

Estimación de aportes sedimentarios a embalses de pequeñas cuencas mediterráneas mediante GeoWEPP. Ensayo en la cuenca vertiente del río Mula al embalse de la Cierva (cuenca del río Segura)

Martínez Salvador, A., Conesa García, C.^{1,*}, García Lorenzo, R.^{1,2} y Pérez Cutillas, P.^{1,3}

¹ Departamento de Geografía Física. Universidad de Murcia. Campus de la Merced, s/n, E-30001 Murcia, España.

² Servicio de Integración e Información Ambiental, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, C/ Catedrático Eugenio Ubeda, 3, 30007 Murcia, España.

³ CEBAS, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Campus de Espinardo, Murcia, España.

* Autor responsable de la correspondencia: cconesa@um.es

Recibido: 03/04/2014

Aceptado: 10/11/2014

ABSTRACT

Application of GeoWEPP to determine sediment supply to reservoirs in small Mediterranean basins. The La Cierva reservoir watershed in the Mula river basin (Segura basin)

The erosion and sediment yield in the Mediterranean Spanish region constitute an environmental serious problem which is mainly being studied during the last decades. Silting is, undoubtedly, an important environmental affection in the reservoirs worldwide and especially in the Mediterranean area. The sediments coming from the drainage basins are retained by dams, causing important effects on the hydro-morphological quality of channels and their aquatic ecosystems. In this study the GeoWEPP spatial erosion modeling tool is applied to evaluate the specific soil degradation in small Mediterranean basins draining water and sediment into headwater reservoirs. The basin of the river Mula flowing to the reservoir La Cierva (Segura basin) was chosen as the pilot study area, since it had enough information (e.g. bathymetric studies, sediment gauging and sedimentological reports carried out by the CEDEX) to check the model outputs. GeoWEPP integrates the simulation of the environmental processes in the basin, in a geographical information system, improving the operability to visualize, analyze and generate new information from the input data. The results (erosion rates, soil loss and sediment discharge) are represented spatially in maps showing the sedimentary contribution of each sub basin.

Key words: GeoWEPP, soil erosion, sediment discharges, reservoirs, small Mediterranean basins, La Cierva reservoir, Segura basin.

RESUMEN

Estimación de aportes sedimentarios a embalses de pequeñas cuencas mediterráneas mediante GeoWEPP. Ensayo en la cuenca vertiente del río Mula al embalse de la Cierva (cuenca del río Segura)

A En toda la vertiente mediterránea española la erosión y, por tanto, la producción de sedimentos es un problema ambiental grave que viene siendo objeto de especial atención en las últimas décadas. La colmatación es, sin duda, una de las principales afecciones ambientales de los embalses a nivel mundial y sobre todo en el ámbito mediterráneo. Los sedimentos procedentes de las cuencas de drenaje son retenidos en gran parte por las presas de los embalses, provocando importantes efectos sobre la calidad hidromorfológica del cauce y los ecosistemas acuáticos afectados. En el presente estudio se propone la aplicación del modelo de base física GeoWEPP para evaluar la degradación específica de pequeñas cuencas mediterráneas que vierten sus aguas y sedimentos a embalses de cabecera. Como área piloto se ha elegido la cuenca del río Mula vertiente al embalse de la Cierva (Cuenca del Segura), por disponer ésta de datos técnicos suficientes (estudios batimétricos, aforos de sedimentos e informes sedimentológicos realizados por el CEDEX) con los que poder cotejar los resultados de dicho modelo. GeoWEPP integra la simulación de procesos ambientales de la cuenca en un sistema de información geográfica, ganando así operatividad a la hora de visualizar, analizar y generar nueva información a partir de los datos de entrada. Los resultados

(tasas de erosión, liberación y aportes de sedimentos) son representados espacialmente en mapas que muestran el grado de contribución de cada subcuenca.

Palabras clave: GeoWEPP, erosión, aportes de sedimentos, embalses, pequeñas cuencas mediterráneas, embalse de La Cierva, Cuenca del Segura.

INTRODUCCIÓN

Desde hace más de un siglo la gestión de las aguas superficiales en la región mediterránea ha estado estrechamente ligada a la problemática de la erosión del suelo y la degradación ambiental y, en particular, a la lucha contra la desertificación. Un indicador particularmente relevante del grado de erosión y degradación ambiental en cuencas vertientes a embalses lo constituye el ritmo de colmatación de sus vasos receptores. Las consecuencias ambientales de dicha colmatación van más allá de la pérdida de volumen embalsable, ya que también afectan al funcionamiento general de los ecosistemas acuáticos en ellos desarrollados (Palau, 2002). En la actualidad, la colmatación de embalses es un problema ambiental de primer orden, en particular en países como España, donde la erosión afecta a gran número de ríos regulados (López Bermúdez, 1986; Almorox *et al.*, 1994; Saa *et al.*, 1995; De Antonio *et al.*, 1995; Cobo *et al.*, 1996; Avendaño *et al.*, 1997a, Avendaño *et al.*, 1997b; Sanz Moreno *et al.*, 1998; Avendaño, 2002; Romero Díaz *et al.*, 2011). El creciente nivel de aterramiento de los embalses en España suponía, ya a principios de la década de 1990, una reducción media de su capacidad útil en torno al 20 % (CODA, 1993, Almorox *et al.*, 1994). En el caso de la Cuenca del Segura, son muchas las áreas que registran altas tasas de erosión (ICONA, 1988; CORINE, 1992; López Bermúdez & Romero Díaz, 1992; MMA, 2002; Romero Díaz *et al.*, 1992, 2011) y, por ende, los embalses que presentan un fuerte ritmo de relleno, con tasas de colmatación anuales de 0.56 a 1.14 % que superan la media nacional (embalses de Valdeinfierno, Camarillas, Talave, Alfonso XIII, Puentes o La Cierva) (Cobo, 2008).

El seguimiento del grado de sedimentación y colmatación de los embalses ofrece, por tanto,

una excelente medida directa sobre la pérdida de capacidad de sus vasos y el grado de degradación del suelo en sus respectivas áreas vertientes. Sin embargo, a menudo la ausencia de datos de aforo de sedimentos a la entrada de los embalses o de registros batimétricos hace necesario estimar la erosión del suelo y la consiguiente producción de sedimentos mediante el uso de modelos de predicción y evaluación. Existen diversos modelos—como la USLE, RUSLE, SOLOSS o EPIC— que permiten calcular las tasas de erosión del suelo a partir de los tipos de usos y las técnicas de manejo, junto a otras variables de carácter pluviométrico y topográfico. No obstante, ninguno de ellos resulta adecuado para la evaluación de la erosión hídrica en zonas abarrancadas, e incluso en algún caso, como la RUSLE, las tasas de erosión obtenidas en sectores montañosos son inferiores a las estimadas con métodos que basan su predicción en el análisis discreto de sucesos pluviométricos (Renard & Simanton, 1990). Ambos fenómenos, abarrancamiento y sucesos de tormentas, forman parte indiscutible de la caracterización ambiental de la mayoría de subcuencas que componen la Cuenca del Segura y, como tales, deben ser contemplados en los modelos de erosión que pretendan aplicarse en dichas zonas. Existe un amplio compendio de estudios que resaltan la importancia de la erosión en áreas abarrancadas dentro del cómputo total de pérdidas de suelo (De Ploey, 1990; Poesen *et al.*, 1996; Poesen & Hooke, 1997). Para la región Mediterránea, Poesen *et al.* (1996) mostraron que la erosión de los barrancos es con mucha diferencia la fuente productora de sedimentos más importante en las zonas altas de las cuencas y áreas vertientes. A pesar de la importancia de este tipo de erosión han sido pocos los modelos de base física desarrollados para predecir la pérdida de suelo originada por el abarrancamiento (p. e. CREAMS, WEPP, EGEM)

