

Estimación de la erosión potencial en la cuenca del río Moulouya aguas arriba de la presa Mohamed V

Estimation of the potential erosion in the Moulouya river watershed upstream of the dam Mohamed V

María del Mar Saldaña Díaz, Abderrahim Nemmaoui, María Yolanda Cantón Castilla,
Manuel Ángel Aguilar Torres, Fernando José Aguilar Torres

REVISTA MAPPING
Vol. 23, 168, 4-16
noviembre-diciembre 2014
ISSN: 1131-9100

Resumen

Este estudio constituye una primera aproximación a la identificación de los procesos de degradación de la cuenca del río Moulouya y la consecuente dinámica de colmatación observada en la presa Mohamed V (Marruecos). En este sentido, se ha llevado a cabo la estimación de la tasa de erosión y pérdida de suelos anual en la cuenca del río Moulouya aguas arriba de dicha presa. Para ello se seleccionó un modelo sencillo como el modelo USLE (Universal Soil Loss Equation) con el fin de cuantificar el proceso de erosión hídrica. El modelo USLE se basa en la estimación de varios parámetros determinantes en el proceso de erosión hídrica como son: (i) la agresividad de las precipitaciones o factor de erosividad de la lluvia (R), (ii) la erodibilidad de los suelos o factor K, (iii) la pendiente y longitud de la ladera vertiente como factor combinado LS, (iv) además de la cobertura vegetal (factor C) y (v) las prácticas de conservación del suelo (factor P). Los valores de tasa de erosión obtenidos para la cuenca Mohamed V se sitúa en unas $12.11 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$, con un aporte estimado de sedimentos a la presa próximo a $225 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$.

Abstract

This study is a first approach headed up to the identification of degradation processes in the Moulouya River watershed and the subsequent dynamics of silting registered in the dam Mohamed V (Morocco). In this sense, the estimate of the annual erosion rate and soil loss in the catchment area of the Moulouya River upstream of the dam Mohamed V has been carried out. A simple model like USLE approach (Universal Soil Loss Equation) was selected in order to quantify the water erosion process. The USLE model is based on the estimation of a determining key parameters in the process of water erosion such as: (i) the aggressiveness factor of the rainfall or rainfall erosivity (R), (ii) the soil erodibility or K factor, (iii) the slope length and steepness like a combined factor LS, (iv) in addition to the vegetation cover factor (C) and (v) the practices of soil conservation (factor P). The average erosion rate obtained for the entire catchment area took a value close to $12.11 \text{ t.ha}^{-1}.\text{year}$, meanwhile the annual amount of sediment reaching the dam could be at about $225 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$.

Palabras clave: erosión del suelo, cuenca vertiente, USLE, colmatación de embalses, Marruecos.

Keywords: soil erosion, catchment area, USLE, silting of dams, Morocco..

Departamento de Ingeniería, Escuela Politécnica Superior y Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Almería
msd452@ual.es
abdo.nemmaoui@gmail.com
ycanton@ual.es
maguilar@ual.es
faguilar@ual.es

Recepción 10/10/2014
Aprobación 15/11/2014

1. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo en la cuenca Mediterránea es cada vez más preocupante, causando una significativa pérdida de tierras cultivables y la colmatación de las presas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). En el caso concreto de los países del Magreb varios estudios han demostrado que la erosión ha causado importantes pérdidas de suelo y, sobre todo, de recursos hídricos debido a la colmatación de los embalses (Laouina, Nafaa, Coelho, Chaker, Carvalho, Boulet y Ferreira, 2000; Morsli, Habi, Mazzour, Hamoudi y Halitim, 2012).

Por otro lado, numerosos trabajos han puesto en evidencia que la tasa de erosión presenta una alta variabilidad a lo largo de la cuenca mediterránea. Por ejemplo, en la cuenca vertiente de Oued El Maleh (Prerif-Marruecos) se estimó una tasa de erosión entre 5 y 150 t.ha⁻¹año⁻¹ (El Aroussi, Mesrar, El Garouani, Lahach, Beaabidate, Akdim y Jabrane, 2011), mientras que el caso del Líbano la tasa de erosión estimada variaba entre 50 y 70 t.ha⁻¹año⁻¹ (FAO, 1986). En un estudio realizado en Turquía (Celik, Aydin y Yazici, 1996) se estimó una pérdida de suelo global entre 500 y 600 Mt.año⁻¹. Chevalier, Pouliot, Thomson y Boussema (1995) indican que el 40 % de los suelos en Marruecos y el 50 % en Túnez se encuentran amenazados por la erosión.

La modelización de los procesos de erosión hídrica a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituye una excelente herramienta para determinar, de forma cuantitativa y cualitativa, la magnitud y distribución espacial de la pérdida de suelo y su movilización o transporte de sedimentos a través de la cuenca vertiente, lo que permite mejorar de forma significativa el conocimiento sobre las causas que originan la erosión (abandono de cultivos, deforestación, etc.) y la determinación de las zonas más vulnerables. En este sentido conviene indicar que aunque la erosión es considerada como un fenómeno natural, se ha visto acelerada por la deforestación y el uso intensivo y manejo inadecuado de los suelos agrícolas (FAO, 1990). Por otra parte, todas las predicciones derivadas del escenario de cambio climático global apuntan a un claro incremento de la aridez en la región mediterránea (IPCC, 2007). En relación a Marruecos, y en comparación con el periodo 1961-1990, el decrecimiento de la precipitación afectará a todo el país, especialmente durante el periodo 2071-2099. Por ejemplo, y de acuerdo con el escenario más pesimista, la lluvia anual disminuirá en torno a un 20% desde ahora hasta 2050, cayendo incluso hasta un 40% si nos trasladamos a 2080 (World Bank & Government of Morocco, 2008). Al mismo tiempo se prevé un aumento de temperatura en Marruecos que podría llegar hasta los 30 C en 2080, lo que produciría un incremen-

to en la evapotranspiración de un 20% en 2050 y hasta un 40% en 2080. Obviamente esta situación derivaría en un grave déficit hídrico que afectaría negativamente a la actual cubierta vegetal que protege contra la erosión hídrica. Por otra parte se pronostica el aumento de los eventos meteorológicos extremos como lluvias torrenciales puntuales, que son las que verdaderamente provocan los procesos de erosión más pronunciados. En definitiva, las zonas semiáridas mediterráneas se enfrentan a un escenario donde se producirá, con una elevada probabilidad, un aumento neto de la erosión hídrica, circunstancia que hace imprescindible el disponer de modelos eficaces que permitan identificar las zonas más vulnerables y predecir el efecto de las posibles medidas correctoras que se lleven a cabo.

La modelización USLE (Universal Soil Loss Equation), implementada por Wischmeier y Smith (1978), proporciona una estimación de las partículas del suelo susceptibles de ser desagregadas y determina, por tanto, las zonas más sensibles a la erosión sin tener en cuenta las dinámicas de transporte/sedimentación de los materiales del suelo. El modelo ha sido desarrollado a partir de datos recolectados a lo largo de veinte años a través de más de 10 000 ensayos de erosión en parcelas y en pequeñas cuencas vertientes en 46 estaciones situadas en la Gran Llanura Americana (Roose, 1994). Aunque ha sido concebida y calibrada en Estados Unidos, la ecuación universal de perdida de suelo USLE constituye uno de los modelos más aceptados para la estimación anual de la erosión hídrica potencial de los suelos a nivel mundial. De hecho, esta ecuación ha sido aplicada en varios países y adaptada en función del contexto climático, pedológico y topográfico, desarrollándose varias ecuaciones derivadas de la misma.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio se sitúa en la cuenca vertiente del Río Moulouya situada aguas arriba de la presa Mohamed V, en la zona Oriental de Marruecos. La cuenca del río Moulouya, centrada en las coordenadas UTM 466 161 m este y 3 713 140 m norte (sistema de referencia WGS84), presenta una superficie próxima a los 55 500 km². El río Moulouya, con una longitud de unos 600 km, surge en Alemsid, a una altitud de 1170 m, en el cruce del macizo del Medio Atlas y del Alto Atlas, desembocando en Saïdia (Ras el Ma) en el mar Mediterráneo. La aportación media en la desembocadura del río Moulouya es de 920 Mm³.año⁻¹ (periodo 1970-98). En el transcurso del río Moulouya nos encontramos con la cuenca vertiente a la presa Mohamed V, constituida por una llanura árida con

