



**EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN ESPECÍFICA
EN LA CUENCA VERTIENTE AL EMBALSE DE PUENTE ALTA
(SEGOVIA) MEDIANTE MÉTODOS DE ESTIMACIÓN
DIRECTOS E INDIRECTOS**

Specific sediment yield evaluation in the drainage basin of the Puente Alta reservoir (Segovia) through direct and indirect methods

J. M. Bodoque⁽¹⁾, J. Pedraza⁽¹⁾, J. F. Martín-Duque⁽¹⁾, M. A. Sanz⁽¹⁾,
R. M. Carrasco⁽²⁾, A. Díez⁽²⁾ y M. Mattera⁽¹⁾

*(1) Dpto. Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid.
E-mail: jbodoque@geo.ucm.es Fax: 91 394 48 45*

(2) Dpto. Ingeniería Geológica y Minera, Universidad de Castilla la Mancha, 45071 Toledo

Resumen: La impermeabilización del paramento del embalse de Puente Alta (Segovia) en 1995 permitió conocer su volumen de aterramiento y estimar tasas medias de degradación específica. Dichos resultados se han utilizado para validar un procedimiento empírico de evaluación de la erosión hídrica para la misma cuenca; este método combina el concepto de coeficiente de entrega de sedimentos (CES) y la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), para lo cual los factores que intervienen en la estimación han sido integrados en un sistema de información geográfica sobre la aplicación informática Idrisi 32. En ambos casos, los resultados obtenidos están próximos a $70 \text{ t/km}^2 \cdot \text{año}$, valor que puede considerarse bajo en relación con los obtenidos para otras cuencas españolas. Por otro lado, la comparación entre ambos métodos muestra una correlación alta en sus resultados, lo que pone de manifiesto la utilidad del procedimiento empírico para situaciones fisiográficas similares.

Palabras clave: degradación específica, coeficiente de entrega de sedimentos (CES), sistemas de información geográfica (SIG), ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE), cuenca hidrográfica, Sierra de Guadarrama.

Abstract: Reservoirs act as sediment stores, so that a survey of the deposits accumulated within them is a common approach to evaluate the sediment yield of their drainage basins. Such is the case with the Puente Alta reservoir (Guadarrama Mountains, Segovia Province, Spain), described in this paper. Repair work conducted on the dam face in the summer of 1995 allowed for an analysis of the reservoir's sediment, which yielded and estimate of the rate of accumulation that had occurred over the forty years since the reservoir's establishment in 1955. This information was used to directly calculate rates of sediment yield in its drainage basin, and also to validate an empirical method for obtaining sediment yield which blends the Sediment Delivery Ratio concept with the Universal Soil Loss Equation. In order to achieve this second aim, a Geographical Information System was built with each of these factors needed for the evaluation; eventually these were integrated in the Idrisi 32 software. In both cases, the resulting values for specific sediment yield were very close to $70 \text{ t/km}^2 \cdot \text{year}$, which could be considered low in comparison with values obtained from other Spanish drainage basins in which similar evaluations have been carried out. On the other hand, the results of the comparison between both methods show a very good correlation (less than 3 % deviation), which could be interpreted as support for the validity of this empirical procedure in physiographic settings similar to the study area.

Key words: Specific Sediment Yield, Sediment Delivery Ratio (SDR), Universal Soil Loss Equation (USLE), Geographical Information System (GIS), Drainage Basin, Guadarrama Mountains.



Bodoque, J. M., Pedraza, J., Martín-Duque, J. F., Sanz, M. A., Carrasco, R., Díez, A. y Mattera, M. (2001). Evaluación de la degradación específica en la cuenca vertiente al embalse del Puente Alta (Segovia). *Rev. C. & G.*, 15 (3-4), 21-36. © SEG. AEQUA. GEOFORMA Ediciones

1. Introducción y objetivos

Habiendo iniciado recientemente una serie de trabajos consistentes en la investigación de la evolución del paisaje, en general, y las modificaciones que la actividad antrópica ha generado en el relieve de un área del centro de la Península (concretamente la Sierra de Guadarrama y su entorno inmediato en ambas cuencas, la del Duero y Tajo), es de vital importancia disponer de un método de evaluación de los estados erosivos del terreno en condiciones naturales hipotéticas y en condiciones reales o «actuales».

La ausencia de medidas directas sobre la masa de terreno (suelo y sustrato) movilizado en periodos históricos, es una limitación con la que nos encontramos siempre en este tipo de investigaciones; por lo cual hemos de recurrir a métodos empíricos o paramétricos.

A la hora de decidir cual de estos métodos es el más adecuado, parece lógico iniciar la investigación por el más generalizado de todos, la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (*Universal Soil Loss Equation, USLE*), pues a pesar de las críticas informales que se le hacen, sigue siendo el de utilización «general». Ello no significa que en el desarrollo final vaya a ser adoptado como el único método para los cálculos, sin embargo, el hecho de que contenga la práctica totalidad de los parámetros o factores que intervienen en estos procesos y el que en gran parte de la Península se haya aplicado para cartografiar los «estados erosivos de terreno» nos aconseja no desestimarlos previamente.

Como es bien conocido, las técnicas y procedimientos para evaluar la erosión hídrica en un territorio persiguen dos objetivos: cuantificar las tasas medias en una localización puntual o sector areal; y profundizar en la validez de extrapolar espacio-temporalmente dichos valores a otros sectores del territorio u otros periodos de tiempo distintos al de medición.

Dado que nuestras necesidades futuras se centran en esa extrapolación espacio-temporal, presen-

tamos aquí los primeros resultados de la búsqueda de un procedimiento adecuado a tales fines.

La feliz circunstancia que nos ha permitido disponer de los datos sobre volumen de aterramiento de un pequeño embalse en la zona a investigar (Puente Alta, Segovia), hace que podamos plantear una primera «validación» al respecto de cuanto hemos comentado; se ha utilizado para ello la «degradación específica», es decir, «el total de sedimentos derivados de una cuenca de drenaje o vertiente, medido en una sección transversal de referencia en un periodo de tiempo concreto.» (Vanoni, 1975; Sanz Montero, 1998; Aguiló *et al.*, 1992).

El cálculo de ese parámetro mediante el método indirecto, combina el concepto de coeficiente de entrega de sedimentos (CES) (Avenidaño *et al.*, 1994) y la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), implementado en un Sistema de Información Geográfica (SIG). El cálculo basado en las medidas directas sigue el procedimiento desarrollado por Avenidaño *et al.* (1993).

La comparación de los resultados obtenidos con ambos procedimientos, nos permite hacer una primera evaluación sobre el grado de fiabilidad del método empírico, que es el objetivo fundamental del trabajo que presentamos aquí.

2. Área de estudio

La cuenca vertiente del embalse de Puente Alta corresponde al río de la Acebeda, luego denominado Frío y tributario del río Milanillos, tributario a su vez del río Eresma aguas abajo de la ciudad de Segovia.