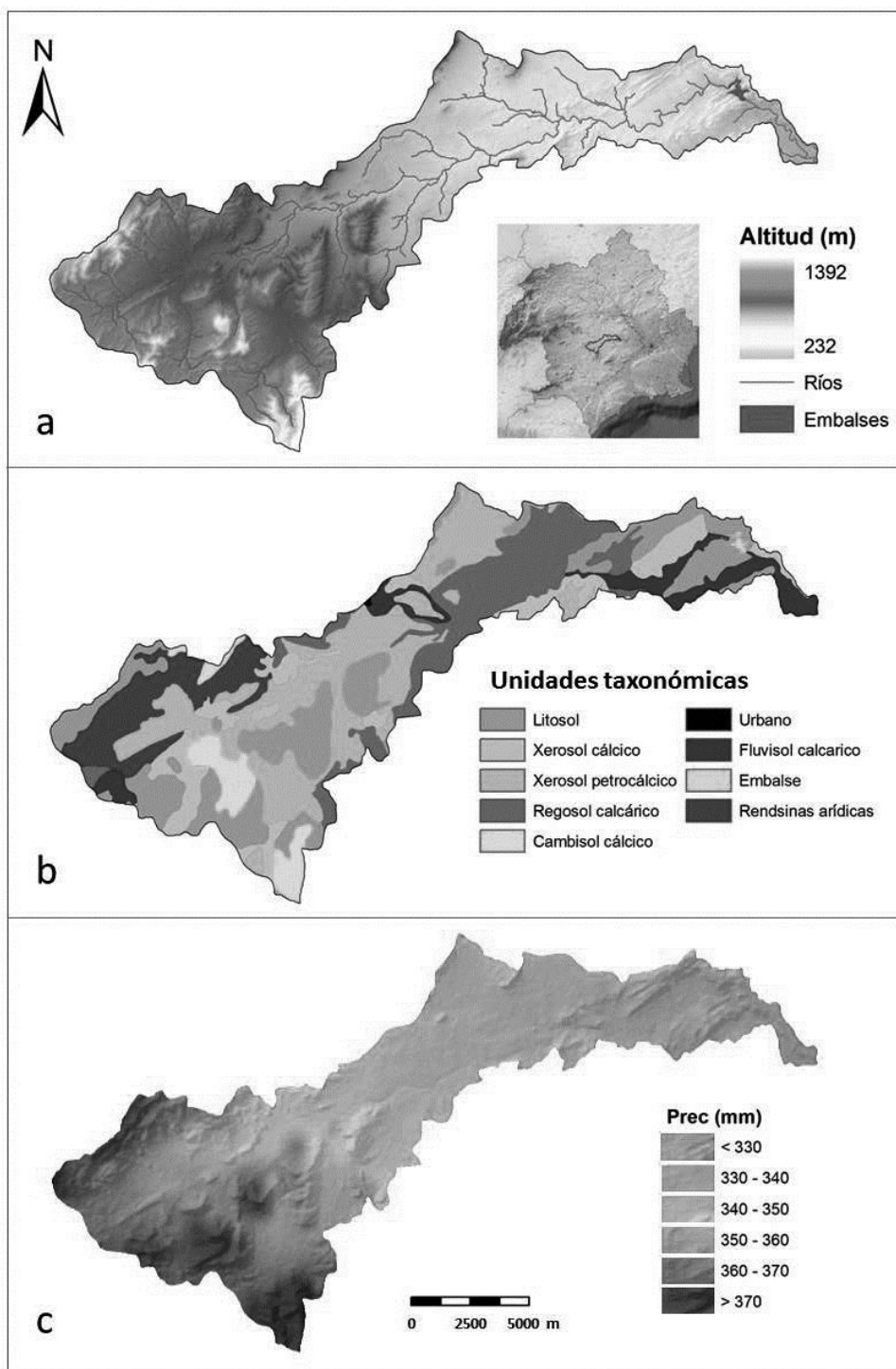


Figura 1. Situación del área de estudio en el contexto de la Cuenca del Segura y mapa de altitudes relativas (a); distribución espacial de tipos de suelos (b) y de precipitación media anual (c). *Location of the study area in the Segura basin and altitude map (a); spatial distribution of soil types (b) and average annual precipitation (c).*

Tabla 1. Tipos de suelo observados en el área de estudio y su correspondencia con la Soil Taxonomy y las descripciones oficiales de series de suelos (OSD) USDA. *Soil types in the study area and their equivalents in the Soil Taxonomy System and the Official Soil Series Descriptions (OSD), USDA.*

FAO	Soil Taxonomy	OSD (USDA)
Fluvisol Cálculo	Entisols Fluvents	Santo (CA)
Xerosol Cálculo	Aridisols Argids Calciargids	Onite (NM)
Regosol Cálculo	Entisols Orthens Xerothents	San Timoteo (cA)
Litosol	Entisols Ustorthens	Kim (CO)
Xerosol Petrocálculo	Aridisols Calcids Petrocalcids	Harrisburg (NM)
Cambisoles cálcicos	Inceptisol usteps Haplusteps	Shep (TX)
Rendsinas Aridicas	Mollisols Ustolls Haplustolls	Aladdin (NM)

(Conesa García & García Lorenzo, 2007; García Lorenzo *et al.*, 2009). De ellos, sólo el modelo WEPP ha sido objeto de análisis en este artículo. Se trata de un modelo de erosión, basado en la dinámica de laderas, que simula las condiciones climáticas, de infiltración, balance hídrico, laboreo y consolidación del terreno para predecir la escorrentía superficial, la pérdida de suelo y la producción de sedimentos en un rango amplio de escalas temporales (sucesos de tormenta, totales mensuales, anuales o un valor medio anual de series largas).

El presente estudio tiene como principal objetivo comprobar la bondad del modelo WEPP a través de su interfaz geoespacial (GeoWEPP), para la predicción de la erosión hídrica en pequeñas cuencas fluviales mediterráneas de orografía accidentada. En concreto, se ha aplicado al área vertiente del embalse de la Cierva (cuenca del río Mula, afluente del Segura) con el fin de cotejar sus resultados (liberación y producción de sedimentos, aportes sólidos y degradación específica de la cuenca) con los obtenidos a partir de afloros de sedimentos y datos batimétricos del citado embalse. Existen, además, informes técnicos y registros sedimentológicos de dicho embalse realizados por el CEDEX, que, junto con diversos trabajos (López Bermúdez & Gutiérrez Escudero, 1982; De Antonio *et al.*, 1995; Sanz Montero *et al.*, 1998; Cobo, 2008), proporcionan datos de erosión del suelo y degradación específica del área de estudio, susceptible de ser contrastada con los resultados aquí mostrados. Otro objetivo destacable dentro del trabajo es detectar, mediante la cartografía generada por GeoWEPP, las

áreas ambientalmente frágiles, productoras de sedimentos, y los tramos de cauce con mayor carga sedimentaria.