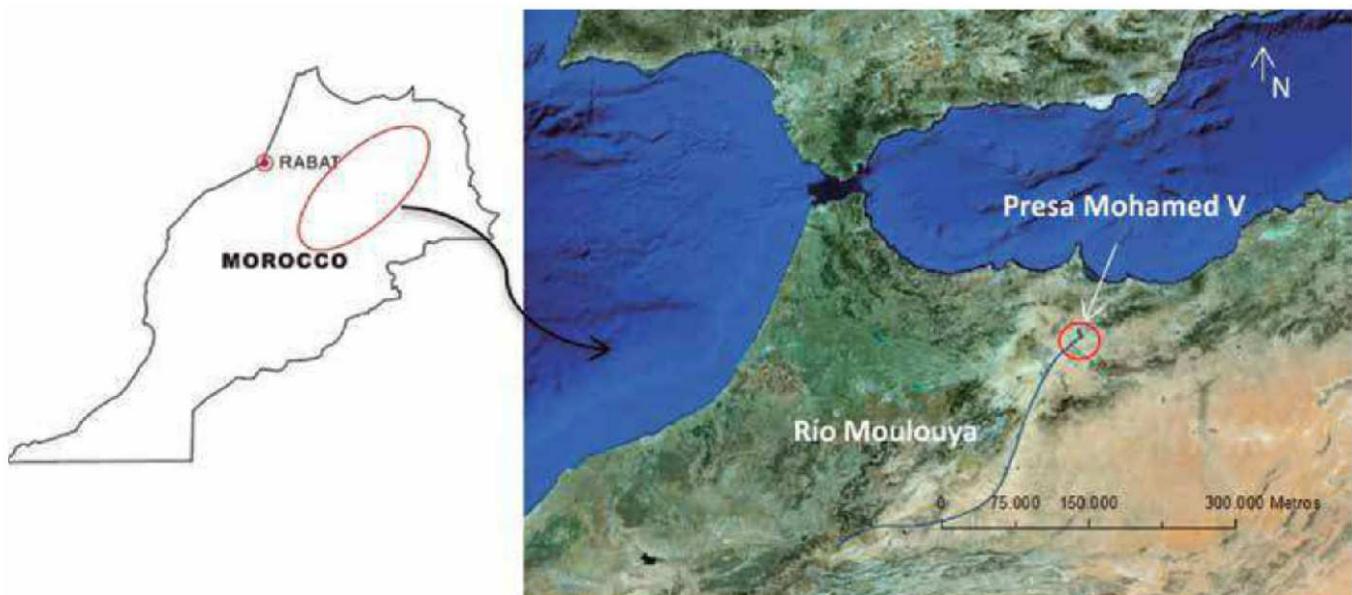


Figura 1. Localización de la zona de estudio

una degradación específica en principio baja, aunque con formas de erosión concentradas y reactivadas periódicamente (Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la lutte Contre la Désertification, 1996).

En la Figura 1 podemos ver la localización por donde discurre el río Moulouya y la localización de la presa Mohamed V.

2.2. Modelo digital de elevaciones

El Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) anunciaron en 2011 el lanzamiento de un nuevo Modelo Digital de Elevaciones Global (Global Digital Elevation Model, GDEM) conocido como ASTER GDEM v2.

La primera versión del ASTER GDEM fue lanzada en junio de 2009 y se generó utilizando aproximadamente 1.3 millones de imágenes estéreo tomadas por el sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). La cobertura del ASTER GDEM abarca un 99 % de la superficie de la tierra. Posteriormente se realizó una actualización incorporando 260 000 estéreo pares adicionales para mejorar la cobertura y la reducción de la aparición de artefactos. El algoritmo refinado para la producción de dicho modelo proporciona una mejora en la resolución espacial obteniendo una mayor precisión planimétrica y altimétrica.

Este modelo puede ser descargado en formato Geotiff y coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator), sistema de referencia WGS84, con una resolución de 30 m/píxel y elevaciones expresadas como cotas ortométricas. Presenta una precisión vertical estimada de 20 m con un nivel de confianza del 95 % (ASTER, 2009).

2.3. Obtención de la cuenca vertiente

Para poder llevar a cabo el desarrollo de los trabajos necesarios para el estudio del impacto de la erosión del suelo en la colmatación de la presa Mohamed V, fue necesaria la delimitación de la cuenca vertiente del río Moulouya aguas arriba de la presa citada. Para ello, a partir del Modelo Digital de Elevaciones, previo relleno de los pequeños sumideros ("pits") que pueden afectar al cálculo de la cuenca, se calculó la dirección de flujo y a partir de ésta se construyó el mapa de flujo acumulado que permitió la delineación automática de la cuenca. Para todo ello se usó el módulo de análisis hidrológico de ArcGIS v. 10.2.

2.4. Aplicación del modelo USLE

Para el cálculo de la tasa de erosión potencial en la cuenca del Río Moulouya aplicamos la ecuación USLE (Ecuación 1) como modelo de estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica ampliamente recomendado por numerosos autores (Chen, 2007). La USLE es un modelo paramétrico totalmente empírico que se aplica para predecir la tasa de erosión anual promedio de suelos con una determinada topografía y bajo unas condiciones de uso y manejo del suelo específicas. El modelo no contempla los procesos físicos de separación, transporte y sedimentación de forma mecánica. La ecuación de la USLE viene dada por la siguiente expresión:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad [1]$$

Donde A es la pérdida de suelo anual en $t.ha^{-1}$, R es la erosividad de las precipitaciones ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.año^{-1}$), K es la erosionabilidad del suelo ($t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$), L es la longitud de la ladera (adimensional), S la pendiente de

la ladera (adimensional), C es el cultivo y manejo del suelo (adimensional) y P la práctica de conservación (adimensional).

A continuación se presenta una descripción de los parámetros que intervienen en la ecuación de la USLE.

2.4.1. Factor R: erosividad de las precipitaciones

La pérdida de suelo está estrechamente relacionada con la intensidad y energía de la lluvia debido al poder de desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo y, en parte, por la contribución de la lluvia a la escorrentía (Le Bissonnais, Thorette, Bardet y Daroussin, 2002).

Wischmeier y Smith (1978) comprobaron que la pérdida de suelo, tanto por salpicadura, flujo superficial y/o en regueros, está relacionada con un índice compuesto por la energía cinética (E) y la máxima intensidad de lluvia en 30 minutos (Ecuación 2). En definitiva, la energía cinética de las gotas de lluvia es capaz de desagregar el suelo en partículas individuales que posteriormente serán transportadas por salpicadura o por escorrentía. El término R de erosividad queda definido por la siguiente expresión:

$$R = E * I_{30} \quad [2]$$

Donde E es la energía cinética de la lluvia e I_{30} la intensidad máxima de lluvia en un período de 30 minutos. Para el cálculo de la erosividad de la lluvia anual será necesario realizar la sumatoria de los productos de las energías cinéticas de todos los eventos de lluvias erosivas anuales con sus respectivas intensidades máximas en 30 minutos (Ecuación 3).

$$R = \sum (E * I_{30}) \quad [3]$$

Para el cálculo de R se determina si existe una precipitación mayor a 12.7 mm en un intervalo de 6 h. De este modo se desprecian todas las precipitaciones con un volumen inferior a este umbral con excepción de aquellas en las que la intensidad es superior a 24 mm.h⁻¹ en 15 minutos (Wischmeier y Smith, 1978).