La cuenca, con una superficie de 22 km², alcanza su cota máxima a los 2197 m (La Pinareja) y mínima a los 1170 m (en el embalse). La pendiente media longitudinal del canal es del 16 %; sin embargo, en cabecera es del 32 % mientras en el resto es del 12%. Estos gradientes hacen que el río de la Acebeda, que tiene un régimen de circulación

permanente, posea una dinámica de alta energía (torrencial) en su tramo superior y de menor energía (fluvial) en el resto.

La precipitación media anual en esta cuenca presenta una diferencia de 400 mm: en el límite noroccidental se sitúa la isoyeta de 800 mm y en la zona de cabecera (al sur), la isoyeta es de 1200 mm. Parte de esta precipitación, concretamente entre los meses de noviembre y mayo, es mayoritariamente en forma de nieve; esto hace que el régimen de alimentación sea pluvio-nival. La aportación media anual del río en el embalse es de 2,1 hm³/año, y la capacidad del embalse es de 2,5 hm³.

El conjunto de la cuenca se localiza en la vertiente septentrional del sector central de la Sierra de Guadarrama (Figura 1). Su tramo de cabecera es una cuenca de recepción formada por tres compartimentos (antiguos nichos de nivación) localizados

en las laderas de los macizos de La Mujer Muerta y Montón de Trigo, cuyas culminaciones (2180 m y 2155 m respectivamente) definen la unidad morfológica de la «planicie de cumbres» en estas zonas (Pedraza *et al.*, 1991). El resto de la cuenca se encaja formando una garganta en los contrafuertes de esas elevaciones, cuyas cimas se sitúan entre los 1700 m (al sur) y los 1430 m (al norte) definiendo la planicie intermedia o «planicie de paramera»; el final de la cuenca vertiente al embalse se localiza justo en el contacto entre las laderas de estas elevaciones y su piedemonte, a 1170 m que es la cota superior del cierre del embalse (figura 2).

El conjunto de la red de drenaje es predominantemente rectangular y ello es perfectamente perceptible en el canal principal que sigue las direcciones de fracturación: noreste-suroeste, norte-sur, este-oeste y noroeste-suroeste. Como se ha señalado, la mor-

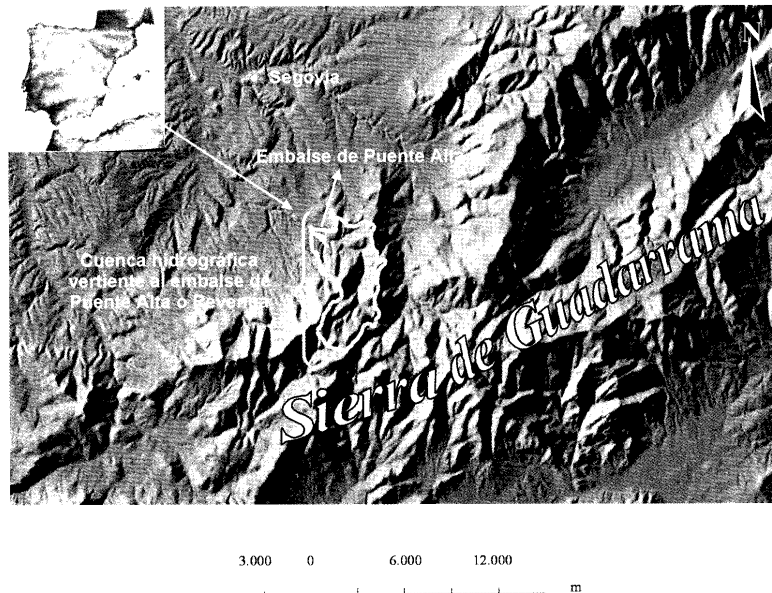


Figura 1. Situación de la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta; vertiente septentrional de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central Español, provincia de Segovia)
 Figure 1. Location of the drainage basin to the Puente Alta reservoir; northern slope of the Guadarrama Mountains (Spanish Central System, Segovia Province)

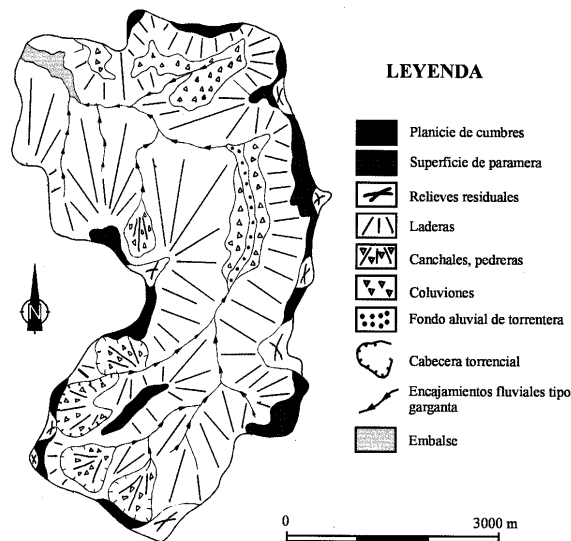


Figura 2. Esquema geomorfológico de la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta
 Figure 2. Geomorphological scheme of the drainage basin to the Puente Alta Reservoir

fología en la cabecera es la característica de cuencas de recepción torrencial, cuyas vertientes aparecen en ocasiones recubiertas por derrubios periglaciares (canchales o pedreras); en el resto del valle principal, la garganta presenta laderas con un desarrollo medio de 250 metros y pendientes medias del 28 %. Estas laderas aparecen recubiertas en su mayoría por suelo edáfico, y en su base de enlace con el canal por formaciones coluvionares de bloques, cantos y gravas envueltos en una matriz arenosa, de origen mixto periglacial-gravitacional. Estos coluviones están siendo erosionados actualmente por el río, cuyo lecho es mixto, ya que en zonas es rocoso y en otras de bloques y gravas.

El substrato litológico está definido en su práctica totalidad por rocas metamórficas ortoderivadas, concretamente por leucogneises y gneises glandulares.

Los suelos dominantes son de tipo cambisol húmico, pero también aparecen leptosoles líticos en las zonas de cabecera. Respecto a la vegetación y los usos, predomina el bosque de pino silvestre

(*Pinus sylvestris*), y aparecen en menor medida zonas de pastizal y matorral (en cabecera, al sur, y en las proximidades del embalse, al norte). Merece la pena destacar que en esta cuenca fluvial se sitúa el denominado «Pinar de la Acebeda», enclave florístico que fue declarado en 1930 Sitio Natural de Interés Nacional, aunque posteriormente quedara descatalogado. Actualmente, la práctica totalidad de la cuenca hidrográfica queda incluida dentro de los «Montes de Valsaín», gestionados por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

3. Métodos

Como se ha señalado en los objetivos, en este trabajo se siguen dos procedimientos para evaluar la degradación específica: el primero, parte de la medida directa del volumen de aterramiento del embalse y utiliza un método de cuantificación mediante diversos parámetros; el segundo hace una estimación a partir de métodos indirectos (empíri-

cos o paramétricos). Todo este desarrollo metodológico, que aparece resumido en la figura 3, se ha implementado en un SIG ya que permite ajustar la variación espacial de los distintos parámetros y ensayar el método en otras cuencas.