ÁREA DE ESTUDIO Y CONDICIONES AMBIENTALES

Como área de estudio se ha elegido la cuenca vertiente del río Mula al embalse de la Cierva (Cuenca del río Segura). Cuenta con una extensión de 164 km², repartida entre los términos municipales de Cehegín, Bullas, Mula y, en menor proporción, Lorca. El río Mula nace de la confluencia de varias ramblas y barrancos que drenan de las sierras de Burete, Lavia y Cambrón.

En su conjunto, el relieve se compone de una cabecera montañosa a la que suceden aguas abajo llanuras y formas onduladas, salpicadas de pequeños cerros y entalladas por cauces efímeros que confluyen en el río Mula. La altitud media de la cuenca (719 m) enmascara un importante contraste entre las tierras altas y bajas, siendo su altitud máxima y mínima de 1392 m y 232 m respectivamente (Fig. 1a). Estas formas de relieve, encuadradas dentro del dominio Subbético, son resultado de la orogenia alpina y de manifestaciones tectónicas posteriores (post-pliocenas), asociadas a una etapa compresiva y de acortamiento cortical, que deformaron las estructuras previas y crearon focos sísmicos, afloramientos de rocas subvolcánicas y fallas de desgarre (Rodríguez Estrella & Navarro Hervás, 2001). En las sierras de la cabecera afloran calizas y dolomías del Lías, margas silíceas del Malm y calizas margosas del

Dogger, en tanto que en la parte media y baja de la cuenca abundan los sedimentos aluviales del Cuaternario y las margas del Mioceno Superior respectivamente. Sobre estos materiales se han desarrollado suelos muy diversos, entre los que dominan los Xerosoles cálcicos y Regosoles cálcicos (Fig. 1b). La elevada aridez del clima hace que la vegetación sea escasa, rala y de marcado carácter xerófilo. Sólo en las zonas de montaña aparece el típico matorral mediterráneo asociado a bosques de *Pinus halepensis*, mientras que en los tramos de ribera abunda el taray (*Tamarix canariensis*) y el carrizo (*Phragmites australis*).

El predominio de materiales blandos (margas, limos y arcillas), unido a las condiciones climáticas semiáridas (Fig. 1c) (escasa pluviosidad anual -329 mm en el embalse de la Cierva y en torno a 370 mm en la zona de cabecera-, régimen pluviométrico irregular y lluvias torrenciales) y a una escasa cubierta vegetal, hacen de esta cuenca un territorio especialmente vulnerable a la erosión. Las mayores pérdidas de suelo y cargas de sedimentos se producen cuando sobrevienen fuertes aguaceros. Bajo tales condiciones, el río Mula y sus principales tributarios sufren importantes y rápidas avenidas (*flash floods*) con abundante carga sólida.

MODELIZACIÓN CON GEOWEPP: FUNCIONES Y DATOS EMPLEADOS

El WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) (USDA, 1995) es un modelo basado en procesos de simulación continua, aplicable a pequeñas áreas vertientes y perfiles de ladera con el fin de evaluar diversas opciones de gestión y conservación de suelos y aguas a partir de sus diferentes usos del suelo (Ascough II *et al.*, 1997). El modelo WEPP representa una nueva propuesta tecnológica para la predicción de la ero-

sión basada en fundamentos de generación estocástica de datos meteorológicos, teorías de infiltración, hidrología, hidráulica, física del suelo, comportamiento de la cubierta vegetal y mecanismos de erosión (Flanagan *et al.*, 1995; Wu *et al.*, 2000; Maalim *et al.*, 2013). Junto a las mejoras de la interfaz Windows de WEPP se han incorporado nuevos módulos adicionales que permiten efectuar simulaciones WEPP basadas en el empleo de fuentes de información digitales mediante su vinculación con Sistemas de Información Geográfica (SIG). La interfaz geoespacial para WEPP (GeoWEPP) utiliza fuentes de información digital geo-referenciada tales como modelos digitales de elevación (DEM) y mapas topográficos con objeto de obtener y preparar parámetros de entrada válidos, de acuerdo con los usos y tipos de suelo de pequeñas áreas y cuencas vertientes. El sistema se simplifica asignando un único uso y textura de suelo a cada subcuenca dentro del área vertiente analizada. En el presente estudio se han utilizado el modelo WEPP v.2012.8 (USDA-ARS, 2014), generadores de series climáticas CLIGEN v.5.3 (USDA-ARS, 2014) y la interfaz GeoWEPP. El programa GeoWEPP se ejecuta como un proyecto de ArcGIS, donde un módulo de modelización permite obtener un mapa de producción de sedimentos a partir del *método de cuenca o área vertiente (Watershed Method)*. Estos datos de salida son generados en ArcGIS como capas grid de producción de sedimentos y de sus valores tolerables (TSL).

Datos de entrada

- *Variables climáticas de entrada.* GeoWEPP permite la descarga por Internet de los datos climáticos correspondientes a un amplísimo número de estaciones a través de páginas web vinculadas a la NOAA y al USDA. Aunque

Tabla 2. Distribución superficial de los usos de suelo en el área vertiente al embalse La Cierva. *Distribution of land uses in La Cierva reservoir watershed.*

Forestal		Matorral		Cultivos de secano		Cultivos de regadío		Infraestructuras		Cuerpos de agua		Tierras en barbecho	
ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
5945	36.3	2297	14.0	3453	21.0	953	5.8	958	5.8	13	0.1	2785	17.0

los datos de algunos observatorios situados en el ámbito mediterráneo norteamericano son parecidos a los existentes en la zona de estudio, se ha optado por utilizar bases de datos propias, en concreto la serie de precipitación diaria del período 1982-2012, correspondiente al observatorio del embalse de La Cierva, gestionado por la Confederación Hidrográfica del Segura. Tales datos han sido interpolados con información de estaciones vecinas y ajustados con datos LIDAR a través del modelo PRIMs (*Parameter Elevation Regressions on Independent Slopes Model*) (Elliot & Hall, 2000).

- *Variables topográficas (pendientes)*. Las cuencas, subcuencas, cauces y pendientes han sido obtenidos mediante la aplicación de TOPAZ (*Topographic Parameterization Program*) desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-ARS), utilizando el MDT de 5x5 m LIDAR que proporciona el Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- *Variables edáficas*. Incluyen las categorías de suelo definidas para el área, de acuerdo con los sistemas de clasificación Soil Taxonomy y OSD (USDA) (Tabla 1) a partir de la información extraída de los mapas 1/100 000 de suelos del Proyecto de Lucha contra la Desertifica-

ción en el Mediterráneo LUCDEME (ICONA, 1986).

- *Variables relacionadas con los usos del suelo*. Los ficheros de este tipo (*management files*) contienen información sobre la cantidad de cubierta vegetal e indicadores de actividad vegetativa durante el período de simulación. Para cada subcuenca, dentro del área vertiente al embalse, se ha construido un fichero de usos del suelo, basado en los datos extraídos de una imagen SPOT de 10 × 10 m, de fecha 6 de junio de 2012, disponible en el Plan Nacional de Teledetección (PNT). La misma imagen fue objeto de una clasificación supervisada (índice kappa = 0.91), dando como resultado el mapa de la figura 2 y la distribución porcentual de usos de la Tabla 2.