Para cada intervalo de precipitación fijado se debe calcular la energía cinética según la siguiente ecuación (Ecuación 4):

$$ei = 1.213 + 0.89 * \log I_M \quad [4]$$

Donde I_M es la intensidad de la lluvia en el intervalo considerado. El uso de esta ecuación para el cálculo de la energía cinética parcial se determina en función de las unidades de I, que en este caso son mm.h⁻¹, siendo las unidades finales las de energía por unidad de superficie y mm de precipitación en la forma J.m⁻².mm⁻¹.

El cálculo de la energía total para cada intervalo se calcula mediante la siguiente ecuación (Ecuación 5):

$$Ei = e * pp_i \quad [5]$$

Donde Ei es la energía total de cada intervalo, e la energía descrita en la ecuación 4 y pp_i es el total de milímetros de lluvia caídos en el intervalo considerado.

Mediante la suma de las energías calculadas para cada intervalo llegamos al cálculo de la energía total de la tormenta considerada (Ecuación 6) que suele expresarse en MJ.ha⁻¹:

$$E = \sum E_i \quad [6]$$

En el caso de disponer del registro de precipitaciones a lo largo de varios años suele recomendarse determinar un factor R promedio como más representativo de la zona de estudio.

Como puede intuirse, la medición directa del factor R es una labor costosa. Para su cálculo hay que acudir a medidas experimentales en parcelas tipo durante varios año con el fin de obviar la variabilidad temporal de la intensidad y frecuencia de los episodios de tormenta.

Debido a la falta de datos para el cálculo de los parámetros I_{30} y E en nuestra área de estudio, se empleó un método alternativo para el cálculo de la erosividad (factor R). Tras una profunda revisión bibliográfica, se optó por utilizar la metodología propuesta por Arnoldus (1977), aproximación empleada en otros trabajos como los llevados a cabo por Irven, Topaloglu y Uygur (2007) o Payet, Dumas y Pennober (2011). Se trata de una metodología muy útil para zonas donde no se disponga de datos de pluviometría de forma continua, sino solo de datos medios diarios o mensuales. En este caso se recomienda la determinación del parámetro R mediante la aplicación del Índice de Fournier (IF) que emplea para su cálculo las precipitaciones totales mensuales (Ecuación 7):

$$IF = p^2 / P \quad [7]$$

Donde p (mm) corresponde a la precipitación del mes más lluvioso y P (mm) al total anual de lluvia acumulada.

Si se disponen de datos suficientes conviene aplicar el Índice Modificado de Fournier (IMF) que utiliza como dato de entrada las precipitaciones totales mensuales (Ecuación 8):

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} pi^2 / P \quad [8]$$

Donde pi (mm) corresponde a la precipitación mensual del mes «i» y P (mm) al total anual de lluvia acumulada.

El término IF es empleado para reemplazar directamente a la metodología tradicional aplicada para el cálculo del factor R en zonas donde no se dispone de los datos necesarios. Cabe destacar que el uso de dicho factor, o en su caso la aplicación del índice modificado IMF, debe ser cuidadoso ya que su correlación con el índice de erosividad real (factor R) es variable según la zona de estudio (Irjem et al. 2007). Por ello Arnoldus (1977) estableció un mapa de isoereditas donde se relaciona el factor de erosividad R para Marruecos con el índice IMF según la siguiente expresión (Ecuación 9):

$$R = 0.264 * IMF^{1.50} \quad [9]$$

Los datos necesarios para el cálculo del factor R de la ecuación de la USLE, tal y como se ha descrito en este apartado, han sido obtenidos a partir de los datos de precipitación publicados por WorldClimb¹ los cuales fueron generados a partir de la interpolación de datos mensuales de clima obtenidos en diferentes estaciones meteorológicas con una resolución de 1 km de tamaño de píxel. En realidad la base de datos WorldClimb integra los datos climáticos ya existente en otras bases de datos como: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO), Organización Meteorológica Mundial (World Mundial Organization, WMO), Centro Internacional de Agricultura Tropical (International Center for Tropical Agriculture, CIAT) y diferentes bases locales de datos adicionales. A partir de esta información de base, se seleccionaron las estaciones meteorológicas con registros históricos de varios años, obteniendo los promedios para el período 1960-1990 y eliminando aquellas series de menos de 10 años. En algunos casos se ha ampliado el período a 1950-2000 para incluir datos de zonas para las que había un registro de datos escaso (Hijmans, Cameron, Parra, Jones y Jarvis, 2005).

2.4.2. Factor K: erosionabilidad del suelo

La erosionabilidad expresa la susceptibilidad de un suelo a la erosión, dependiendo principalmente de variables intrínsecas del suelo como su contenido en materia orgánica, textura, estabilidad estructural, etc. (Roose y Sarrailh, 1990). El factor K de la USLE trata de explicar la pérdida potencial de suelo por unidad de erosividad en la parcela estándar.

Varios autores han propuesto que el factor K puede ser expresado en función de las propiedades del suelo por medio de ecuaciones de regresión múltiple (Römkens, 1985). Por ejemplo, en 1969 se realizó un estudio para describir el factor K mediante el análisis de 55 suelos en los que se consideraban tanto propiedades físicas como

químicas (Wischmeier y Mannering, 1969). El resultado de dicho estudio fue una ecuación de regresión múltiple de 24 términos o variables explicativas que posteriormente, y de cara a su aplicación práctica, tuvo que ser simplificada por su alta complejidad.

Más tarde, Wischmeier y Smith (1978) proponen la siguiente ecuación para el cálculo de la erosionabilidad (Ecuación 10):

$$K = 2.1 * M1.14 * 10^6 (12-MO) + 0.0325 * (b-2) + 0.025 * (c-3) \quad [10]$$

Donde MO corresponde al contenido en materia orgánica del suelo, b es el índice de estructura, c es la permeabilidad y M representa un término dependiente de la textura que se calcula mediante la siguiente expresión (Ecuación 11):

$$M = (\text{Arena fina} (\%) + \text{Limo}) * (100 - \text{Arcilla}(\%)) \quad [11]$$

TIPOS DE SUELOS PRESENTADOS EN LA CUENCA VERTIENTE DEL RÍO MOULOUYA	FACTOR K t.ha.h.ha ⁻¹ .MJ ⁻¹ .mm ⁻¹
Andosols	0.15
Arenosols	0.19
Calcisol	0.22
Cambisol	0.25
Fluvisol	0.20
Kastanozem	0.16
Leptosol	0.20
Luvisol	0.20
Phaeozem	0.10
Regosol	0.15
Vertisol	0.11

Tabla 1. Variación de K en función del tipo de suelo

Dado que no se han encontrado datos suficientes en la cuenca vertiente del río Moulouya para la aplicación de la fórmula descrita en la metodología expuesta por Wischmeier y Smith (1978), se optó por asignar a los diferentes tipos de suelos de la zona un valor de K en función de diferentes estudios publicados (Arnoldus, 1977; Payet et al., 2011; Ashigbor, Forkuo, Laari y Aabeyir, 2013). Las tipologías de suelos dentro de la cuenca se obtuvieron de la base de datos global en formato ráster proporcionada por SoilGrids1km² (<http://soilgrids1km.isric.org>). En este caso los datos descargados representan los diferentes tipos de suelo que se encuentran en la zona de estudio. Estos mapas se actualizan de forma regular con el objetivo de mejorar el posible uso de los mismos aportando datos

adicionales (perfles de suelo y capas de covarianza). Los datos obtenidos para este estudio fueron actualizados el 2 de abril de 2013.

