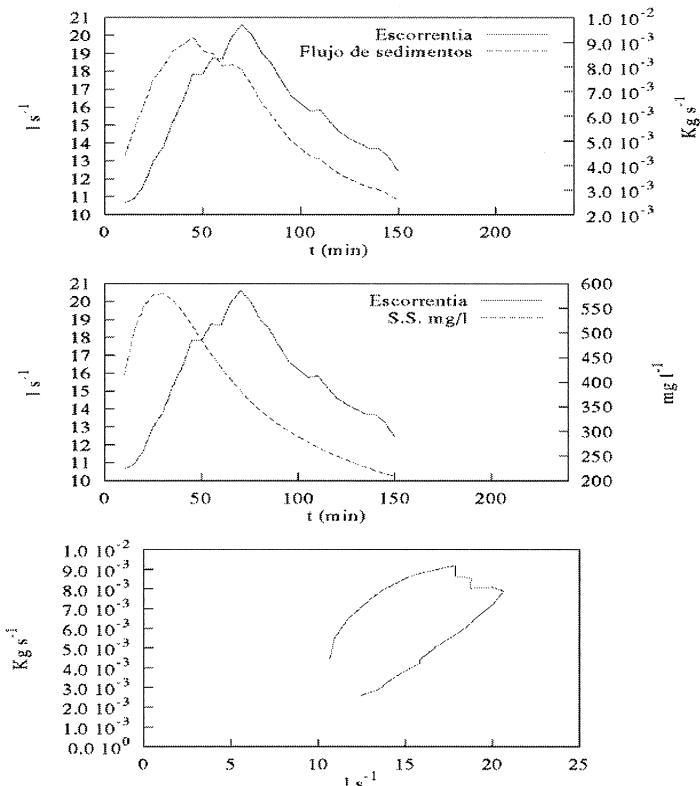


Figura 2. Resultado de la simulación efectuada a partir de la distribución de la Fig. 1. En la figura superior se muestra el hidrograma y el flujo de sólidos en suspensión, en la figura intermedia se muestra la concentración de sólidos y en la inferior se muestra el plano de fase entre el caudal de escorrentía superficial y el caudal de sólidos.

Según la hipótesis del mecanismo de transporte formulada en el modelo, la cual establece que la movilidad de las partículas esta condicionada por el equilibrio definido en la ecuación 1, es posible efectuar una aproximación de la composición granulométrica o de densidad de partículas en el sedimento, a partir de valores de concentración de sólidos determinados experimentalmente.

En la figura 3 se muestra el hidrograma correspondiente a una secuencia típica de eventos registrados en la cuenca del Abelar, y los datos de concentración de sólidos medidos en muestras obtenidas mediante un tomamuestras automático. En esta secuencia se observa el efecto de agotamiento de los sedimentos en sucesivos eventos. En el primer pico de escorrentía, la concentración máxima de sólidos en suspensión alcanzó un valor máximo cercano a 800 mg l<sup>-1</sup> en un caudal pico de 20 l s<sup>-1</sup>. En el segundo evento, el pico de escorrentía también se alcanza un máximo cercano a 20 l s<sup>-1</sup>, sin embargo, la concentración de sólidos alcanzada es de 300 mg l<sup>-1</sup>, notablemente inferior que la registrada durante el primer evento.