Algoritmos del proceso de simulación

La erosión en sectores de laderas es representada como dos componentes en el modelo de WEPP: la porción de partículas de suelo desprendidas por la acción de la lluvia y transportadas por una corriente laminar delgada, conocida como componente de erosión *interrills*, y la porción de partículas de suelo movilizadas por la tensión de corte y transportada por un flujo de carácter

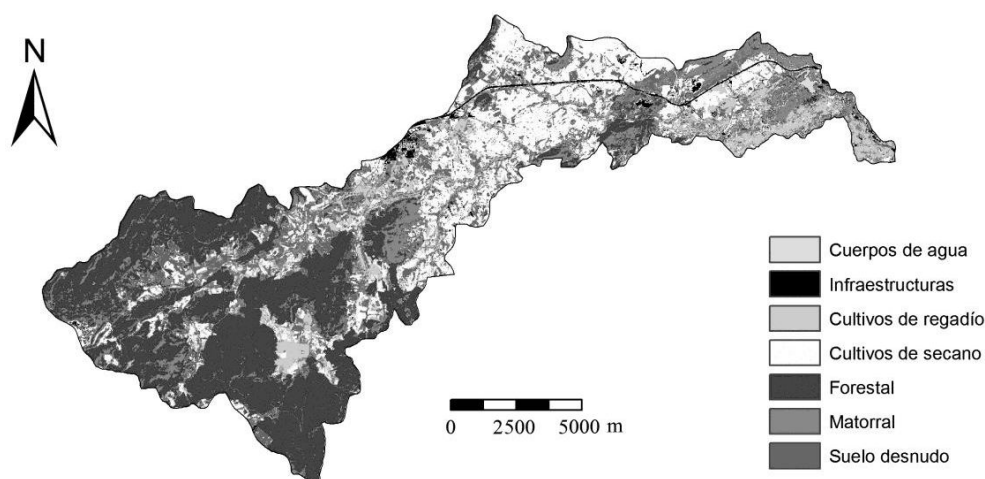


Figura 2. Usos del suelo de la cuenca vertiente al embalse de la Cierva obtenidos mediante clasificación supervisada de la imagen SPOT del 6 de junio de 2012. *Land uses in La Cierva reservoir watershed, obtained using supervised classification techniques, SPOT image 6, June 2012.*

concentrado, denominado componente de erosión en surcos. La ecuación de continuidad de sedimentos en régimen estable empleada para estimar el desprendimiento neto de partículas en las laderas se expresa como (Foster *et al.*, 1995):

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \quad (1)$$

donde G = carga de sedimentos ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) a la distancia x desde el origen de la ladera, x = distancia pendiente abajo (m), D_i = tasa de liberación de sedimentos *interrills* ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) y D_f = tasa de erosión en surcos ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). La función de la erosión *interrills* de la ecuación arriba indicada es dada por Foster *et al.* (1995):

$$D_i = K_{iadj} I_e \sigma_{ir} SDR_{RR} F_{nozzle} \left(\frac{R_s}{w} \right) \quad (2)$$

siendo K_{iadj} = erosionabilidad interrills ajustada ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), I_e = intensidad de la precipitación efectiva (mm/h), σ_{ir} = tasa de escorrentía interrills (mm/h), SDR_{RR} = ratio de liberación de sedimentos interrills, F_{nozzle} = factor de ajuste de las variaciones de energía del flujo, que adopta valor 1 en condiciones naturales, R_s = espaciado entre surcos (m), w = anchura del surco (m) y D_f = función de erosión en surcos, cuya expresión es:

$$D_f = K_{radj} (\tau_f - \tau_{cadj}) \left(1 - \frac{R_s}{w} \right) \quad (3)$$

Tabla 3. Valores de simulación medios anuales obtenidos mediante el método Watershed de WEPP para las laderas representativas de la cuenca vertiente al embalse La Cierva. *Simulated mean annual values for the main basin hill slopes using the Watershed method of GeoWEPP.*

Laderas	Volumen escorrentía (m ³)	Volumen flujo subsuperficial (m ³)	Pérdida de suelo (t)	Producción sedimentos (t)	Deposición sedimentos (t)
1	20 368.8	1.06	4449.96	4192.89	257.11
2	9376.6	0.49	858.01	858.01	0.00
3	179.4	0.00	28.87	28.87	0.00
4	331.1	0.13	20.65	20.65	0.00
5	2473.6	0.10	109.16	94.49	14.67
6	1320.9	0.00	659.16	659.16	0.00
7	640.4	1.89	0.24	0.24	0.00
8	3561.5	0.49	133.92	132.52	1.40
9	146.2	1.14	0.05	0.05	0.00
10	9691.8	0.00	4289.21	3402.53	886.68
11	277.0	0.55	0.10	0.10	0.00
12	1162.9	0.27	172.72	172.50	0.22
13	0.0	1.63	0.00	0.00	0.00
14	2521.5	0.14	76.21	75.36	0.85
15	8516.8	0.09	3375.71	3008.44	367.25
16	0.0	2.68	0.00	0.00	0.00
17	12 762.4	0.34	2595.47	1338.89	1256.60
18	16 269.4	0.65	390.53	283.19	107.35
19	0.0	5.89	0.00	0.00	0.00
20	14 341.9	1.65	1155.23	952.10	203.13
21	19 932.6	1.18	2253.59	2253.57	0.00
22	12 306.4	0.00	884.99	884.99	0.00
23	0.0	3.60	0.00	0.00	0.00
24	3591.3	1.78	121.40	40.78	80.61
25	3300.6	0.00	102.43	102.43	0.00
26	1808.3	1.15	65.40	59.43	5.96
27	2782.2	4.47	235.45	212.35	23.09
28	1987.9	1.33	113.15	73.77	39.39
29	1412.8	1.52	37.75	37.76	0.00
30	33 522.4	1.82	5031.86	5031.84	0.00
31	0.0	14.31	0.00	0.00	0.00
32	730.0	0.26	53.67	53.66	0.00

donde K_{radj} = parámetro ajustado de erosionabilidad del suelo ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), τ_f = tensión de corte de la corriente ($\text{kg}/\text{m}/\text{s}^2$), τ_{cadj} = tensión crítica ajustada de la superficie del surco ($\text{kg}/\text{m}/\text{s}^2$). Finalmente, C_t (capacidad de transporte de la corriente concentrada en surcos, expresada en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) se estima de acuerdo con la fórmula (Foster *et al.*, 1995; Huang & Bradford, 1993):

$$C_t = K_{tr} q_w S \quad (4)$$

en la que K_{tr} = coeficiente de transporte K_t ($\text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$) calibrado por Finkner *et al.* (1989) en función de la tensión del flujo, q_w = caudal por unidad de anchura (m^2/s), y S = pendiente longitudinal (%). La ecuación de deposición es dada por Foster & Meyer (1972) en los términos:

$$\frac{dG}{dx} = \frac{\beta_r V_f}{q_w} (C_t - G) + D_i \quad (5)$$

V_f = velocidad efectiva de sedimentación (m/s) y β_r = coeficiente de turbulencia de las gotas de lluvia (0-1). Los parámetros de las ecuaciones 1 y 5 están normalizados con los valores de los parámetros correspondientes a la condición de vertiente uniforme. Finalmente, dichas ecuaciones son resueltas por el modelo para estimar la erosión del suelo y la deposición en un punto con-

creto de la cuenca durante el intervalo de tiempo considerado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Además de las salidas ráster, GeoWEPP ha permitido crear ficheros de texto que incluyen, a modo de resumen, la precipitación media anual y el número de tormentas, la escorrentía total, la pérdida de suelo y la producción de sedimentos para cada subcuenca y para el área vertiente total al embalse de La Cierva. Los resultados sobre escorrentía y pérdida de sedimentos de cada píxel son generados en archivos de texto que pueden ser también importados a ArcGIS para su visualización. Las tablas resultantes proporcionan información de las subcuencas y los cauces, además de los valores de escorrentía que dependen del procesamiento de datos climáticos y de la textura del suelo. Los primeros resultados obtenidos son la generación de la red de drenaje y la delimitación de las subcuencas que vierten directa o indirectamente sus aguas al embalse (Fig. 3). Los límites de dichas áreas coinciden prácticamente con los establecidos mediante el SIG GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*), lo que demuestra el buen ajuste de TOPAZ, ya probado en otros estudios (Ashley, 2003).