Una vez delineados en formato ráster los diferentes tipos de suelo de la cuenca vertiente del río Moulouya se procedió a la asignación del valor K en función del tipo de suelo (Tabla 1) gracias a la cartografía publicada en el trabajo de Arnoldus (1977).

2.4.3. Factor LS: longitud y pendiente de la madera

Los efectos de la topografía del terreno en la determinación de la tasa de erosión vienen determinados en el modelo USLE por el factor combinado LS. Este factor tiene en cuenta el efecto de la longitud e inclinación de la ladera vertiente para la cuantificación de la erosión hídrica (Roose, 1994). El incremento de la pendiente de la ladera aumenta la velocidad de la escorrentía y, por lo tanto, la capacidad de arranque de partículas de suelo.

PORCENTAJE DE LA PENDIENTE (%)	FACTOR m CORRESPONDIENTE-1
≥ 5	0.5
3.5 – 4.5	0.4
1 – 3	0.3
< 1	0.2

Tabla 2. Variación de m en función de la pendiente (según Wischmeier y Smith, 1978)

El cálculo del factor LS responde a la siguiente expresión formulada por Wischmeier y Smith (1978) (Ecuación 12):

$$LS = (\lambda/22.1)^m * (65.4 \sin \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \quad [12]$$

Donde λ representa la longitud de la ladera en metros, calculada como proyección horizontal, θ es el ángulo de la pendiente y m es el factor establecido por Wischmeier y Smith (1978) en función de la pendiente del terreno (Tabla 2).

Actualmente el cálculo del factor combinado LS está implementado en diversos programas informáticos, de forma que puede determinarse en formato ráster a partir de un DEM adecuado. Para ello es necesaria la obtención de mapas derivados del DEM inicial como son el mapa de pendientes y el de acumulación de flujo. En nuestro caso se empleó el software SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) que implementa los algoritmos necesarios para el cálculo del factor LS a partir de un DEM. Como paso previo al cálculo de LS se realizó un suavizado del ASTER GDEM v2 para la eliminación de ruido y posibles

artefactos que pudiesen afectar, y por tanto desvirtuar, el resultado obtenido para dicho factor (Desmet, 1997). Por ello se procedió a realizar un suavizado previo del modelo mediante: i) decimación del DEM original consistente en el paso de una malla de resolución 30 m a otra de resolución 120 m y ii) subsecuente aplicación al modelo de resolución 120 m de un filtro de paso bajo (filtro de medias en una ventana móvil de 3x3 píxeles).

El cálculo del mapa de pendientes se realizó a partir del DEM suavizado mediante la aplicación del método propuesto por Zenvenger y Thorne (1987), basado en un ajuste polinómico de segundo orden de nueve parámetros. Para calcular la acumulación de flujo en cada píxel se utilizó el procedimiento conocido como Mass Flux Method (MFM) propuesto por Gruber y Peckham (2008). Finalmente se calculó el factor LS mediante la combinación de los mapas de pendiente y acumulación de flujo a través del algoritmo propuesto por Desmet y Govers (1996).

2.4.4. Factor C y P: cultivo y manejo del suelo

La cobertura vegetal protege los suelos y amortigua el impacto de las gotas de lluvia, influyendo, por tanto, sobre la velocidad de la escorrentía superficial y la infiltración. Así pues, las pérdidas de suelo disminuyen con el aumento de la cobertura vegetal (Souter, Mermoud y Musy, 2007).

Tipo de cultivo	Valor del factor C
Suelo desnudo	1
Bosque degradados	0.7
Árboles y arbustos	0.3
Área de reforestación	0.18

Tabla 3. Coeficientes del factor C en función del tipo de cobertura del suelo.

El factor C se define como la relación entre la tasa de erosión potencial del suelo desnudo bajo unas condiciones específicas y la tasa de erosión correspondiente a una determinada cobertura vegetal y/o sistema de explotación (Wischmeier y Smith, 1978). En este sentido un suelo con vegetación natural bien desarrollada apenas presentará erosión por muy abrupto que sea el terreno. El valor de C oscila entre 0 y 1, asignándose el valor 1 a suelos totalmente desnudos y el valor 0 a tipos de suelo que no son susceptibles de sufrir ninguna erosión.

La información del tipo de cobertura vegetal y uso del suelo que ocupa la zona de estudio se ha obtenido a partir de la interpretación de imágenes Landsat 8 y de la digitalización de diversa cartografía de la zona como,

por ejemplo, el mapa de coberturas del suelo «Esquisse Préliminaire de la carte des sols du Maroc» a escala 1:500 000 (Cavallar, 1950).

La asignación de valores de C en función de la cobertura vegetal (Tabla 3) se ha realizado de forma similar a la realizada por Payet et al. (2011).

El valor del factor P depende de las prácticas de conservación del suelo. Estas prácticas consisten en un conjunto de técnicas de cultivo que tienen como objetivo la disminución de la escorrentía y la erosión tales como la labranza o la formación de caballones en las zonas de cambio de pendiente. Ante la ausencia de datos globales para la zona de trabajo se decidió asignar un valor de P = 1 para toda el área de estudio tal y como recomiendan varios autores (Payet et al., 2011).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Obtención de la cuenca vertiente

La cuenca vertiente delimitada presenta una superficie total de 49 536 km², con una longitud de unos 378 km y una anchura media de unos 203 km, delimitada tal y como ha sido descrito en el apartado 2.3.

3.2. Aplicación del modelo USLE

Los resultados obtenidos se refieren, por un lado, a los cálculos detallados de los diferentes parámetros que intervienen en el cálculo de la ecuación de la USLE: R, K, LS, C y P (Ecación 1). Por otro lado, el uso de los mismos factores para el cálculo final de la distribución espacial de A (tasa de erosión o pérdida del suelo en t.ha⁻¹) en la cuenca vertiente del río Moulouya.

3.2.1. Factor R: erosividad de las precipitaciones

La incorporación de los datos mundiales climáticos ofrecidos por WorldClim para el cálculo del factor de erosividad de la lluvia, R, nos ha permitido evaluar la distribución espacial de la agresividad de la lluvia en la zona de estudio. Así, el análisis del valor medio de las precipitaciones anuales, pone de manifiesto que, como era de esperar, las mayores precipitaciones anuales se localizan en las zonas elevadas, llegando a alcanzar valores medios de hasta 850 mm.año⁻¹.

En relación a la distribución de las precipitaciones en función de la altitud, en el mapa temático obtenido tras calcular el factor R podemos observar un crecimiento de los valores de dicho factor en relación con la elevación sobre el nivel del mar, variando entre 18 y 190 MJ.mm.ha⁻¹.año⁻¹. En efecto, los valores más elevados se corresponden con las zonas de mayor altitud, aunque son los menos abundantes, predominando los valores en el inter-

valo de 18 a 80 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.año⁻¹. La distribución espacial del factor R en el área de estudio puede observarse en el mapa temático de la Figura 2. Estos valores del factor R son similares a los obtenidos por Arnoldus (1977) para la cuenca vertiente del río Moulouya que oscilaban entre 10 y 300.