3.1 Procedimiento para estimar la degradación específica a partir de los sedimentos acumulados en el embalse

Se ha utilizado el método desarrollado por Avendaño *et al.* (1993), que incluye diferentes

parámetros físicos y morfológicos: volumen de aterramiento, textura de los materiales, morfometría de la cuenca, superficie y tiempo de funcionamiento del embalse, etc.

3.1.1 Medida del aterramiento

Este dato se obtiene normalmente realizando un plano batimétrico de la presa; con esta cartografía, y conociendo la capacidad inicial del embalse, se calcula la diferencia entre el fondo batimétrico actual y el original de la presa, y se consigue el volumen de aterramiento.

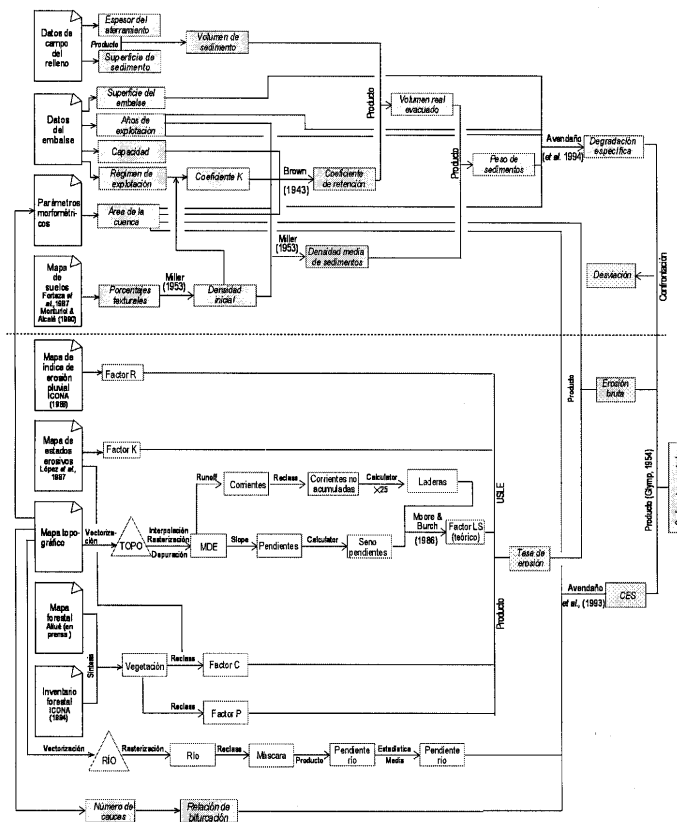


Figura 3. Esquema metodológico y modelo cartográfico
 Figure 3. Methodological procedure and cartographic model

En el caso concreto de la presa de Puente Alta, el volumen de aterramiento se pudo conocer al ser sometido el embalse a un vaciado parcial durante los meses de agosto-septiembre de 1995 (ver figura 4) para impermeabilizar el paramento aguas arriba.

3.1.2 Capacidad de retención de sedimentos

De las partículas aportadas por la red hidrográfica a la presa sólo una parte queda sedimentada, escapando el resto por los desagües de fondo cada vez que son abiertos. La capacidad de un embalse para retener los materiales que llegan hasta él se denomina capacidad de retención de sedimentos (*trap efficiency*) y se expresa en porcentaje. Este parámetro se estima básicamente a partir de relaciones empíricas, siendo algunas de las más utilizadas las propuestas por Brune (1953) y Brown (1943).

Para el estudio de Puente Alta se ha utilizado la ecuación de Brown (1943), ya que es la que mejor se adapta a los embalses situados en las

cabeceras de las cuencas (Butcher *et al.*, 1993). Dicha ecuación se basa en la relación existente entre la capacidad del embalse y la superficie de la cuenca de drenaje, y viene definida por la siguiente expresión:

$$CR = 100 \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{KC}{W} \right)} \right] \quad [1]$$

Donde: *CR* es la capacidad de retención del embalse en %. Para el caso concreto de la presa de Puente Alta, los valores de los parámetros que definen la ecuación de Brown (1943) son: *W* = área de drenaje de la cuenca (22 km²); *C* = capacidad del embalse en miles de m³ (2500 m³); *K* = coeficiente, que varía entre 0.09 y 2.1 en función del régimen de explotación del embalse (Avendaño *et al.*, 1993); en este caso, la presa de Puente Alta es de tipo I, es decir, permanece siempre o casi siempre llena, y por tanto el valor de *K* es de 2.1.



Figura 4. Vista aérea oblicua de la presa de Puente Alta, así como de su cuenca vertiente, al inicio de las obras de impermeabilización del paramento durante el verano de 1995 (en Rodríguez, 1996)

Figure 4. Oblique aerial view of the Puente Alta reservoir and of part of its drainage basin, taken in the Summer of 1995, when the process of imperviousing of the dam took place (in Rodríguez, 1996)

3.1.3 Densidad de los sedimentos acumulados en el embalse

Una vez medido el volumen de aterramiento de la presa es necesario conocer la densidad de los sedimentos, para de este modo transformar el dato de volumen a masa. La densidad de las partículas depositadas en un embalse está condicionada por tres factores principales: a) el régimen de explotación del embalse; b) la naturaleza de los sedimentos (textura y composición); c) el grado de compactación de los mismos.

La ecuación de Miller (1953), la más aceptada actualmente, tiene en cuenta los factores descritos con anterioridad, así como el cambio de densidad anual que experimentan los sedimentos. El enunciado de dicha ecuación es el siguiente:

$$W_t = W_1 + 0.4343K \left(\frac{T}{T-1} (\ln T) - 1 \right) \quad [2]$$

En la que: W_t = representa la densidad media de sedimentos después de T años de explotación; K = constante que depende de la textura de los sedimentos y del régimen de explotación del embalse (Avendaño *et al.*, 1993); W_1 = densidad inicial de sedimentos, que viene definida a su vez por la ecuación:

$$W_1 = W_c P_c + W_m P_m + W_s P_s \quad [3]$$

Donde: P_c , P_m , P_s representan los porcentajes de arcilla, limo y arena respectivamente; W_c , W_m y W_s son coeficientes que indican la densidad inicial de arcilla, limo y arena, cuyo valor depende del régimen de explotación del embalse (Avendaño *et al.*, 1993).