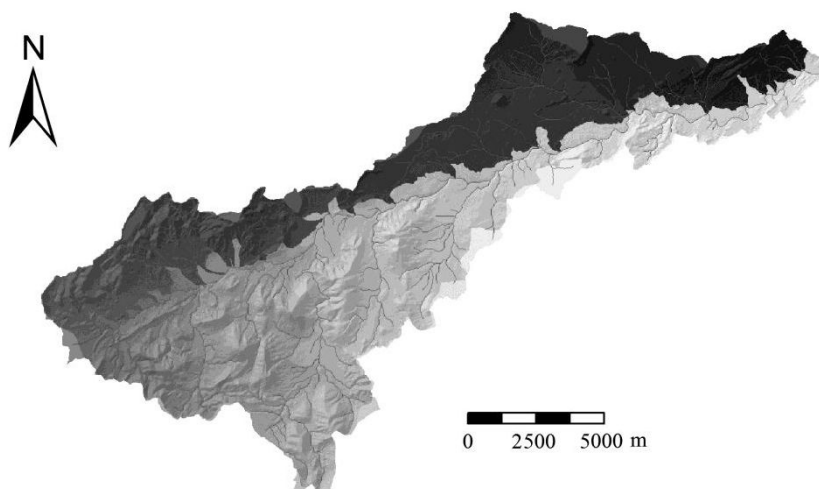


Figura 3. Red de drenaje y subcuencas generadas por GeoWEPP en el área vertiente al embalse de La Cierva. *Drainage network and subbasins delimited using GeoWEPP for La Cierva reservoir watershed.*

Una vez definidas las subcuencas y redes de drenaje, WEPP proporciona información relativa a escorrentía, pérdida de suelo, deposición de sedimentos y producción de sedimentos a partir de laderas y tramos de cauce. Los valores de simulación medios anuales obtenidos por el método Watershed de WEPP se muestran en las Tablas 3, 4 y 5, y se visualizan en un mapa de producción de sedimentos (Fig. 4).

Dado que ArcGIS no permite representar valores negativos en los mapas ráster, los resultados de la evaluación son cartografiados como una medida relativa a una pérdida de suelo tolerable o valor tipo (T). El concepto de valor T (Schertz, 1983) describe en teoría la tasa de reemplazamiento anual de un tipo de suelo para mantener un uso del suelo sostenible. El servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) de la USDA implementó T para gran número de lugares, en función de las propiedades de las raíces que limitan las capas de suelo subsuperficial, las características de cada región climática y el potencial económico de los suelos y recursos naturales. Los valores de T así deducidos se sitúan normalmente en torno a $11.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Con el fin de representar mejor las diferencias de producción de sedimentos en la salida cartográfica del presente estudio, se ha adoptado como criterio $T = 5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Las tasas tolerables se sitúan normalmente por debajo de dicho umbral T , y se representan en tonos verdosos, mientras que las no tolerables aparecen en rojo (Fig. 4). Como se muestra en esta figura, la producción de sedimentos oscila entre 0 y $25 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Las áreas que superan las tasas de $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ se hallan principalmente localizadas en la parte media y baja del área vertiente al embalse, que representan en torno al 45 % de la superficie total. En la zona media existe un predominio de cultivos de secano y de suelos del tipo regosol cálcico formados a partir de materiales no consolidados, lo que, unido a la presencia de pendientes entre el 5 y 10 %, favorece los procesos de erosión. En el tramo bajo, se combinan pendientes superiores al 30 % con suelos del tipo litosol y materiales detríticos sueltos, parcialmente cubiertos por una vegetación rala de matorral, que generan tasas superiores a $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ e incluso a $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Fig. 4). Esta situación contrasta notablemente con la zona de cabecera, caracterizada por una extensa cubierta forestal y tasas de producción de sedimentos por debajo de $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Además de las salidas ráster, GeoWEPP genera archivos de texto que ofrecen información sobre precipitación media anual, número de tormentas, escorrentía total y pérdidas de suelo. Uno de estos archivos se resume en la Tabla 4, que

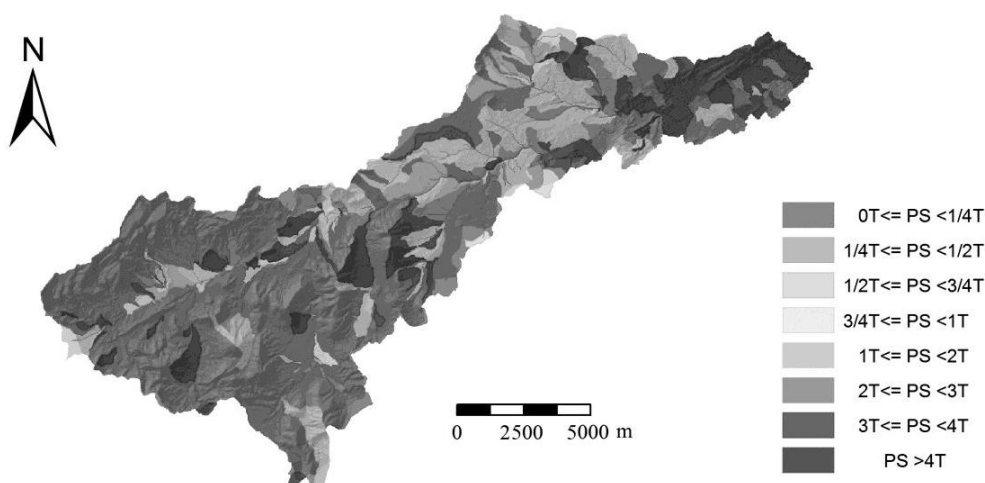


Figura 4. Tasas de producción de sedimentos estimada por GeoWEPP para el área vertiente al embalse de La Cierva. $T = 5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; PS = producción de sedimentos. *Sediment yield rates estimated for La Cierva reservoir watershed using GeoWEPP.* $T = 5 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$; PS = sediment yield.

muestra los datos de escorrentía superficial y de producción de sedimentos obtenidos con el método *Watershed* para todos los cauces de la cuenca. El volumen medio anual de escorrentía por cauce ($42.21 \cdot 10^3 \text{ m}^3$) enmascara diferencias muy acusadas entre unos y otros tramos, desde menos de $10 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ hasta más de $90 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ en los casos más extremos (desviación estándar = $38.36 \cdot 10^3 \text{ m}^3$). También resulta desigual la contribución sedimentaria de cada cauce (media de 3.35 t/año/cauce con una desviación estándar de 2.79 t/año/cauce). La Tabla 4 proporciona, además, información sobre el área total de contribución al embalse, el caudal medio anual ($1.74 \text{ hm}^3/\text{año}$) y la carga sedimentaria media anual ($63.74 \cdot 10^3 \text{ t/año}$) aportados al embalse, la producción de sedimentos por unidad de superficie (3.9 t/ha/año) y la ratio de liberación de material (0.24).