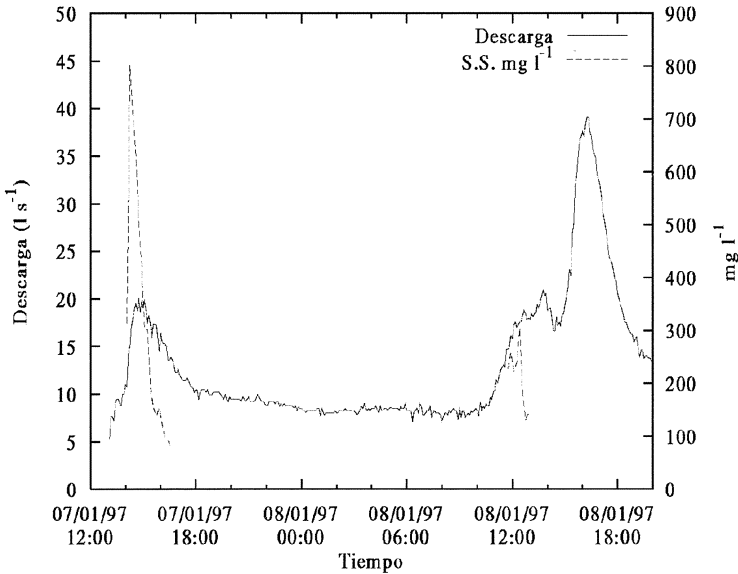


Figura 3. Secuencia de eventos registrados en la cuenca O Abelar y concentración de sólidos medida experimentalmente.

En este caso, el efecto de agotamiento de la reserva de sedimentos se justifica de la siguiente manera: en una secuencia de este tipo, la intensidad y duración de la lluvia necesaria para generar el primer pico de escorrentía fué mucho mayor que la necesaria para generar el segundo, debido al mayor caudal base al inicio del segundo evento, y el mayor contenido de agua del suelo. En consecuencia, el efecto erosivo de la lluvia fué mayor en el primer evento, y por ello se originaría una mayor cantidad de sedimentos disponible para su posterior arrastre. Este agotamiento de la reserva de sedimentos es lo que permite al modelo la simulación del transporte de sedimentos durante una serie de eventos sin incluir un mecanismo explícito de erosión.

En la figura 4 se muestra el resultado de la simulación del arrastre de sedimentos durante el evento representado en la figura 3. Los parámetros ajustados manualmente son: fracción del área con escorrentía en lámina (0,5), coeficiente de rugosidad de Manning,  $n^*$ , (0,04), la densidad de las partículas ( $2,5 \text{ g cm}^{-3}$ ), el factor de forma de la partícula,  $K^*$ , (1), el diámetro medio de partícula de sedimento (0,1 mm), la desviación estándar (20 mm) y la masa inicial disponible para el transporte (112 kg). Se asume que el tipo de distribución es log-normal.

Mediante el aumento del diámetro medio de partícula a 0,5 mm y la desviación estándar a 50 mm se obtiene la descarga de sedimentos que se muestra en la figura 5, los demás parámetros permanecen inalterados. En esta simulación se detecta el transporte de fracciones más gruesas que aparecen en el tercer evento, a los 1600 minutos. Asimismo, se observa que la concentración de sólidos disminuye en el primer evento a causa de que la cantidad total de sedimento disponible para la escorrentía se fijó en un valor igual al de la simulación anterior (112 kg) con la consiguiente reducción de la proporción de partículas finas.

De la comparación de las dos simulaciones con respecto a los datos de carga de sólidos determinados experimentalmente, se puede llevar a cabo una interpretación del efecto del método de muestreo de la escorrentía y un posible proceso de deposición de sedimentos en determinados tramos del canal principal. En efecto, si se supone la existencia de fracciones gruesas de sedimentos transportables con una distribución estimada a partir de los valores de media 0,5 mm y desviación típica 50 mm, las fracciones gruesas tendrían que aparecer en el tercer evento de la secuencia de la figura 5, sin embargo, éstas no se detectarían debido a que el sistema de muestreo no permite recolectar los sólidos transportados por acarreo. En la figura 3, la estrechez de los picos de concentración de sólidos observados con respecto a la primera estimación efectuadas por el modelo (fig. 4) está relacionada con la selectividad del muestreo respecto al tamaño de partícula de sedimento.