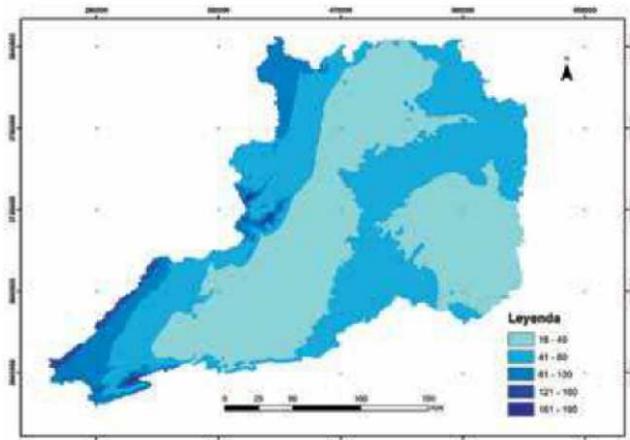


Figura 2. Valores del Factor R (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.año⁻¹)

3.2.2. Factor K: erosionabilidad del suelo

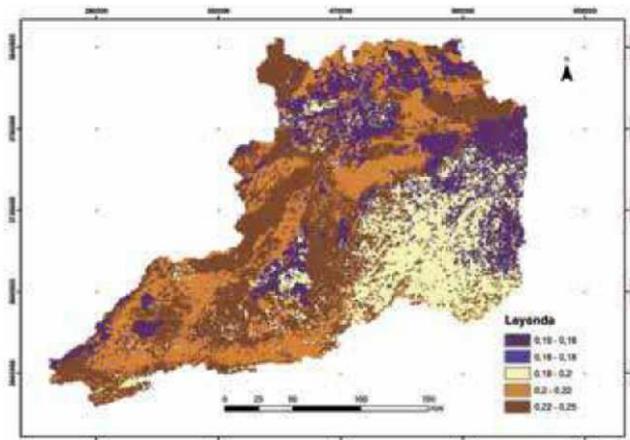


Figura 3. Valores obtenidos para el Factor K (t.ha.h.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹) en función del tipo de suelo

La presencia de diferentes tipos de suelo en la zona de la cuenca vertiente del río Moulouya hace que los valores del factor K varíen entre 0.10 y 0.25 t.ha.h.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹ (Figura 3). En efecto, si nos fijamos en el mapa de la Figura 3 y tenemos en cuenta la relación entre el factor K y los tipos de suelo de la Tabla 1, podemos localizar donde se encuentran los tipos de suelo que presentan una menor susceptibilidad a la erosión (menor valor del factor K), variando estos en un rango entre 0.10 y 0.16 t.ha.h.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹, frente a los tipos de suelo con valores de K más elevados, situándose dichos valores entre 0.22 y 0.25 t.ha.h.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹.

3.2.3. Factor LS: longitud y pendiente de la ladera

El DEM elegido juega un papel fundamental en el cálculo del factor LS. Debido a la pobre precisión vertical del modelo ASTER GDEM v2 empleado en este trabajo, lo que es usual en el caso de DEM globales, y por tanto para evitar errores significativos en la determinación del mapa de pendientes y acumulación de flujo, se procedió al suavizado del DEM como paso previo al cálculo del factor combinado LS. Dicho suavizado se realizó, como hemos comentado en el apartado de «Material y Métodos», mediante una decimación y posterior aplicación de un filtro de medias al ASTER GDEM v2 original.

Una vez realizado el DEM original, fue empleado para calcular el factor LS a partir de la determinación del mapa de pendientes y el mapa de acumulación de flujo.

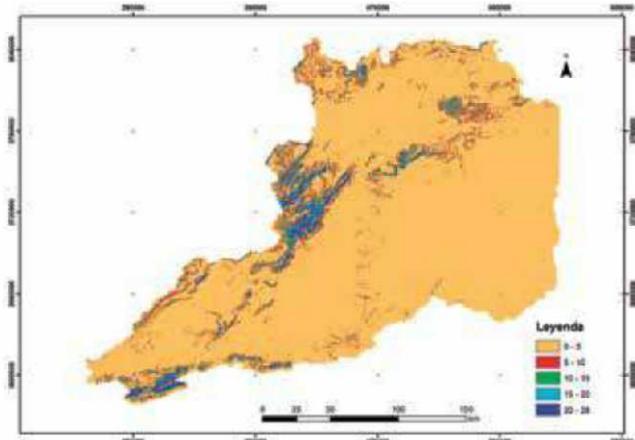


Figura 4. Distribución espacial de los valores obtenidos para el Factor LS

Los resultados obtenidos para el factor LS (Figura 4) muestran la importancia de la inclinación y la longitud de la pendiente en la susceptibilidad a la erosión a lo largo de la cuenca hidrográfica estudiada. La topografía de la cuenca vertiente del río Moulouya da lugar a unos valores de LS que varían entre 0 y 28. El rango de valores inferiores, que oscila entre 0 y 5, es el rango que predomina en toda la cuenca vertiente, ya que se trata de una zona relativamente plana. En la Figura 4 podemos observar también como a medida que el terreno se eleva se produce un aumento de los valores correspondientes a LS, alcanzando en las zonas más elevadas valores situados entre 20 y 28. Los valores obtenidos en este estudio para el factor LS son coherentes con los valores obtenidos para el mismo factor en estudios similares (e.g. Sadiki, Bouhlassa, Auajjar, Faleh y Macaire, 2004; Payet et al., 2011).

3.2.4. C: Cultivo y manejo del suelo

El procedimiento desarrollado para el cálculo del factor de cobertura del suelo, C, ofrece una estimación global del efecto sobre la tasa de erosión de los usos del suelo

predominantes en el área de estudio.

Tras analizar los datos disponibles para el cálculo de dicho factor y asignar los valores de C en función de la cobertura del suelo estimada, tal y como se ha descrito anteriormente (ver 4.2.4 FACTORES C Y P: CULTIVO Y MANEJO DEL SUELO) obtenemos como resultado el mapa presentado en la Figura 5.

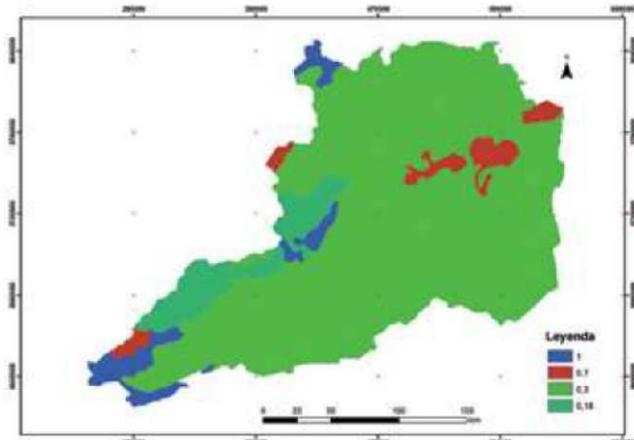


Figura 5. Cartografía de la distribución espacial de los valores empleados para el Factor C

El mapa correspondiente a los valores de C muestra la sensibilidad de los diferentes tipos de suelo y los procesos erosivos. En este caso los valores varían entre 0.18 y 1. Las zonas con una alta vegetación en la zona de estudio, correspondientes a áreas de reforestación, presentan el menor coeficiente de C, ya que la erosión en las zonas de mayor vegetación es menor que en zonas donde la vegetación es escasa. Por el contrario, en las zonas desérticas de la cuenca hidrográfica, los valores de C aumentan hasta 1, siendo éste el mayor valor que pueda tomar dicho factor, ya que al no existir ningún tipo de vegetación en la zona, la erosión es mucho más elevada. En este caso, el tipo de vegetación que predomina en la zona de estudio son árboles y arbustos, por lo que el valor que predomina para el factor C es de 0.3.

3.2.5. Tasa de erosión

El modelo de la USLE presenta una estimación promedio anual del potencial de pérdida del suelo por erosión hídrica expresada en $t.ha^{-1}$. En general, los suelos desnudos o frágiles, situados en zonas escarpadas y expuestos a una lluvia agresiva, son los más susceptibles al proceso de erosión. En la Figura 6 se muestra la variabilidad espacial de la tasa de erosión estimada en este trabajo cuyos valores se sitúan entre 0 y $1000\ t.ha^{-1}.año^{-1}$ a lo largo de la cuenca vertiente. Aproximadamente el 85 % de la zona de estudio presenta una baja tasa de erosión, oscilando entre 0 y $5\ t.ha^{-1}.año^{-1}$. Los valores más altos, situados entre 400

y 1000 t.ha⁻¹.año⁻¹, se concentran en solo un 0.2 % de la superficie total de la cuenca vertiente del río Moulouya.