Para desarrollar la ecuación de Miller (1953) se tomaron los datos que proporcionan las analíticas publicadas en los mapas de suelos de Castilla-León (Forteza *et al.*, 1987) y Madrid (Monturiol &

Alcalá, 1990) para los tipos leptosoles líticos y cambisoles húmicos, que son los que definen la cubierta edáfica de la cuenca vertiente al embalse. Los parámetros que determinan la ecuación de Miller para esta cuenca vienen definidos por los valores de la Tabla 1.

3.1.4 Estimación de la degradación específica de la cuenca vertiente al embalse

Se obtiene a partir de la expresión siguiente (Avendaño *et al.*, 1993):

$$DE = \frac{SAE}{Tf \times (Ac - Ae)} \quad [4]$$

Donde: DE = degradación específica de la cuenca ($t/km^2/año$); SAE = cantidad de sedimentos que se han depositado en el embalse; Tf = tiempo de funcionamiento del embalse; Ac = superficie de la cuenca de drenaje (km^2); Ae = superficie del embalse (km^2).

3.2 Estimación de la degradación específica en la cuenca vertiente al embalse mediante la utilización del método del coeficiente de entrega de sedimentos (CES)

Este procedimiento asume que el aporte de sedimentos (AS) al embalse (degradación específica) es una proporción del total de sedimentos erosionados en el área fuente (TE). Este ratio se define como coeficiente de entrega de sedimentos (CES) o *Sediment Delivery Ratio (SDR)* y obedece a la siguiente expresión (Glymp, 1954):

$$CES = \frac{AS}{TE} \quad [5]$$

En la cuenca objeto de estudio, la erosión potencial bruta TE (*gross erosion*) se ha estimado

Tabla 1. Parámetros que definen la ecuación de Miller (1953) para la cuenca de Puente Alta
Table 1. Parameters for the Miller (1953) equation for the Puente Alta drainage basin

W_1						K			$Densidad (W_t)$			
W_c	P_c	W_m	P_m	W_s	P_s	$Arena$	$Limo$	$Arcilla$	T	$T-1$	$\ln T$	(kg/m^3)
416	0.12	1120	0.24	1550	0.64	0	91	256	40	39	3.69	1553
$W_1 = 1310.72$						$K = 201$						

aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo (*universal soil loss equation*; USLE, Wischmeier & Smith, 1965); el coeficiente de entrega de sedimentos (CES) que llegan al embalse de Puente Alta se ha estimado desarrollando la metodología definida por Avendaño *et al.* (1994). El uso de la USLE obedece a las razones ya expuestas en la introducción: es el método que se ha aplicado en toda la región, y el que tratamos de validar.

3.2.1 Erosión potencial bruta de la cuenca de Puente Alta

Para la estimación de la pérdida de suelo, cada uno de los factores que definen la USLE fueron integrados en un sistema de información geográfica desarrollado sobre la aplicación informática Idrisi 32.

Considerando:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad [6]$$

Donde: A = pérdida de suelo medida en t/ha/año; R = índice de erosión pluvial ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm} \cdot \text{hora}^{-1}$); K = factor de erosionabilidad del suelo ($\text{t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hora} / \text{ha} \cdot \text{J} \cdot \text{cm}$); L = factor longitud de la vertiente (m); S = factor pendiente (%); C = factor cubierta vegetal o factor C (adimensional); P = factor prácticas de conservación (adimensional).

Se establecen los valores correspondientes de la siguiente manera:

- Factor de erosividad de la lluvia (Factor R)

Los valores del factor de erosividad de la lluvia R para la cuenca del embalse de Puente Alta han sido estimados a partir del mapa de erosión pluvial publicado por el ICONA (1988), a escala 1:1.000.000 (Figura 6a).

- Factor de erosionabilidad del suelo K

En la cuenca del embalse de Puente Alta aparecen representados dos tipos de suelos (Figura 5a): cambisoles húmicos y leptosoles líticos, desarrollados ambos sobre substrato de gneis. En este caso, el factor K viene definido en el Mapa de Estados Erosivos de la Cuenca del Duero (López *et al.*, 1987) por un valor uniforme de 0.5 (Figura 6b).

- Factor LS

El carácter empírico de este factor ha dado lugar a la aparición de inconsistencias en la aplicación de

la USLE, frecuentemente atribuidas a la incapacidad del factor LS para explicar todos los mecanismos de transporte (Loch, 1984); especialmente cuando el flujo laminar es reemplazado por concentrado, y cuando se producen cambios en la geometría de la ladera. También cuando ésta presenta una pendiente elevada (Moore & Burch, 1986).

Para suplir las carencias a que da lugar en el desarrollo de la USLE la utilización de un factor LS de origen experimental se ha desarrollado un factor teórico: LS_T (Moore & Burch, 1986); éste se basa en la teoría de flujo unitario (Yang 1971, 1972), y viene definido por la expresión:

$$LS_T = \left(\frac{al}{22.13}\right)^{0.4} \left(\frac{s}{0.0896}\right)^{1.3} \quad [7]$$

en la que: l = longitud de la ladera expresada en metros; s = seno de la pendiente; a = factor de forma definido para explicar la escorrentía en un sector de la cuenca; éste viene determinado a su vez por la fórmula:

$$a = \frac{A}{bl} \quad [8]$$

Donde: A = superficie del sector de cuenca determinado para definir el factor de forma; b = anchura de la línea de nivel que define el área de drenaje parcial; l = longitud de la línea de escorrentía desde el punto más alejado del área de drenaje parcial al sector de curva de nivel b .

Para estimar el factor LS (Figura 6c) de la USLE en la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta, se ha partido de la topografía existente en la zona a escala 1:50.000, la cual ha sido digitalizada. El modelo digital de elevaciones (MDE, figura 5b) ha sido realizado aplicando el método de interpolación *kriging*, al que se le asoció un variograma de tipo lineal por ser éste el que mejor se ajustaba al conjunto de datos XYZ de la cuenca. Asimismo, el mallado se elaboró con una precisión espacial de 25 m.