Del volumen de sedimentos aportados al embalse y de la superficie total que contribuye a dicha aportación se deduce una degradación específica (D. E.) del área vertiente en torno a 38 850 t/ha/año. Esta tasa ha sido comparada con las estimadas por otros autores a partir de estudios bati-

métricos realizados desde 1967 por la Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (M.O.P.T.), a través del Centro de Estudios Hidrográficos (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX). Tales estimaciones se basan en la superficie de la cuenca, el volumen de sólidos retenidos por la presa, la densidad media de los sedimentos y el número de años transcurridos desde la puesta en carga de la presa hasta la fecha del reconocimiento batimétrico. Los valores más altos dados por López Bermúdez & Gutiérrez Escudero (1982) se explican porque fueron obtenidos para un período con frecuentes episodios de lluvias torrenciales (1929-1976), considerando una densidad media de los sedimentos de 2.5 gr/cm^3 y una superficie de cuenca menor que el resto de autores. Posteriormente, la elaboración de informes técnicos sedimentológicos y de aforos de sólidos, unido a la realización de nuevas campañas batimétricas (CEDEX, 1987, 1992), ha hecho posible contar con una información más detallada y precisa. Por dichos informes se conoce mejor la textura, la densidad y el peso específico de los

Tabla 4. Valores de simulación medios anuales obtenidos mediante el método *Watershed* de WEPP para los cauces de la cuenca vertiente al embalse La Cierva. *Simulated mean annual values for the channels draining into the La Cierva reservoir using the Watershed method of GeoWEPP.*

Cauces	Volumen de escorrentía (m^3)	Producción de sedimentos (t/año)	Valores medios y ratios
1	34 957.3	5331.1	Área total de drenaje = 16 409.23 ha. Caudal aportado a la desembocadura = 1 744 564 $\text{m}^3/\text{año}$. Pérdida media de suelo en laderas = 180 721.6 t/año. Pérdida media de suelo en cauces = 84 686.5 t/año. Carga sedimentaria en la desembocadura = 63 742.5 t/año. Producción por área unitaria de cuenca vertiente = 3.9 t/ha/año. Ratio de liberación de sedimentos para el área vertiente = 0.24.
2	22 094.6	2002.9	
3	41 289.8	6730.7	
4	11 314.3	714.7	
5	22 618.9	1611.4	
6	20 267.3	892.9	
7	33 105.7	2881.5	
8	22 582.3	2362.1	
9	64 074.2	4170.4	
10	34 477.4	5713.9	
11	8759.8	609.0	
12	3159.0	86.8	
13	32 765.1	1516.9	
14	35 960.5	1879.4	
15	65 301.9	2911.6	
16	99 770.8	6690.8	
17	165 134.9	10 852.9	

58 tormentas producidas en dos años aleatorios de la serie; 16 sucesos produjeron una escorrentía media anual de 20.63 mm a la entrada del embalse de La Cierva.

sedimentos que rellenan el vaso del embalse, las técnicas batimétricas empleadas y el régimen de explotación del embalse (Avendaño *et al.*, 1995).

De Antonio *et al.* (1994), Sanz Moreno *et al.* (1998) y De Vente *et al.* (2008) han utilizado los datos recogidos en dichos informes y memorias, basando, por tanto, sus estimaciones de degradación específica en el volumen de sedimentos acumulados en un embalse durante un periodo determinado. En realidad, los sedimentos retenidos por la presa no constituyen la totalidad de los aportes sólidos que llegan al embalse. Parte de ellos se pierden por los aliviaderos. Para estimar el porcentaje de sólidos atrapados, se adopta la fórmula del coeficiente de retención de Brown (Cr) (1943). Una vez obtenido dicho coeficiente, se aplica al valor de D.E.' para calcular la degradación específica final de la cuenca (D.E.) según la expresión $D.E. = D.E.' \cdot [1 + (1 - Cr/100)]$, donde D.E.' es el producto de la aportación sólida media anual al embalse por la densidad de los sedimentos, dividido por la superficie de la cuenca. El valor de densidad de los materiales retenidos en el embalse de la Cierva que figura en dichos informes técnicos y que adoptan los citados autores es de 1.11 g/cm³. Este hecho justifica que los valores de degradación específica de la cuenca (entre 2.55 y 2.79 t/ha/año) y de aportes de sedimentos (entre 43 350 y 46 612 t/año) por ellos estimados sean inferiores a la mitad de los calculados por López Bermúdez y Gutiérrez Escudero (1982) y algo menores que los ofrecidos por GeoWEPP (Tabla 5).

GeoWEPP utiliza la tabla de valores de densidad aparente adoptados por USDA-NRCS de acuerdo con la textura del sedimento (www.mn.nrcs.usda.gov), lo que en este caso significa una densidad media de 1.43 g/cm³. Ello, unido a que el modelo genera, a partir de los tipos de suelo considerados, un mayor porcentaje de arcillas que el reseñado por el CEDEX (1992) en su informe sedimentológico del embalse (Tablas 6 y 7), explica que la degradación específica de la cuenca supere en 1.2 t ha⁻¹ año⁻¹ la calculada según dicho informe. No se descarta tampoco que, a lo largo de su explotación (desde 1929) el embalse de la Cierva haya desaguado importantes volúmenes de “fangos”

Tabla 7. Textura de los sedimentos según datos del informe sedimentológico del embalse de La Cierva (CEDEX, 1990) y los estimados por GeoWEPP. *Sediment texture according to the sedimentological report on La Cierva reservoir (CEDEX, 1990) and that obtained by GeoWEPP.*

Material	Distribución porcentual (%)	
	(CEDEX, 1990)	(GeoWEPP)
Arena	9.66	4.10
Limo	66.84	61.90
Arcilla	23.50	34.00

por las compuertas de fondo, disminuyendo así los sedimentos retenidos.

Por otra parte, la estimación de GeoWEPP se refiere a la aportación total de sedimentos al embalse bajo unas condiciones ambientales dadas (período de análisis climático 1982-2012, usos del suelo correspondientes a junio de 2012), que difieren de las existentes entre las fechas de batimetría consultadas (período 1929-1986). Debe tenerse en cuenta, además, que dependiendo del software utilizado pueden generarse áreas de drenaje diferentes. La superficie total vertiente obtenida con el módulo TOPAZ de GeoWEPP es ligeramente inferior a la delimitada por el CEDEX y superior a la estimada por López Bermúdez & Gutiérrez Escudero (1982). Bajo tales premisas el modelo GeoWEPP puede constituir una aproximación metodológica aceptable para el cálculo de aportes sedimentarios a embalses de cuencas mediterráneas de tamaño similar o inferior al adoptado en el presente estudio. También puede ser empleado como alternativa a los métodos basados en batimetrías, especialmente cuando existe incertidumbre en los datos disponibles, carencia de medidas continuas de caudales sólidos, series de información cortas o de calidad confusa y/o falta de informes sedimentológicos de embalses, entre otras.