Conviene indicar que en el mapa de tasas de erosión para Marruecos elaborado por Arnoldus (1977) se presentan valores que llegan a alcanzar hasta 2000 t.ha⁻¹.año⁻¹, por lo que los resultados del presente estudio quedan dentro del rango propuesto en el citado trabajo.

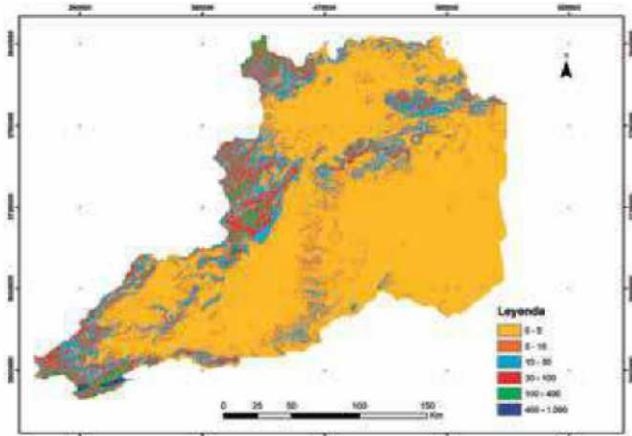


Figura 6. Distribución espacial de la tasa de erosión estimada mediante la aplicación de la ecuación de la USLE en t.ha⁻¹

Si realizamos la sumatoria del total de material erosionado aguas arriba de la presa Mohamed V, obtenemos un total de 58 327 658.30 t.año⁻¹. Ésta sería la masa media de partículas de suelo potencialmente movilizadas por procesos de erosión hídrica a lo largo de un año. Sin embargo, no todo el material erosionado que hemos calculado mediante la ecuación de la USLE llegaría a depositarse en el embalse Mohamed V como sedimento contribuyendo a su paulatina colmatación, ya que parte del material quedaría depositado o atrapado a lo largo de la cuenca. A la fracción de la cantidad de suelo que se moviliza por procesos erosivos y que llega a depositarse en el embalse aguas abajo se le denomina «Sediment Delivery Ratio» o proporción de desplazamiento de sedimentos. En este sentido, la cantidad de sedimento que finalmente llega al embalse se convierte en m³ de sedimentos depositados en el fondo de la presa, disminuyendo así su capacidad de

almacenamiento. Lane y Koelzer (1943) propusieron, en base a mediciones realizadas en numerosos embalses, una expresión para estimar el peso específico de los sedimentos depositados (Ecuación 13) teniendo en cuenta el tamaño de las partículas de los sedimentos, la forma de operación del vaso y el tiempo transcurrido en años:

$$WT = W_1 + k * \log(T-1) \quad [13]$$

Donde WT es el peso específico del sedimento después de T años en el embalse, W₁ es el peso específico inicial y K una constante en función de la consolidación del sedimento.

Cuando el sedimento está compuesto por una mezcla de materiales, la ecuación adopta la siguiente forma (Ecuación 14):

$$WT = (X_1/100)*(W_1 + B_1 \log T) + (X_2/100)*(W_2 + B_2 \log T) + (X_3/100)*(W_3 + B_3 \log T) \quad [14]$$

Siendo WT el peso específico del sedimento después de T años en el embalse, X₁, X₂ y X₃ corresponden a los porcentajes de arena, limo y arcilla de la muestra, W₁, W₂ y W₃ son los pesos específicos iniciales para arena, limo y arcilla y B₁, B₂ y B₃ son las constantes de consolidación en función del material (Tabla 4):

Considerando que el porcentaje de arena, arcilla y limo es el mismo (33.3 % de cada material) y que se calcula para un tiempo estimado de T= 10 años, la densidad aparente del sedimento que colmata el embalse puede estimarse en WT = 1117.914 kg.m⁻³. Si aplicamos este valor como factor de conversión para pasar de t.año⁻¹ a Mm³.año⁻¹ llegamos a la conclusión de que llegarían al embalse una cantidad aproximada de 52.18 Mm³.año⁻¹ de sedimentos si la proporción de desplazamiento de sedimentos fuera igual a la unidad. Pero, tal y como se ha expuesto anteriormente, no todo el material erosionado pasa a ser sedimento en el embalse. Según datos relativos a la presa Mohamed V, el volumen medio de colmatación se aproxima a 10 Mm³.año⁻¹ (Haut Commissariat, 1996), lo que supondría

Condiciones del Embalse	Arena		Limo		Arcilla	
	W ₁	B ₁	W ₂	B ₂	W ₃	B ₃
Sedimentos siempre sumergidos	1490	0	1040	91.3	480	256
Embalse moderadamente vacío	1490	0	1185	43.2	737	171.4
Embalse considerablemente vacío	1490	0	1265	16.0	961	96.1
Embalse normalmente vacío	1490	0	1314	0	1249	0

Tabla 4. Valores para el cálculo del peso específico del sedimento después de T años.

una proporción de desplazamiento de sedimentos del 19.17 % del suelo total erosionado o, lo que es lo mismo, 225 t.km⁻².año⁻¹. Este dato se aproxima al obtenido por la Agencia Estadounidense de Desarrollo Regional (Ouazar, 2010), donde se estima que la cantidad de sedimentos que llegan a la presa se sitúa alrededor de 240 t.km⁻².año⁻¹. Este valor concuerda a su vez con un trabajo anterior presentado por Lahlou (1996).

Un estudio similar realizado por De Vente (2007) propone una ecuación para el cálculo del sedimento que llega a la presa en función del área total de la cuenca vertiente para cuencas situadas en Marruecos (Ecuación 15):

$$S = 19\ 193 A^{-0.43} \quad [15]$$

Donde S representa el sedimento depositado en la presa (t.km⁻².año⁻¹) y A es el área total de la cuenca vertiente en km².

Tras aplicar la ecuación 15 a la zona de la cuenca vertiente del río Moulouya aguas arriba de la presa Mohamed V (superficie total de 49 563 km²), estimamos una tasa de sedimentos depositada en el embalse de unas 183 t.km⁻².año⁻¹, valor muy próximo al obtenido en nuestros cálculos.

Los valores de tasa de erosión obtenidos en este estudio se sitúan dentro del rango de valores publicados en otros trabajos realizados en el Reino de Marruecos. La tasa de erosión media de la cuenca estudiada se sitúa en unas 12.11 t.ha⁻¹.año⁻¹, lo que equivale a una pérdida de perfil de suelo de unos 0.089 mm.año⁻¹ para un suelo de textura media (franco-arenoso a arenoso-limoso). Aunque se han efectuado progresos diversos en la determinación de la intensidad de la erosión en numerosos suelos y en muy diferentes medios climáticos, surge un problema cuando se trata de analizar la cantidad de degradación permisible o tolerable por un suelo manteniendo un nivel de productividad similar al iniciar el análisis. Para Estados Unidos se han dado cifras que oscilan entre 2 y 12.5 t.ha⁻¹.año⁻¹, según los tipos de suelo, su profundidad y propiedades físicas. En general se ha venido admitiendo que una pérdida de 12.5 t.ha⁻¹.año⁻¹ es el máximo aceptable para suelos bastante profundos, permeables y bien drenados, mientras que tasas de erosión de 2 a 4 t.ha⁻¹.año⁻¹ han sido también consideradas como admisibles para suelos con un subsuelo desfavorable y que presenten escasa profundidad. En el caso de la cuenca del río Moulouya se podría situar una tolerancia a pérdidas de suelo de unas 4 - 8 t.ha⁻¹.año⁻¹ para las zonas más elevadas aguas arriba de la presa Mohamed V, incrementándose hasta 10 t.ha⁻¹.año⁻¹ a lo largo de las llanuras fluviales. Estos valores límite han

resultado ligeramente superados, en términos de tasa media de erosión, según los resultados del presente trabajo.