A partir del MDE, previa utilización del comando *pit removal* de Idrisi 32 para eliminar las inconsistencias del modelo, se obtuvo el mapa de pendientes en grados (Figura 5c), utilizando para ello el comando *slope* de Idrisi 32; a partir de esta capa temática, y tras la conversión del mapa de pendientes a radianes, se obtuvo el seno de la pendiente, utilizando para ello la herramienta *image calculator* de Idrisi 32. La cobertura resultante se utilizó

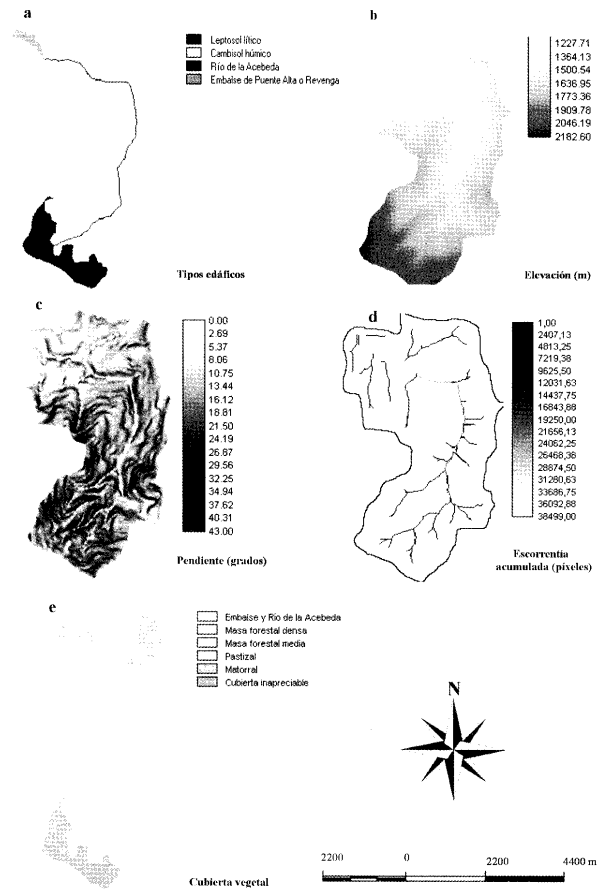


Figura 5. Mapas temáticos utilizados para la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdidas del Suelo (USLE): A) Mapa de suelos; B) Modelo digital de elevaciones, MDE; C) mapa de pendientes obtenido a partir del MDE; D) mapa de escorrentía acumulada, obtenido también a partir del MDE; E) Mapa de vegetación

Figure 5. Thematic maps for the application of the Universal Soil Loss Equation (USLE): a) soil map; b) Digital Elevation Model (DEM); c) gradient map, obtained from the DEM; d) runoff map, obtained as well from the DEM; e) vegetation cover map

para obtener el parámetro pendiente del factor LS de la USLE.

El factor longitud se estimó realizando un mapa de circulación preferente de la escorrentía superficial (Figura 5d) mediante el comando *runoff* de Idrisi 32 y a partir del MDE de la cuenca. Para

poder aplicar la USLE es necesario definir un límite superior en la longitud de la ladera, ya que a medida que se incrementa ésta aumenta también la velocidad de flujo de la escorrentía, y en consecuencia la capacidad erosiva de la misma; se pasa así de un flujo laminar a otro concentrado una vez

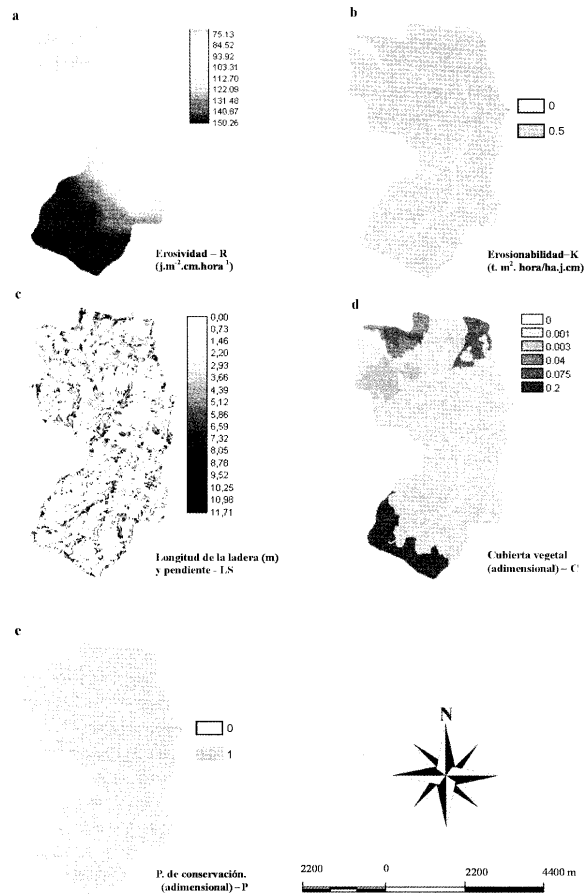


Figura 6. Capas temáticas que reflejan la representación espacial de los distintos factores que definen la USLE, así como el resultado de su integración: a) Factor erosividad de la lluvia (R); b) factor erosionabilidad del suelo (K); c) factor longitud-pendiente de las laderas (LS); d) factor de cultivos y gestión (C); e) factor de prácticas de conservación (P)
 Figure 6. Map layers of the USLE factors and their integration: a) rainfall erosivity factor (R); b) soil erodibility factor (K); c) slope length-steepness factor (LS); d) cropping and management factor (C); e) conservation practise factor (P)

se ha superado un determinado umbral, que viene a coincidir con la formación de las primeras torrenceras. Este umbral está inversamente relacionado con la pendiente de la ladera, de manera que cuanto mayor es la pendiente antes se produce el cam-

bio en la dinámica de la escorrentía, y en consecuencia la longitud de la vertiente es menor. Wischmeier & Smith (1965) crearon un ábaco que define el factor *LS* en función de la pendiente y la longitud de la ladera.

Tomando como referencia este ábaco, se definieron dos límites; el primero de 150 m, para las zonas con pendientes comprendidas entre 0 y 35%, mientras que a las vertientes con pendientes situadas en un rango que vaya del 35 al 50%, se les asignó una longitud de ladera de 50 m. Las áreas de la cuenca con pendiente superior al 50% no se tuvieron en cuenta, ya que el modelo digital de elevaciones (MDE) utilizado no tiene suficiente resolución.

La forma de proceder en este caso fue la siguiente: de nuevo con la herramienta *image calculator* de Idrisi 32 se creó una imagen «booleana», donde el valor uno definía aquellas zonas con un valor de escorrentía acumulada ≤ 6 , ó ≤ 2 , según la clase de pendiente considerada, y el valor 0 representaba zonas con acumulaciones de flujo superiores a 6 píxeles, o a 2 píxeles.

A continuación se multiplicó la cobertura creada por 25 m (resolución espacial del MDE). De este modo, se puede utilizar la ecuación desarrollada por Moore & Burch (1986). Para ello, se asumió que la cuenca de drenaje parcial es rectangular, con lo que el factor de forma *a* es igual a 1 (Moore &

Burch, 1986). Asimismo, se ha considerado que el flujo es laminar, no existiendo erosión en surcos; de esta manera, la ecuación (7) se integró en la herramienta *image calculator* de Idrisi 32 del modo siguiente:

$$LS = (Runoff / 22.13)^{0.4} \cdot (sen\ pendiente / 0.0896)^{1.3} \quad [9]$$

• Factor C

Para obtener el parámetro C en el área de la Cuenca de Puente Alta se ha utilizado el Mapa Forestal de Segovia a escala 1:50.000 (Allué, en prensa), que ha sido homogeneizado para ajustar la leyenda del mapa resultante a los factores que condicionan el valor de C (Figura 5e). El mapa de síntesis (Figura 6d) ha sido elaborado a partir de la información que proporciona el Segundo Inventario Forestal Nacional para la provincia de Segovia (ICONA, 1994). Los valores de C asignados a cada uno de los elementos de la leyenda del mapa de síntesis son los definidos en el Mapa de Estados Erosivos de la Cuenca del Duero (López *et al.*, 1987), que aparecen representados por los valores de las Tablas 2 y 3.