CONCLUSIONES

El modelo GeoWEPP, desarrollado en entorno ArcGIS, ha demostrado ser un buen instrumento para estimar la producción de sedimentos y la pérdida de suelo de una forma espacialmente distribuida en pequeñas cuencas mediterráneas de cabecera. Las tasas de liberación y aportes de se-

Tabla 5. Valores medios anuales de degradación específica y de aportes de sedimentos estimados por diversos autores para la cuenca vertiente al embalse de La Cierva, en comparación con los obtenidos por GeoWEPP en el presente estudio. *Average annual rates of soil erosion and sediment discharge estimated by different authors, compared with those produced using GeoWEPP, in La Cierva reservoir watershed.*

Embalse	Superficie (km ²)	Degradación (t/km ² /año)	Aportes (t/año)	Autor/año
La Cierva	156	665	103 850	López Bermúdez y Gutiérrez Escudero (1982)*
	170	255	43 350	De Antonio <i>et al.</i> (1995)*
	167	279	46 593	Sanz Moreno <i>et al.</i> (1998)*
	172	271	46 612	De Vente <i>et al.</i> (2009)*
	164	390	63 742	GeoWEPP

* Datos basados en estudios batimétricos del CEDEX.

dimentos obtenidas para el área de estudio, aunque algo superiores, concuerdan con los valores de degradación específica calculados por otros autores a partir de registros sedimentológicos y campañas batimétricas del embalse de la Cierva. En cambio, resultan netamente inferiores a las tasas estimadas mediante las ecuaciones USLE y RUSLE, inicialmente diseñadas para evaluar pérdidas medias de suelo ocasionadas en terrenos de cultivo. A diferencia de estos modelos, GeoWEPP proporciona una evaluación de los sedimentos liberados a lo largo del tiempo, con una simulación continua basada en el análisis de tormentas; por tanto, resulta especialmente útil para medios semiáridos de terreno accidentado, donde se producen fuertes movilizaciones y aportes de sedimentos discretos en el tiempo, asociados a sucesos pluviométricos recurrentes de alta intensidad. También pueden considerarse significativos los resultados del presente ensayo referentes a los cauces de la cuenca (volúmenes de escorrentía superficial por cauce, caudal medio anual, contribución sedimentaria de cada cauce

al embalse, carga sedimentaria media anual y ratio de liberación de material). Dicha información es consistente con la proporcionada por el CEDEX en sus memorias de aforos de sedimentos e informes técnicos relativos al embalse de la Cierva, lo que hace del citado modelo un instrumento suficientemente válido para la estimación de flujos sedimentarios en cauces efímeros. La representación cartográfica de tales resultados ha servido para identificar las laderas y subcuencas que más contribuyen a la sedimentación del embalse y definir los tramos de fluviales con mayor carga potencial de sedimentos. En el presente estudio, esta cartografía específica ha sido obtenida con la integración de WEPP y ArcGIS en el análisis de procesos ambientales actuales, basando, por tanto, la estimación final en un único escenario real. En una investigación futura, que se sustente en series de datos ambientales más amplias y detalladas, podrá abordarse el estudio de la capacidad de GeoWEPP para evaluar distintos escenarios de uso del suelo en cuencas de este tipo, y determinar, en función de los valores teóricos predichos,

Tabla 6. Composición de los sedimentos evacuados por el cauce y distribución de las partículas primarias y materia orgánica en los sedimentos erosionados. Datos obtenidos por GeoWEPP para el área vertiente del embalse La Cierva. *Particle-size distribution and soil organic matter of the sediments at the output channel and in eroded sediments. Data obtained by GeoWEPP for La Cierva reservoir watershed.*

Clase	Diámetro (mm)	Gravedad específica	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	M.O. (%)	Fracción del flujo
1	0.002	2.60	0	0	100	8.0	0.163
2	0.010	2.65	0	100	0	0.0	0.288
3	0.030	1.80	0	65	35	2.8	0.497
4	0.314	1.60	73.1	17.9	9	0.7	0.039
5	0.200	2.65	100	0	0	0.0	0.013
Distribución de las partículas primarias y de la materia orgánica en el sedimento erosionado							
Total			4.1	61.9	34	2.7	

las prácticas de ordenación más apropiadas en el control de la erosión.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido llevado a cabo en el marco del Proyecto de Investigación PI/13 “Respuesta hidrológica y geomorfológica de los sistemas fluviales torrenciales afectados por obras de restauración hidrológica-forestal en cuencas semiáridas del Sureste español”, financiado por la Fundación Instituto Euromediterráneo de Hidrotecnia, el European Council y la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Asimismo hacemos extensivo nuestro agradecimiento al CEDEX por la información proporcionada.

BIBLIOGRAFÍA

- ALMOROX, J., R. DE ANTONIO, A.SAA, M. CRUZ DÍAS & J. M. GASCÓ. 1994. Métodos de estimación de la erosión hídrica. *Editorial Agrícola Española*, 152: 849–862.
- ASCOUGH, II J. C., C. BAFFAUT, M. A. NEARING & B.Y. LIU. 1997. The WEPP Watershed Model: I Hydrology and Erosion. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 40(4): 921–933.
- ASHLEY, S. 2003. *Accuracy Assessment of WEPP-Based Erosion Model on Three Small, Harvested and Buried Forest Watersheds*. Thesis, Degree of Master of Science, College of Graduate Studies, University of Idaho.
- AVENDAÑO, C., R. COBO, J. L. GÓMEZ & M. E. SANZ MONTERO. 1995. Procedimiento para evaluar la degradación específica (erosión) de cuencas de embalses a partir de los sedimentos acumulados en los mismos. Aplicación al estudio de embalses españoles. *Ingeniería Civil*, 99: 51–58.
- AVENDAÑO, C., R.COBO, M. E. SANZ MONTERO & J. L. GÓMEZ. 1997a. Capacity Situation in Spanish Reservoirs. Proceedings of the 19th Symposium on Large Dams, Florence, ICOLD (International Committee on Large Dams). París, 849–862.
- AVENDAÑO, C., M. E. SANZ MONTERO, R. COBO & J. L. GÓMEZ. 1997b. Sediment Yield at Spanish Reservoirs and its Relationship with the Drainage Basin Area. Proceedings of the 19th Symposium on Large Dams, Florence, ICOLD (International Committee on Large Dams). París, 863–887.
- AVENDAÑO, C. 2002. *Situación de los embalses españoles. Jornadas SEPREM sobre sedimentación en embalses*, Madrid.
- BROWN, C. B. 1943. Discussion of “Sedimentation in Reservoirs by J. Witzig”. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 109: 1080–1086.
- CEDEX (Centro de Estudios Hidrográficos). 1987. *Reconocimiento batimétrico del embalse de La Cierva*. Dirección General de Obras Hidráulicas, Madrid.
- CEDEX (Centro de Estudios Hidrográficos). 1992. *Informe sobre la situación de los estudios de aforo de sólidos, batimetría y sedimentología de embalses hasta 1992*. Dirección General de Obras Hidráulicas, Madrid.
- COBO RAYAN, R., J. L. GÓMEZ MONTAÑA, A. PLATA BEDMAR, M. E. SANZ MONTERO & C. AVENDAÑO SALAS. 1996. Influencia del régimen de explotación del embalse de puentes en las tasas de sedimentación durante el periodo 1954–1994. Actas V jornadas Españolas de presas, Valencia.
- COBO, R. 2008. Los sedimentos de los embalses españoles. *Ingeniería del Agua*, 15(4): 231–241.
- CODA. 1993. *Incidencia ambiental y social de la política hidráulica en España. Propuestas para recoger en el Plan Hidrológico Nacional*. CODA, Madrid.
- CONESA GARCÍA, C. & R. GARCÍA LORENZO. 2007. *Erosión y diques de retención en la Cuenca Mediterránea. Efectividad hidrogeomorfológica de los diques de retención en cuencas torrenciales del Sureste Español*. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia.
- CORINE. 1992. *Soil Erosion Risk and Important Land Resources in the Southern Regions of the European Community*. EUR 13233, Luxemburgo.
- DE ANTONIO, R., J. ALMOROX, A. SAA, & J. P. RUEDA. 1995. Erosión y sedimentación de los embalses en España. *Agricultura, Revista Agropecuaria*, 64: 151–154.
- DE PLOEY, J. 1990. Threshold Conditions for Talweg Gullyng with Special Reference to Loess Areas. *Catena Supplement*, 17: 147–151.

