

COOPTRUST

Collaboration, Opportunity and Trust



“ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN POTENCIAL EN LA CUENCA VERTIENTE DEL RÍO MOULOYA AGUAS ARRIBA DE LA PRESA MOHAMED V” PROYECTO COOPTRUST

0065_COPTTRUST_3_E

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	3
	ZONA ORIENTAL	4
2.	OBJETIVOS	7
3.	ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA	7
	3.1. ZONA DE ESTUDIO	7
	3.2. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES	7
	3.3. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES <i>ASTER GDEM V2</i>	8
4.	MATERIAL Y MÉTODOS.....	9
	4.1. OBTENCIÓN DE LA CUENCA VERTIENTE	9
	4.2. APLICACIÓN DEL MODELO USLE	9
	4.2.1. FACTOR R: EROSIVIDAD DE LAS PRECIPITACIONES	10
	4.2.2. FACTOR K: EROSIONABILIDAD DEL SUELO.....	12
	4.2.3. FACTOR LS: LONGITUD Y PENDIENTE DE LA LADERA	13
	4.2.4. FACTORES C Y P: CULTIVO Y MANEJO DEL SUELO	14
5.	RESULTADOS.....	15
	5.1. OBTENCIÓN DE LA CUENCA VERTIENTE	15
	5.2. APLICACIÓN DEL MODELO USLE.....	15
	5.2.1. FACTOR R: EROSIVIDAD DE LAS PRECIPITACIONES	15
	5.2.2. FACTOR K: EROSIONABILIDAD DEL SUELO	17
	5.2.3. FACTOR LS: LONGITUD Y PENDIENTE DE LA LADERA	18
	5.2.4. FACTOR C: CULTIVO DEL SUELO	22
	5.2.5. TASA DE EROSIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	23
6.	CONCLUSIONES	26
7.	ANEXO	28
8.	BIBLIOGRAFÍA	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Cuencas hidrográficas de Marruecos. Rapport national, 2004. DRPE.	5
Fig. 2. Evolución de los caudales observados y de las precipitaciones medias anuales en la cuenca vertiente del Río Moulouya (Estación Dar El Caid) (Anexo).	6
Fig. 3. Mapa de las medias anuales de la acumulación de las precipitaciones en mm.	6
Fig. 4. Localización de la zona de estudio.	7
Fig. 5. Modelo <i>ASTER GDEM v2</i> para la zona de estudio de la cuenca hidrográfica del río Moulouya.	9
Fig. 6. Obtención de la cuenca vertiente aguas arriba de la presa Mohamed V.	15
Fig. 7. Valor medio de las precipitaciones anuales (mm/año).	16
Fig. 8. Valores del factor R ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$).	17
Fig. 9. Valores obtenidos para el factor K ($\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$) en función del tipo de suelo.	18
Fig. 10. Representación del modelo <i>ASTER GDEM v2</i> de la zona de estudio: a) modelo <i>ASTER GDEM v2</i> con resolución horizontal de 30 m b) modelo <i>ASTER GDEM v2</i> suavizado con resolución de 120 m. Nota: Cotas de la leyenda expresadas en metros sobre el nivel del mar. Unidades de la escala gráfica en metros	19
Fig. 11. Mapa de pendientes (expresadas en tanto por uno) obtenido a partir del modelo <i>ASTER GDEM v2</i> suavizado.	20
Fig. 12. Representación de la red de drenaje de la cuenca vertiente del río Moulouya. Marruecos.	21
Fig. 13. Distribución espacial de los valores obtenidos para el Factor LS	22
Fig. 14. Cartografía de la distribución espacial de los valores empleados para el Factor C	23
Fig. 15. Distribución espacial de la tasa de erosión estimada mediante la aplicación de la ecuación de la $USLE$ en $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$	24
Fig 16. Evolución de la capacidad de embalse y colmatación de la presa Mohamed V.	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variación de K en función del tipo de suelo.	13
Tabla 2. Variación de m en función de la pendiente (según Wischmeier y Smith, 1978)	13
Tabla 3. Coeficientes del factor C en función del tipo de cobertura del suelo.	14
Tabla 4. Valores para el cálculo del peso específico del sedimento después de T años.	25

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN POTENCIAL EN LA CUENCA VERTIENTE DEL RÍO MOULOUYA (MARRUECOS)

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo la estimación de la tasa de erosión y pérdida de suelos anual en la cuenca vertiente del río Moulouya aguas arriba de la presa Mohamed V. En este sentido 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*, calculado en varios ámbitos y a diferentes escalas, 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*). Este estudio constituye una primera aproximación a la identificación de los procesos de alteración de la cuenca vertiente del río Moulouya y pretende servir como herramienta para ayudar a explicar las dinámicas actuales.

1. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es cada vez más preocupante, causando una significativa pérdida de tierras cultivables y la colmatación de las presas en la región del Mediterráneo (Hudson, 1991). 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 (Heusch, 1970; Demmak, 1982; Meddi, 1992; Roose et al., 1997; Laouina et al., 2000; Touaibia et al., 2000; Morsli et al., 2012).

Por otro lado, numerosos trabajos han puesto en evidencia que, en el caso de la cuenca mediterránea, la tasa de erosión difiere significativamente de un país a otro. Por ejemplo, en la cuenca vertiente de Oued El Maleh (Prerif-Marruecos) se estimó una tasa de erosión entre 5 y 150 t/ha/año (El Aroussi et al., 2011), mientras que el caso del Líbano la tasa de erosión estimada variaba entre 50 y 70 t/ha/año (FAO, 1986). En un estudio realizado en Turquía (Celik et al., 1996) se estimó una pérdida de suelo global entre 500 y 600 Mt/año. Y según el estudio realizado por Chevalier et al., (1995) se llega a la conclusión de que el 40 % de los suelos en Marruecos y el 50 % en Túnez están amenazados por la erosión.

El impacto de la lluvia sobre el fenómeno de la erosión de los suelos es un hecho ampliamente conocido. Según describió Ellison en 1944, la energía de las gotas de lluvia desencadena el proceso de destrucción de los agregados del suelo en las laderas con pendientes bajas y medias, mientras que la escorrentía asegura el transporte de las partículas desagregadas. Este fenómeno ha sido constatado por Wischmeier (1960), entre otros autores, en Estados Unidos. Roose (1977a) demostró que la energía cinética de la lluvia en África Occidental resultaba ser una variable predictiva de la tasa de erosión hasta 256 veces más importante que la escorrentía.

La erosión hídrica es un proceso de disgregación y transporte de las partículas del suelo por acción del agua. Se trata de un fenómeno natural que se ha visto acelerado por el uso intensivo y el manejo inadecuado de las suelos agrícolas (FAO, 1990). Del mismo modo se define la degradación como “un proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir (cuantitativamente o cualitativamente) bienes o servicios (FAO, 1980).

La modelización *USLE* (*Universal Soil Loss Equation*) implementada por [Wischmeier y Smith \(1978\)](#) permite proporcionar una estimación de las partículas del suelo susceptibles de ser desagregadas y determinar, 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 pérdida 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.

ZONA ORIENTAL

El embalse Mohamed V, situado en la zona oriental de Marruecos, se encuentra situado en la cuenca hídrica del río Moulouya, al Noreste de Marruecos, con una superficie próxima a los 55.500 km² (www.water.gov.ma). El río Moulouya, con una longitud de unos 600 Km, surge en Alemsid, a una altitud de 1.170 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 (período 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 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](#)).