Table 2. Valores del factor C de la USLE para las masas forestales que ocupan la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta
Table 2. Values for the cropping and management factor (C) for the forested areas of the Puente Alta drainage basin

Mapa Forestal de la Cuenca del Embalse de Puente Alta	EQUIVALENCIA FACTOR C			
	% de cubida cubierta	% de cubierta en contacto con el suelo (1)	Tipo de ordenación (2)	
			C	NC
<i>Pinus sylvestris</i>	100-75	100-90	0.001	—
<i>Quercus pyrenaica</i>	100-75	100-90	0.001	—
<i>Quercus rotundifolia</i>	75-40	90-75	—	0.01-0.04

(1) Formada por al menos 5 cm de restos vegetales o plantas herbáceas

(2) C = montes con control estricto de pastoreo; NC = montes sin control de pastoreo

Tabla 3. Valores del factor C de la USLE para las zonas de pastizales, matorrales y arbustos de la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta

Table 3. Values for the cropping and management factor (C) for the grasslands and bush areas of the Puente Alta drainage basin

Mapa Forestal de la Cuenca del Embalse de Puente Alta	EQUIVALENCIA FACTOR C				
	Tipo y altura de la cubierta	Recubrimiento %	Tipo	Porcentaje de cubrimiento del suelo	
				Valor de C	Valor de C
pastizal estacional	plantas herbáceas y matojos	75	G	95-100	0.003
matorral mixto silícicola	plantas herbáceas y matojos	50	w	60	0.075
cubierta inapreciable	Desierto rocoso, desierto de canchales	—	G	40	0.10

G = cubierta en contacto con el suelo formada por pastizal con al menos 5 cm de humus.

W = ídem por plantas herbáceas con restos vegetales sin descomponer.

- Factor P

Experimentalmente se han determinado los valores del factor *P* para distintos tipos de prácticas. En una cuenca como la del embalse de Puente Alta, donde no se realizan prácticas de conservación al no existir actividad agrícola, el valor asignado a *P* fue de 1 (Figura 6e).

3.2.2 Coeficiente de entrega de sedimentos de la cuenca vertiente al embalse

Para determinar el coeficiente de entrega de sedimentos (CES), se ha aplicado la siguiente ecuación (Avendaño *et al.*, 1994):

$$CES = 36A^{-0.2} - \frac{2}{\log P} + \log BR \quad [10]$$

Donde: CES = % del total de material movilizado en la cuenca que sale de la misma; A = superficie de la cuenca en km²; P = pendiente del curso principal expresada en tanto por uno; BR = coeficiente de bifurcación de la red hidrográfica.

- Caracterización y determinación del factor superficie

La relación existente entre la superficie de una cuenca dada y su degradación específica es de tipo inverso, de manera que a medida que aumenta el tamaño de la cuenca disminuye el coeficiente de entrega de sedimentos. Esto se justifica por el hecho de que cuanto mayor es la superficie de una cuenca, son también más abundantes las zonas de sedimentación dentro de la misma: llanuras de inundación, terrazas, conos de deyección, coluviones, glaciais, etc.

- Caracterización y determinación del factor pendiente

La relación existente entre la pendiente de un curso fluvial y el coeficiente de entrega de sedimentos es directamente proporcional, debido a que la capacidad de transporte de un cauce aumenta con la pendiente, al incrementarse como consecuencia la velocidad de flujo de la escorrentía.

Este factor ha sido estimado a partir de la digitalización del curso principal de la cuenca de Puente Alta, el río de la Acebeda (Hojas 483 y 502 a escala 1/50.000); el mapa vectorial resultante fue «rasterizado», realizándose a continuación una máscara con el mapa de pendientes de la cuenca expresado en tanto por uno. De este modo se obtuvo un valor medio para la pendiente del curso principal del 16%.

- Caracterización y determinación del factor relación de bifurcación

La posición que ocupa un cauce determinado dentro de la jerarquía fluvial se expresa mediante una magnitud que se denomina «orden del cauce» (Strahler, 1965). El cauce de mayor orden es el que define el orden de la cuenca, que en este caso es de orden 3 (Figura 8).

La relación de bifurcación se define como el cociente entre el número de ríos de orden «j» y el número de ríos de orden «j+1» (Horton, 1945). Según esto, la densidad de la red de drenaje es tanto mayor cuanto mayor es la relación de bifurcación, incrementándose en consecuencia la capacidad de transporte de la red fluvial (Tabla 4).

En consecuencia, los parámetros que determinan el coeficiente de entrega de sedimentos (CES),

Tabla 4. Coeficiente de bifurcación para la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta
Table 4. Bifurcation coefficient for the Puente Alta drainage basin

(1) Orden de Los cauces	(2) Número de cauces	(3) Relación de bifurcación	(4) Número de cauces involucrados	Producto de las columnas 3 y 4
1	22	5.5	26	143
2	4	4	5	20
3	1		Σ = 31	Σ = 163
				Coeficiente de bifurcación = 163/ 31= 5,26

así como la integración de los mismos en el modelo, definen en la cuenca de Puente Alta los valores siguientes: $36 A^2 = 18.76$; $-(2/\log P) = 2.51$; $\log BR = 0.72$; $CES = 22 \%$.

4. Resultados

4.1. Estimación directa

La medida de volumen de aterramiento de la presa de Revenga durante el periodo 1955-1995 aparece recogida en el proyecto de vaciado para la impermeabilización del paramento, realizado por encargo de la concejalía de Obras Públicas del Ayuntamiento de Segovia. En el mismo, se señala: «se comprobó en el fondo del vaso la presencia de bancos de sedimentos con un espesor que variaba en un rango de 2-3 m, estimándose un volumen de 40000 m³» (Rodríguez, 1996).

Aplicando la ecuación de Brown (1943) (1) se obtuvo un coeficiente de retención de sedimentos del 99.6 %. De este modo, se estimó que el volumen real de material evacuado desde la cuenca ver-

tiente al embalse de Puente Alta en el periodo 1955-1995 fue de 40161 m³.

A partir de la estimación de la densidad de los sedimentos, utilizando las relaciones (2) y (3) se estimó que el total de materiales acumulados en el embalse de Puente Alta en el periodo 1955-1995 fue de 62370 toneladas.