Por último, la capacidad de embalse de la presa Mohamed V ha pasado de 726 Mm³, en la fase inicial, a 331 Mm³, lo que representa una reducción del 46 %. Según las estimaciones del Plan Nacional de Ordenación de las Cuencas Vertientes de 1994 (Plan National d'Aménagement des Bassins Versants) (Ministère de l'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole, 1994), la capacidad útil de esta presa sería prácticamente nula en 2020 y la colmatación sería completa en 2030, es decir, 64 años después de su puesta en marcha (Ouazar, 2010). Este escenario obliga a tomar en consideración la aplicación de medidas de conservación de suelos que reduzcan significativamente el actual aporte de sedimentos al embalse.

4. CONCLUSIONES

Con el fin de estimar la erosión hídrica potencial de la cuenca vertiente del río Moulouya aguas arriba del embalse Mohamed V, muy relacionada con su degradación ambiental y productiva, se ha empleado la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) como modelo sencillo de fácil aplicación en zonas donde escasean datos de campo disponibles para la aplicación de modelos más complejos. La estimación de la erosión hídrica en t.ha⁻¹ permite determinar con gran exactitud el horizonte de vida útil de embalses aguas abajo, en este caso la presa Mohamed V que constituye una infraestructura vital para la supervivencia y sostenibilidad del sistema agrícola compuesto por los productivos perímetros irrigados de Triffa, Zebra, Garet y Bou Areg situados en el Bajo Moulouya.

A través de la integración, mediante un Sistema de Información Geográfica, de las variables o geodatos que soportan el modelo USLE podemos llegar a delimitar espacialmente y de forma eficiente cuáles son las zonas más sensibles a la erosión y, por lo tanto, establecer medidas preventivas a nivel local y de forma muy precisa que limiten la pérdida de suelo en dichas áreas.

La evaluación del aporte de sedimentos procedentes de erosión hídrica a la presa Mohamed V ha sido contrastada con los datos aportados por la ORVAM y diferentes estudios realizados para la zona de Marruecos, llegando a la conclusión de que la tasa de desplazamiento de sedimentos hasta el embalse de 225 t.km⁻².año⁻¹ obtenida en este trabajo es una estimación razonable que puede emplearse como valor de referencia para futuros estudios.

Como posible línea de actuación se plantea un estudio más exhaustivo del aporte de sedimento producido por la erosión hacia la presa Mohamed V a través de la aplicación de modelos más sofisticados que integran pérdida de suelo y distribución espacial de tasas de deposición de sedimentos como el modelo waTEM/SEDEM (Van Rompaey, Verstraeten, Van Oost, Govers y Poesen, 2001). En cualquier caso, la aplicación de este tipo de modelos requeriría una mayor cantidad y calidad de datos de campo.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo ha sido cofinanciado y desarrollado en el marco del Programa de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores POCTEFEX 2008-2013 (Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FEDER) a través del proyecto de referencia 0065_COPTRUST_3_E denominado «Optimización de flujos productivos entre ámbitos territoriales ribereños mediante el aprovechamiento de sus complementariedades económicas».

REFERENCIAS

- Arnoldus, H. M. J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. FAO Soils Bulletin, 34, 39-51.
- Asiagbor, G., Forkuo, E. K., Laari, P., y Aabeyir, R. (2013). Modeling soil erosion using rusle and Gis tools. International Journal of Remote Sensing y Geoscience (IJRSG), 2(4), 7-17.
- Cavallar, W. (1950). Esquisse préliminaire de la carte des sols du Maroc. Recuperado de http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eudasm/africa/lists/k10_cma.htm
- Celik I., Aydin M., y Yazici U. (1996). A review of the erosion control studies during the republic period in Turkey. En S. Kapur, E. Akça, H. Eswaran, G. Kelling, Vita-Finzi, A-R. Mermut, A-D. Ocal (Ed.), 1st International Conference on land degradation, Adana, Turkey, 10-14 June 1996, (pp. 175–180). Adana, Turkey: International Working Group on Land Degradation and Desertification (IWGLDD-ISSS).
- Chen, Y. (2007). Using GIS for calculating soil erosion in Toutunhe River Bassin or arid Xin-Jian. En J. M. Lafren, J. Tian, C. H. Huang, (Eds): Soil erosion and dry land farming (pp. 359-379). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Chevalier, J. J., Pouliot J., Thomson K., y Boussema, M. R. (1995). Systèmes d'aide à la planification pour la conservation des eaux et des sols (Tunisie). Systèmes d'information géographique utilisant les données de télédétection. Actes du colloque scientifique international, 4-12.
- De Vente, J. (2007). The sediment delivery problem revisited. Progress in Physical Geography, 31(2), 155-178. doi: 10.1177/0309133307076485
- Desmet, P. J. J., y Govers, G. (1996). A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor On Topographically Complex Landscapes Units. Journal of Soil and Water Conservation, 51(5), 427-433.
- Desmet, P.J.J. (1997). Effects of interpolation errors on the analysis of DEMs. Earth Surface Processes and Landforms, 22, 563-580.
- El Aroussi, O., Mesrar, L., El Garouani, A., Lahrach, A., Beaabidate, L., Akdim, B., y Jabrane, R. (2011). Predicting the potencial annual soil loss using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in the Oued El Maleh catchment (Prerif, Morroco). Present Environment y Sustainable Development, 5(2), 5-15.
- FAO. (1986). La conservation et l'aménagement des sols dans les pays en développement. Bulletin pédologique de la FAO n° 33. Rome, Italy: FAO.
- FAO. (1990). Guidelines for soil description. Tercera Edición. Rome, Italy: FAO.
- Gruber, S., y Peckham, S. D. (2008). Land-surface parameters and objects specific to hydrology. In T. Heng y H. I. Reuter (Eds.), Geomorphometry: Concepts, Software and Applications. Developments in Soil Science, 33, 127 142.
- Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la lutte Contre la Désertification. (1996). Plan National d'Aménagement des Bassins Versants. Résumé et conclusions du rapport de synthèse. Recuperado de http://www.eauxetforets.gov.ma/admin/telechargement/fr/synth%C3%A8se_PNABV.pdf
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology. 25, 1965-1978.
- IPCC (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policymakers. An assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Chang: IPCC's Fourth Assessment Report (AR4). IPCC Plenary XXVII, Valencia, Spain. Recuperado de http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf
- Irvem, A., Topaloglu, F., y Uygur, V. (2007). Estimating spatial sistribution of soil loss over Seyhan river basin in Turkey. Journal of Hydrology, 336, 30-37.
- ISRIC World Soil Information. (2014). SoildGrids1km.