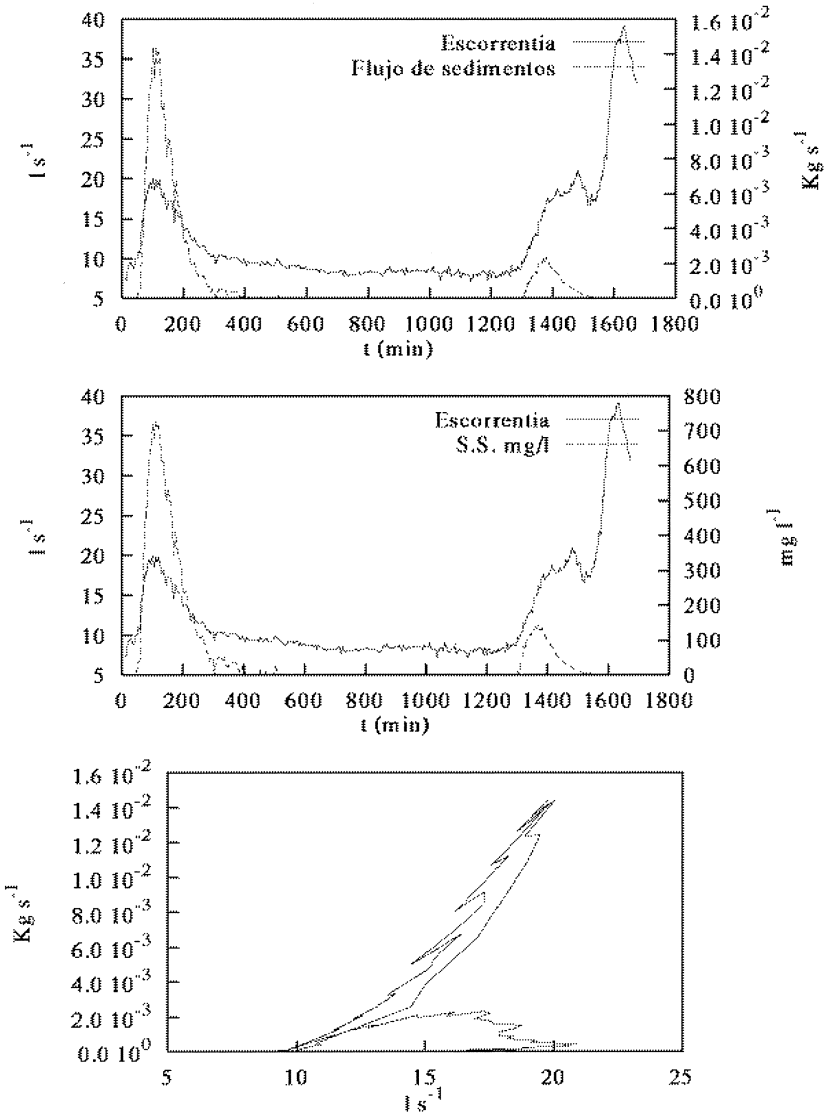


Figura 4. Simulación de la descarga de sólidos para la secuencia de eventos registrada en la cuenca O Abelar.