Con todos estos datos, y sobre la base la relación matemática (4), la degradación específica media para la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta estimada a partir de la medida directa del aterramiento ha sido de 71 t/km² · año.

4.2. Estimación indirecta

Mediante la integración de cada uno de los factores que definen la USLE utilizando la herramienta *image calculator* de Idrisi 32, se obtuvo una cartografía resultante en la que aparece reflejada la pérdida potencial media de suelo debida a erosión laminar y por arroyada en la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta (Figura 7).

Esta operación da como resultado una tasa de erosión media de 7 t/ha/año, sin embargo, su distri-

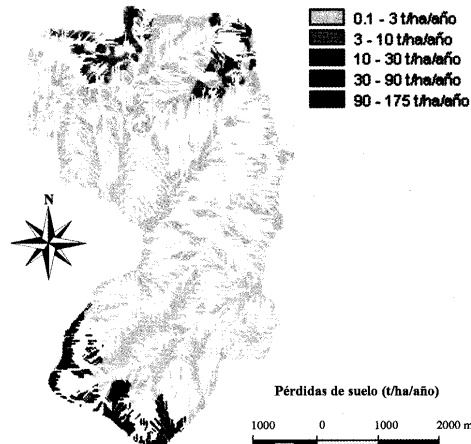


Figura 7. Pérdidas medias anuales de suelo (resultados en t/ha/año) por erosión potencial bruta para la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta
 Figure 7. Average annual soil loss (t/ha/year) by gross erosion for the drainage basin to the Puente Alta reservoir

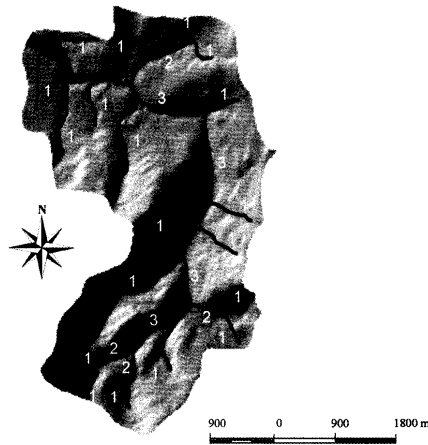


Figura 8. Red hidrográfica de la cuenca de Puente Alta, que presenta un «orden de cauce» 3 para el curso principal
 Figure 8. Model of the hydrologic network of the Puente Alta drainage basin, which shows a 3 order of the main channel

bución espacial en la misma es heterogénea, en función del tipo de uso de suelo, de modo que para cada una de las unidades definidas, las tasas de erosión son: masa forestal densa, 0.4 t/ha/año; pastizal, 0.5 t/ha/año; masa forestal media, 7 t/ha/año; matorral, 15 t/ha/año; cubierta inapreciable; 70 t/ha/año. Por otro lado, se realizó la estimación de la tasa de erosión bruta (*gross erosion*) durante el período temporal (1955-1995), cuyo valor es de 273834 toneladas.

Utilizando la ecuación (5), puede estimarse que el aporte de sedimentos (*AS*) al embalse, o degradación específica obtenida a partir del método indirecto de la USLE corregido mediante la aplicación del coeficiente de entrega de sedimentos (Avendaño et al., 1994), supone un 22 % del total de erosión potencial bruta estimado (273 834 toneladas), lo que extendido al conjunto de la cuenca y al período 1955-1995 da un valor de 69 t/km² · año.

5. Discusión

Los valores de erosión hídrica de la cuenca de Puente Alta son bajos en comparación con los obte-

nidos para otras cuencas españolas en las que se han realizado estudios similares. Así, los resultados de degradación específica obtenidos por el CEDEX (Avendaño et al., 1995) para 23 embalses españoles oscilaban entre 18 y 964 t/km² · año, con una media de 300 t/km² · año. Desgraciadamente, ninguno de los 23 embalses mencionados está situado en Sistema Central, ni goza de características similares, y tampoco existen datos directos de tasas de erosión para la Sierra de Guadarrama, por lo que no existen posibilidades de contrastar los resultados obtenidos con localizaciones fisiográficas análogas.

La distribución espacial de la erosión potencial bruta, tal y como muestran las tasas obtenidas (ver apartado 4.2.), parece ajustarse a las siguientes pautas:

Las zonas cubiertas por masas forestales densas presentan una muy elevada protección ante la erosión hídrica. A pesar de tratarse de un bosque de repoblación de coníferas (*Pinus sylvestris*), los Montes de Valsaín están considerados como ejemplo de buena gestión forestal y protección del suelo contra la erosión.

Las zonas de pastizal también presentan valores muy bajos de erosión potencial. En este sentido, hay que considerar que el bosque de coníferas conserva bastante intacto el sotobosque de la vegetación autóctona (formaciones de robledales); por ello, cuando se crean rodales de pastizal, éstos se componen de un estrato herbáceo altamente protector, por ser muy denso y estar compuesto por un elevado número de especies.

Las zonas de matorral y arbolado disperso presentan valores de erosión potencial que, si bien no son demasiado elevados en una valoración global, son altos. En este caso, a juzgar por las observaciones realizadas en campo, la causa puede deberse al sobrepastoreo.

Las zonas sin cubierta vegetal, o con cubierta vegetal muy discontinua, presentan los mayores valores de erosión potencial. En gran medida corresponden a los canchales o pedreras, formados por derrubios de bloques y grandes bloques de gneises, con una matriz de grava y arena, que en casos puede llegar a actuar como soporte; es esta matriz la que puede ser movilizadada por la erosión hídrica. Sin embargo, la coexistencia de otros procesos en estas zonas (*debris flow*, soliflujión, reptación, etc.) hace aconsejable analizarlas más dete-

nidamente para ver el grado de ajuste entre lo potencial y lo real.

Estos datos coinciden a nivel general con las observaciones de campo, así: en el dominio del bosque prácticamente no hay desarrollo de surcos de incisión por arroyada; sin embargo éstos aparecen en las zonas de cabecera de la cuenca (arroyada pluvio-nival en terrenos de muy alta pendiente) y en la zona de contacto entre las laderas y el piedemonte, fuera del dominio del bosque (arroyada pluvial en terrenos deforestados por sobrepastoreo).

6. Conclusiones

La aplicación de ecuaciones empíricas para la estimación de la erosión hídrica (por ejemplo la USLE), sobre todo en condiciones muy distintas a aquéllas en las que fueron desarrolladas, debe hacerse con precaución y requiere de algún tipo de validación o comprobación en las nuevas condiciones.