- Recuperado de <http://soilgrids1km.isric.org>
- Lane, E. W., y Koelzer, V. A. (1943). Density of sediments deposited in reservoirs, report 9 of a study of methods used in measurement and analysis of sediment loads in streams, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, St. Paul, Minnesota, U.S.: Project Offices of Cooperating Agencies.
- Lahlou, A. (1996). Environmental and socio-economic impacts of erosion and sedimentation in North of Africa. *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*, 263, 491-500.
- Laouina A., Nafaa R., Coelho C., Chaker M., Carvalho T., Boulet AN., y Ferreira A. (2000). Gestion des eaux et des terres et phénomènes de dégradation dans les collines de Ksar El Kebir, Maroc. *Bulletin du réseau erosion*, 20, 256-274.
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., y Daroussin J. (2002). L'érosion hydrique des sols en France. Centre de recherche d'Orléans, Olivet, France : INRA, IFEN.
- Le ministère Délégué Auprès du Ministre de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, Chargé de l'eau. (2014.) Recuperado de www.water.gov.ma
- METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, y USGS/EROS. (2009). ASTER Global DEM Validation Summary. Recuperado de https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/aster/docs/ASTER_GDEM_Validation_Summary_Report.pdf
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC. Recuperado de <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Ministère de l'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole. (1994). Plan national d'aménagement des bassins versants. Phase II, Volume 2. Rabat, Marruecos : Agro Concept.
- Morsli B., Habi M., Mazour M., Hamoudi A., y Halitim A. (2012). Erosion et ruissellement en montagnes méditerranéennes d'Algérie du Nord: analyse des facteurs conditionnels sous pluies naturelles et artificielles. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 1, 33-40.
- Ouazar, D. y Tayaa, M. (2010). Morocco economic competitiveness: Analyse et identification des besoins pour des systèmes d'information et de gestion des ressources en eau pour l'agence du bassin hydraulique et de l'ORMVA Bassin Hydraulique de la Moulouya et d'OUM Er-rbia. Rabat, Maroc : United States Agency for International Développement et DAI/ Maroc.
- Payet, E., Dumas, P., y Pennober, G. (2011). Modélisation de l'erosion hydrique des sols su un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana. *Vertigo- La revue électronique en sciences de l'environnement*, 11(3), 1-26.
- Römkens, M.J.M. (1985). The soil erodibility factor: a perspective. En S.A., El-Swaify, W.C., Moldenhauer, A., Lo, (Ed.), *Soil Erosion and Conservation* (pp. 445-461). Ankeny, Iowa, EE.UU: Soil Conservation Society of America.
- Roosé E., y Sarraih J.M. (1990). Erodibilité de quelques sols tropicaux, vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahiers de l'ORS-TOM, Serie Pedologique*, 25(1), 7-30.
- Roosé, E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. *Bulletin pédologique de la FAO* 70. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/T1765F/t1765f00.htm>
- Sadiki, A., Bouhlassa, S., Auajjar, J., Faleh, A., y Macaire, J.J. (2004). Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc): cas du bassin versant de l'oued Boussouab. *Bulletin de l'Institut Scientifique*, 26, 69-79.
- Soutter M., Mermoud A., y Musy A. (2007). Ingénierie des eaux et du sol Processus et aménagements. Lausanne, Suiza : Presse polytechniques et universitaires romandes.
- Van Rompaey, A., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G., y Poesen, J. (2001). Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1221-1236.
- Wischmeier, W. H., y Mannering, J. V. (1969). Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society of America*, 33(1), 131-137. doi:10.2136/sssaj1969.03615995003300010035x
- Wischmeier, W. H., y Smith, D. D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook, n° .537, Department of Agriculture Science and Education administration, Washington, USA: U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- World Bank and Government of Morocco (2008). Study on the impact of climate change on the agricultural sector. WB/Morocco/FAO Climate Change Study, 105 p. http://www.fao.org/nr/climpag/pub/FAO_WorldBank_Study_CC_Morocco_2008.pdf
- WorldClim - Global Climate Data. (2014). Free climate data for ecological modelling and GIS. Recuperado de <http://www.worldclim.org/tiles.php>
- Zevenbergen, L. W., y Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth surface processed and landforms*, 12, 47-56.

Sobre los autores

María del Mar Saldaña Díaz

Recibió el grado de Doctor en Tecnología de Invernaderos e Ingeniería Industrial y Ambiental por la Universidad de Almería en el año 2013. Comenzó su actividad investigadora en 2010, trabajando con imágenes de satélite de alta resolución como GeoEye-1 y WorldView-2, participando posteriormente en el proyecto del plan nacional «Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir imágenes de los satélites GeoEye-1 y WorldView-2». Actualmente es PDI en la Universidad de Almería en el departamento de Ingeniería formando parte del equipo de trabajo del proyecto 0065_COPTRUST_3_E denominado «Optimización de flujos productivos entre ámbitos territoriales ribereños mediante el aprovechamiento de sus complementariedades económicas» dentro del marco del Programa de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores POCTEFEX 2008-2013 (Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FEDER). Sus áreas de interés están relacionadas con teledetección, sistemas de información geográfica e imágenes de satélite de muy alta resolución.

Abderrahim Nemmaoui

Recibió su grado de Doctor por la Universidad de Almería, España, en el año 2011. Actualmente es PDI en la Universidad de Almería en el Departamento de Ingeniería y coordinador del proyecto 0065_COPTRUST_3_E denominado «Optimización de flujos productivos entre ámbitos territoriales ribereños mediante el aprovechamiento de sus complementariedades económicas» dentro del marco del Programa de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores POCTEFEX 2008-2013 (Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FEDER). Sus áreas de interés están relacionadas con la ordenación del territorio, teledetección y sistemas de información geográfica.

María Yolanda Cantón Castilla

Profesora Titular del Departamento de Agronomía de la Universidad de Almería. Inició su carrera investigadora en la Estación Experimental de Zonas Áridas (CSIC), dentro del grupo de investigación de Desertificación y Geoecología, donde desarrolló su tesis doctoral. En esa etapa inicial los principales intereses científicos estaban relacionados con las relaciones interactivas entre procesos geomorfológicos, evolución del suelo y vegetación en ecosistemas áridos y semiáridos, y su respuesta al cambio climático. Desde esa primera etapa, abordó los procesos con una perspectiva multiescalar, para lo cual se inició en las herramientas SIG y Teledetección que desde entonces aplica en su investigación y que son el centro de su docencia. Desde hace unos

pocos años, su investigación se ha centrado en el papel de las biocostras en los ecosistemas áridos y semiáridos, concretamente en los efectos de las biocostras en los balances de agua y carbono a diferentes escalas espaciales. Sus principales intereses investigadores son: i) el análisis de los balances de agua y carbono a diferentes resoluciones espaciales y temporales en ecosistemas semiáridos; ii) la evaluación y seguimiento de la degradación de suelos, enfocada principalmente en la erosión hídrica y recientemente; iii) la restauración ecológica.

Manuel Ángel Aguilar Torres

Recibió los grados de Ingeniero Agrónomo y Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universidad de Córdoba, España, en 1996 y 2001 respectivamente. En 1999 comenzó su andadura como profesor de Expresión Gráfica en la Ingeniería, tras dos años en la empresa privada. Actualmente es profesor Titular de Universidad en la Universidad de Almería y pertenece al departamento de Ingeniería. En los últimos años ha liderado dos proyectos de investigación trabajando con imágenes de satélite de alta resolución (IKONOS, QuickBird, GeoEye-1 and WorldView-2). Sus áreas de interés están relacionadas con la orientación y ortorectificación de imágenes de satélites VHR, modelos digitales de elevaciones, teledetección y fotogrametría digital. Es autor de numerosas publicaciones internacionales JCR (Science Citation Index) principalmente en las categorías de Remote Sensing y Agriculture Multidisciplinary, Imaging Science & Photographic Technology y Geosciences Multidisciplinary.

Fernando José Aguilar Torres

Recibió su grado de Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universidad de Córdoba, España, en el año 1997. Actualmente es Catedrático de la Universidad de Almería en el Departamento de Ingeniería y responsable del grupo de investigación «Gestión Integrada del Territorio y Tecnologías de la Información Espacial», liderando el proyecto 0065_COPTRUST_3_E denominado «Optimización de flujos productivos entre ámbitos territoriales ribereños mediante el aprovechamiento de sus complementariedades económicas» dentro del marco del Programa de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores POCTEFEX 2008-2013 (Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FEDER). Sus áreas de interés están relacionadas con los modelos digitales de elevaciones, teledetección, fotogrametría digital y sistemas de información geográfica. Es autor de numerosas publicaciones internacionales, siendo además revisor habitual de varias revistas indexadas (JCR Science Citation Index) especializadas en las disciplinas comentadas anteriormente.