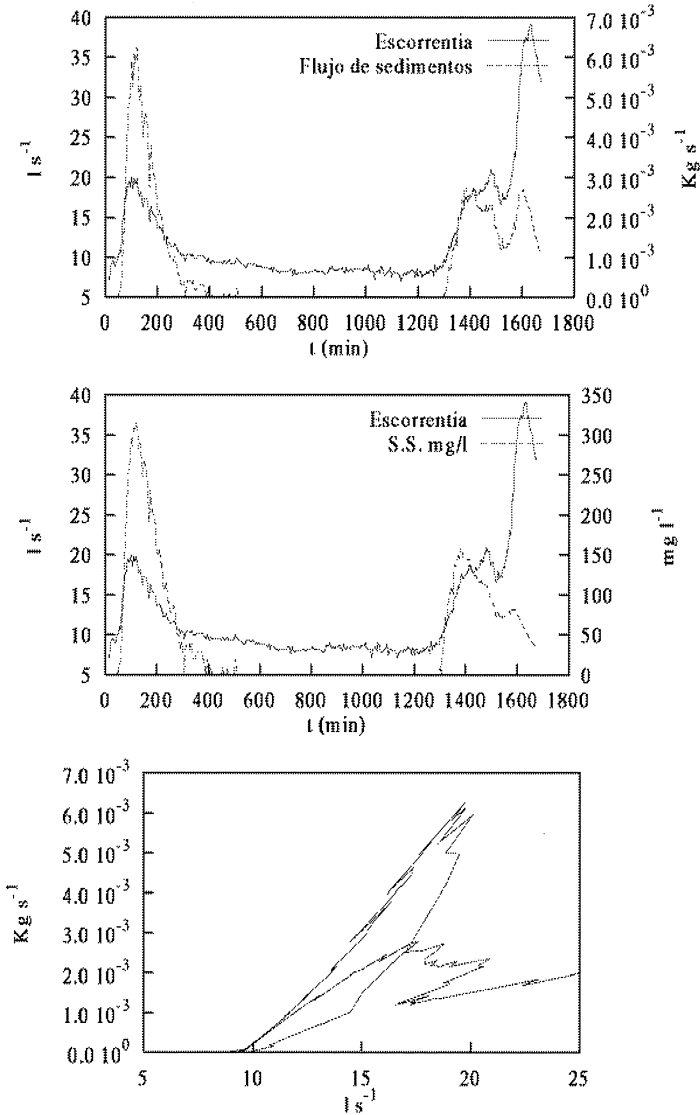


Figura 5. Simulación de la descarga de sólidos para la secuencia de eventos registrados en la cuenca O Abelar con parámetros de distribución del tamaño de partícula de  $\mu = 0,5$  mm y  $\sigma = 50$  mm.

La masa de sedimento perdida calculada a partir de los datos de concentración observados durante la serie de eventos de la figura 3 es de 73,2 kg, mientras que la calculada mediante el modelo es de 84,6 kg. Esta sobreestimación del 15,5% coincide con la masa de los sedimentos con un diámetro mayor de 1,62 mm cuyo arrastre es calculado a partir de las predicciones efectuadas por el modelo.

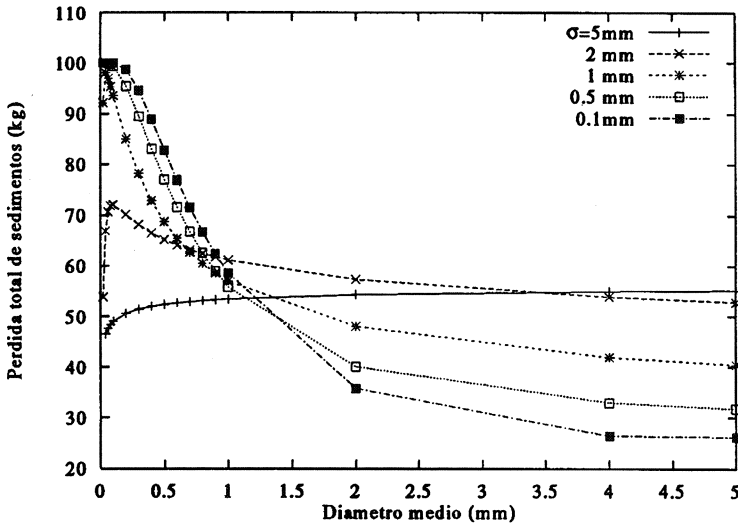


Figura 6. Masa total de sedimentos transportados en función de los valores de los parámetros de la distribución log-normal de sedimentos, que son susceptibles de ser arrastrados por escorrentía superficial. Los valores de los otros parámetros del modelo son los ajustados para la simulación del evento registrado en el Abelar.