- DE VENTE, J., J. POESEN, G. VERSTRAETEN, A. VAN ROMPAEY & G. GOVERS. 2009. Spatially Distributed Modelling of Soil Erosion and Sediment Yield at Regional Scales in Spain. *Global and Planetary Change*, 60(3-4): 393–415.
- ELLIOT, W. J. & D. E. HALL. 2000. *Rock: Clime Beta CD Version Rocky Mountain Research Station Stochastic Weather Generator Technical Documentation*. Moscow, Idaho: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Disponible en: <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/fswepp/docs/0007RockClimCD.html>. Acceso: 29 septiembre de 2013.
- FLANAGAN, D. C., II JCA, A. D. NICKS, M. A. NEARING & J. M. LAFLEN. 1995. Overview of the WEPP Erosion Prediction Model in USDA. Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. En: *NSERL Report No. 10*. D. C. Flanagan & M. A. Nearing (ed.): Chapter 1. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- FOSTER, G. R. & L. D. MEYER. 1972. A Closed-Form Soil Erosion Equation for Upland Areas. En: *Sedimentation*. H. W. Shen (ed.): Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft Collins.
- FOSTER, G. R., D. C. FLANAGAN, M. A. NEARING, L. J. LANE, L. M. RISSE & S. C. FINKNER. 1995. Hillslope Erosion Component in USDA. Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentacion. En: *NSERL Report No. 10*. D. C. Flanagan & M. A. Nearing (ed.): Chapter 11. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- GARCÍA LORENZO, L., C. CONESA GARCIA & A. MARTÍNEZ SALVADOR. 2009. Assessing Soil Erosion in Semi-Arid Check Dam Watersheds using GeoWEPP (South East Spain). En: *Geomorphology: Processes, Taxonomy and Applications*, M. H. Sanders & P. D. Clark (ed.): 115–146, Nova Science Publishers Inc., Nueva York.
- HUANG, C. & J. M. BRADFORD. 1993. Analysis of Slope and Runoff Factors Based on the WEPP Erosion Model. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 1176–1183.
- ICONA. 1986. Proyecto LUCDEME (Lucha contra la Desertificación del Mediterráneo). Mapa de suelos, escala 1:100.000. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- ICONA. 1988. *Mapas de estados erosivos de la Cuenca Hidrográfica del Segura*. Servicio de publicaciones del Ministerio de Agricultura y Pesca, Madrid.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. 1986. Evaluación de la erosión hídrica en las áreas receptoras de los embalses de la Cuenca del Segura. Aplicación de la USLE. En: *Estudios sobre Geomorfología del Sur de España*. F. López Bermúdez & J. B. Thornes (ed.): 93–99. Universidad de Murcia & University of Bristol. COMTAG, Murcia.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. & J. D. GUTIÉRREZ ESCUDERO. 1982. Estimación de la erosión y aterramientos de embalses en la cuenca hidrográfica del río Segura. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 8: 3–18.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. & M. A. ROMERO DÍAZ. 1992. Génesis y consecuencias erosivas de las lluvias de alta intensidad en la región mediterránea. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 18-19: 7–28.
- MAALIM, F. K., A. M., MELESSE, P. BELMONT, & K. GRAN. 2013. Modeling the Impact of Land Use Changes on Runoff and Sediment Yield in the Le Sueur Watershed, Minnesota Using GeoWEPP. *Catena*, 107: 35–45.
- MMA. 2002. *Inventario Nacional de Erosión de Suelos 2002-2012*, Región de Murcia. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, MMA, Madrid.
- PALAU, A. 2002. La sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctoras. Actas del I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, Madrid: 847–856.
- POESEN, J., K. VANDAELE & B. VAN WESEMAEL. 1996. Contribution of Gully Erosion to Sediment Production in Cultivated Lands and Rangelands, *IAHS Publication*, 236: 251–266.
- POESEN, J. & J. M. HOOKE. 1997. Erosion, Flooding and Channel Management in Mediterranean Environments of Southern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21, 2: 157–199.
- RENARD, K. G. & J. R. SIMANTON. 1990. Application of RUSLE to Rangelands. Watershed Planning and Analysis in Action, Symp. Proc. of IR Conference Watershed Mgt./IR iv/ASCE, Durango, USA: 164–173.
- RODRIGUEZ ESTRELLA, T. & F. NAVARRO HERVÁS. 2001. Desprendimientos y vuelcos en laderas, desencadenados por sismicidad en la cuenca de Mula (Murcia). En: *Espacio natural y dinámicas territoriales*. Libro homenaje al doctor D.

- Jesús García Fernández: 155–165. Universidad de Valladolid.
- ROMERO DÍAZ, A., F. CABEZAS & F. LÓPEZ BERMÚDEZ. 1992. Erosion and Fluvial Sedimentation in the river Segura Basin (Spain). *Catena*, 19: 379–392.
- ROMERO DÍAZ, A., J. D. RUIZ SINOGA & F. BELMONTE SERRATO. 2011. Tasas de erosión hídrica en la región de Murcia. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56: 129–153.
- SAA, A., J. ALMOROX, R. DE ANTONIO, M. CRUZ DÍAS & J. P. RUEDA DE LA PUERTA. 1995. Erosión y aterramiento de embalses. *Agricultura: Revista Agropecuaria*, 751: 151–154.
- SANZ MORENO, M. E., C. AVENDAÑO, R. COBO & J. L. GÓMEZ. 1998. Determinación de la erosión en la cuenca del Segura a partir de los sedimentos acumulados en sus embalses. *Geogaceta*, 23: 135–138.
- SCHERTZ, D. L. 1983. The Basis for Soil Loss Tolerance. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38 (1): 10–14.
- USDA. 1995. Water Erosion Prediction Project. WEPP. Agricultural Research predictions. *Hydrological Processes*, 17: 887–900.
- USDA-ARS. 2014. Water Erosion Prediction Project (WEPP). United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service. On line: <http://www.ars.usda.gov/News/docs.htm?docid=10621>
- USDA-ARS. 2014. CLIGEN v.5.3 Stochastic Weather Generator. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service. On line: <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=18094>
- WU, J. Q., A. C. XU & W. J. ELLIOT. 2000. Adapting WEPP for Forest Watershed Erosion Modeling. Paper No. 002069. International ASAE Meeting, 9-12 July, Milwaukee, WI. St. Joseph, MI: ASAE. 9.