La desviación de los resultados de la tasa de degradación específica obtenidas para la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta mediante un procedimiento indirecto, muestra una desviación menor de un 3 % con respecto al dato obtenido directamente a partir del volumen de aterramiento de la presa. En estas circunstancias, en principio parece posible aplicar con un cierto grado de fiabilidad los métodos indirectos a otras cuencas hidrográficas de características fisiográficas similares, teniendo en cuenta que la validez de los resultados se establece de acuerdo con la escala de trabajo, que en este caso ha sido 1:50.000.

En este sentido debe destacarse la utilidad de los sistemas de información geográfica para este tipo de evaluaciones indirectas, en tanto permiten integrar una gran cantidad de datos espaciales, así como extraer información acerca de características físicas de una cuenca; éste es el caso del valor de la pendiente, o de las zonas de circulación preferente de la escorrentía, parámetros éstos a partir de los cuales se puede obtener el factor *LS* de la USLE. Asimismo, constituyen una herramienta con la que se puede evaluar la influencia o variación espacial de cada uno de los factores que definen el modelo en el comportamiento de la cuenca frente a la erosión hídrica. Es decir, permite establecer la distri-

bución espacial de la erosión, y en consecuencia definir aquellas zonas que son la fuente principal de sedimentos en la cuenca.

Agradecimientos

Queremos agradecer a Santiago Peraita, Jefe de la Sección de Vías y Obras del Área de Urbanismo del Ayuntamiento de Segovia, la información proporcionada acerca de las obras de impermeabilización de la Presa de Puente Alta. También queremos agradecer a Javier Donés y al Centro de Montes de Valsain la información y facilidades prestadas.

Referencias bibliográficas

- Aguiló, M. (coord.) (1992). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*. MOPT, Madrid, 809 pp.
- Allué, M. (en prensa). Mapa Forestal de Segovia, Escala 1:50000. En: *Mapa Forestal de España* (J. Sánchez de la Torre, ed.). Dirección General para la Conservación de la Naturaleza (DGONA), Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid.
- Avendaño, C., Calvo, J.P., Cobo, R. & Sanz, M.E. (1993). *La modelización matemática, ajuste y contraste del coeficiente de entrega de sedimentos a los embalses. Aplicación al cálculo de la erosión de cuencas fluviales*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, 1, 210 pp.
- Avendaño, C., Calvo, J.P., Cobo, R. & Sanz, M.E. (1994). *La modelización matemática, ajuste y contraste del coeficiente de entrega de sedimentos a los embalses. Aplicación al cálculo de la erosión de cuencas fluviales*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, 2, 40 pp.
- Avendaño, C., Cobo, R., Gómez, J.L. & Sanz, M.E. (1995). Procedimiento para evaluar la degradación específica de cuencas de embalses a partir de los sedimentos acumulados en los mismos. Aplicación al estudio de embalses españoles. *Ingeniería Civil*, 99, 51-58.
- Brown, C.B. (1943). Discussion of «Sedimentation in reservoirs by J. Witzig» *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 109, 1080-1086.
- Brune, G.M. (1953). Trap Efficiency of Reservoirs. *Transactions of American Geophysical Union*, 34 (3), 407-418.
- Butcher, D.P., Labadz, J.C., Potter, W.R. & White, P. (1993). Reservoir Sedimentation Rates in the Southern Pennine Region, U.K. In: *Geomorphology and Sedimentology of lakes and Reservoirs*. (J. McManus & R.W. Duck, eds.) Wiley, New York, 73-92.
- Forteza, J., Lorenzo, L.F., Najac, N., Cuadrado, S., Ingelmo, F., Hernández, J., García, M.P., Prat, L., Muñoz, C., Macarro, M.C. & Rivas, M.D. (1987). *Mapa de Suelos de Castilla y*

- León (mapa y memoria). Dirección General del Medio Ambiente y Urbanismo (Servicio de Ordenación del Territorio y Cartografía). Junta de Castilla y León, Valladolid, 98 pp.
- Fournier, F. (1960). *Climat et Erosion. La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques*. Ed. Presses Universitaires de France, Paris, 201 pp.
- Glymp, L.H. (1954). Studies of sediment yields from watersheds. *International Association Hydrology, IUGC, 10th General Assembly*, Roma, 1, 178-191.
- Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society America Bulletin*, 56, 275-370.
- ICONA (1988). *Agresividad de la lluvia en España: valor del factor R de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo*. MAPA, Madrid, 39 pp.
- ICONA (1994). *Segundo Inventario Forestal Nacional: 1986 - 1995. Castilla y León. Segovia*. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, Madrid, 24, 238 pp.
- Loch, R.J. (1984). Field rainfall simulator studies on two clay soils of the Darling Downs, Queensland. III. An evaluation of current methods of deriving soil erodibilities (K factors). *Australian Journal Soil Research*, 22, 401-412.
- López, F., Pérez-Soba, A., Aguiló, J., Rabade, J.M., Montalvo, J., Carles, S., Cocero, A., Hernández, L. & Ortega, M. (1987). *Mapa de Estados Erosivos. Cuenca Hidrográfica del Duero*. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, 71 pp.
- Miller, C.R. (1953). Determination of the unit weight of sediment for use in sediment volumen computations. *U.S. Bureau of Reclamations*.
- Monturiol, F. & Alcalá, L. (1990). *Mapa de Asociaciones de Suelos de la Comunidad de Madrid. E.1/200.000*. Instituto de Edafología y Biología Vegetal del C.S.I.C. Comunidad de Madrid, Madrid, 71 pp.
- Moore, I.D. & Burst, G.J. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society American Journal*, 50, 1294-1298.
- Pedraza, J., Bardaji, T., Centeno, J.D. & Fernández, P. (1991). Geomorfología. Mapa y memoria. En: *Mapa Geológico de España, Escala 1:50.000 (Segovia)*, Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
- Rodríguez, A. (1996). *Influencia del transporte de sólidos en embalses. Presa de Puente Alta o de Revenga (Segovia)*. Informe Técnico. (inédito)
- Sanz Montero, M.E., Avendaño, R., Cobo, R. & Gómez, J.L. (1998). Determinación de la erosión en la cuenca del Segura a partir de los sedimentos acumulados en sus embalses. *Geogaceta*, 23, 135-138.
- Strahler, A.N. (1965). *Introduction to Physical Geography*. Wiley, New York, 455 pp.
- Vanoni, V.A. (Ed.) (1975). *Sedimentation Engineering. Manuals and Reports in Engineering Practice*, 54, American Society of Civil Engineers, New York, 745 pp.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1965). Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. *Agr. Handbook No. 282*, USDA, Washington, D.C.
- Yang, C.T. (1971). Potential energy and stream morphology. *Water Resources Research*, 7, 311-322.
- Yang, C.T. (1972). Unit stream power and sediment transport. *J. Hydraul. Div., Proc. Am. Soc. Civil Eng.*, 98 (HY 10), 1805-1826.

Enviado el 19 de febrero de 2001

Aceptado el 2 de septiembre de 2001