En la figura 6 se muestra el efecto de los parámetros de la función de distribución log-normal, sobre la descarga total de sedimentos calculada en función de los parámetros ajustados para la serie de eventos de la figura 3, considerando una masa inicial de sedimentos de 100 kg. Para pequeñas desviaciones típicas de la distribución, la masa de sedimento transportada disminuye exponencialmente con respecto al diámetro medio de partícula, mientras que para distribuciones con una varianza alta los arrastres son menores, coincidiendo el máximo con valores cercanos al valor medio. Es fácil observar que dentro de un rango de tamaño medio de partícula entre 0,5 y 1,5 mm, la masa de sedimento transportada oscila en un rango entre el 50 y el 80% de la masa inicial de sedimentos, independientemente de la varianza de la distribución.

## CONCLUSIONES

El modelo de estimación de la carga de sólidos en suspensión en avenidas ofrece resultados consistentes con las observaciones del proceso de arrastre de sedimentos durante series de eventos reales.

Los valores de los parámetros ajustados tales como el porcentaje de la superficie de la cuenca en la que existe escorrentía en lámina y la variación del espesor medio de la lámina de escorrentía con respecto al caudal en este área, pueden ser utilizados como estimadores del funcionamiento hidrológico de la cuenca.

El modelo puede emplearse para efectuar estimaciones del tipo de distribución, y de los valores de los parámetros de la distribución de la densidad o del diámetro de las partículas de sedimento, a partir de los valores de concentración observados. De la misma forma, el modelo permite hacer inferencias acerca de la descarga total de sedimentos (en suspensión y por acarreo) a partir de medidas de concentración de sedimentos realizadas mediante procedimientos selectivos tales como tomamuestras automáticos o turbidímetros.

Si bien el modelo no realiza predicciones de la generación de sedimentos en el caso de cuencas urbanas o en procesos de erosión por actividades agrícolas -donde la producción de partículas transportables (no cohesionadas) no es totalmente dependiente del efecto de disgregación debido a la erosividad de la lluvia- es posible sin embargo, calcular la masa de sedimentos transportada a partir de estimaciones de la masa y la granulometría de partículas no cohesionadas en la cuenca inmediatamente anteriores a un evento.

Finalmente, una utilidad de este modelo y de hecho, el objetivo inicial de su planteamiento consiste en completar series de valores de carga de sólidos en escorrentías cuando los datos de concentración son escasos.

**AGRADECIMIENTOS:** Este trabajo ha sido financiado por la Unión Europea a través del proyecto "Effective Land Management for Surface Runoff Control" (FAIR 1-CT95-0458).



**BIBLIOGRAFÍA**

- ACKERS, P. and WHITE, W. R. (1973). Sedimente transport: new approach analysis. *J. Hydraul Eng.*, 99: 2041-2060.
- COLBY, B. R. (1964). Practical computations of bed material discharge. *J. Hydraul. Eng.*, 90: 217-246.
- ROSE, C. W. (1988). Research progress on soil erosion processes and a basis for soil conservation practices. In: *Soil erosion research methods*, edited by Lal, R.. 119-139.
- ROSE, C. W., WILLIAMS, J. R., SANDER, G. C. and BARRY, D. A. (1983 a). A mathematical model of soil erosion an deposition processes: I. Theory for a plane land element. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 991-995.
- ROSE, C. W., WILLIAMS, J. R., SANDER, G. C. and BARRY, D. A. (1983 b). A mathematical model of soil erosion an deposition processes: II. Application to data from an arid-zone catchment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 996-1000.
- SHEN, H. W. and JULIEN, P. Y. (1992). Erosion and sediment transport. In: *Handbook of Hydrology*, edited by Maidment, R. D. McGraw-Hill. New York.
- TOFFALETI, B. F. (1969). Definite computations of sand discharges in rivers. *J. Hydraul. Eng.*, 95: 225-248.