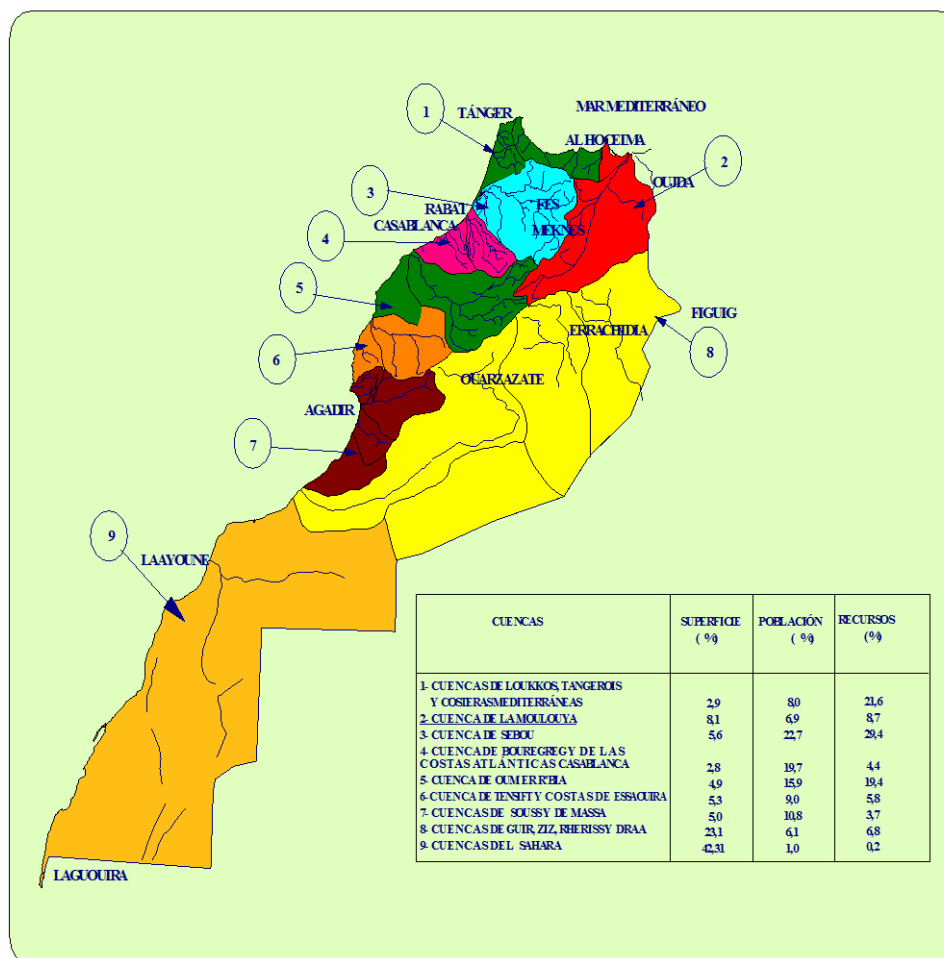


Fig. 1. Cuencas hidrográficas de Marruecos. Bzioui, 2004.

Según los datos aportados por la Dirección de Investigación y Planificación de las aguas de Marruecos (*Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau, DRPE*), donde aparecen todas las cuencas hidrográficas de Marruecos (Fig. 1), la cuenca vertiente del río Moulouya ocupa el 8,1% de la superficie total de Marruecos, aportando el 8,7% de los recursos hídricos del Reino de Marruecos.

En cuanto al clima de la cuenca vertiente del río Moulouya, predomina el clima mediterráneo con una pluviometría anual relativamente baja e irregular (valores anuales medios de 200 a 400 mm). Las temperaturas medias varían generalmente entre 5°C y 18°C en las temporadas frías y entre 18°C y 31°C en las épocas calurosas. Los cambios climáticos son generalmente asociados a una circulación ciclónica al Oeste de la cuenca vertiente (Knippertz et al. 2003).

En cuanto a los datos de pluviometría, en la Fig. 2 se puede apreciar la gran variabilidad interanual de las lluvias y caudales generados en la cuenca vertiente del río Moulouya. En cuanto a la relación lluvias/caudales puede apreciarse una relativa correlación en prácticamente todo el período presentado que abarca un total de 42 años (1958-2000). Para estos datos se obtiene un coeficiente de correlación lluvia/caudal de 0,8 tal (Dríouech, 2010). En dicho estudio, y para el período comprendido entre los años 1958 y 2000, las precipitaciones y los caudales han tendido a disminuir una cantidad anual de 2,8 mm y 3,5 m³/s respectivamente.

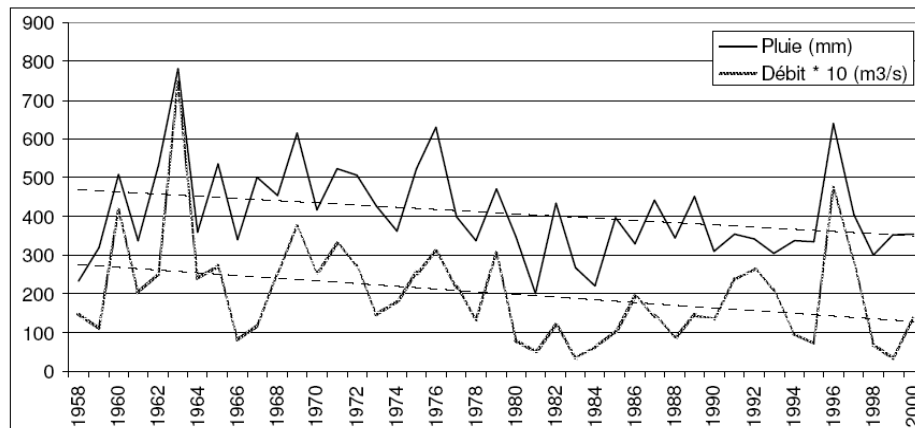


Fig. 2. Evolución de los caudales observados y de las precipitaciones medias anuales en la cuenca vertiente del Río Moulouya (Estación Dar El Caid) (Anexo).

En la Fig. 3 se aprecia como la media anual de las precipitaciones disminuye en dirección Sur-Oeste. Solamente las altas montañas situadas en el extremo Noroeste reciben más de 800 mm de precipitación media anual. La mayor parte del país recibe una media anual que no supera los 400 mm. La fuerte variabilidad interanual es también una característica de las precipitaciones mediterráneas. El coeficiente de variabilidad interanual de la precipitación anual en nuestra zona de estudio (zona Nororiental de Marruecos) se sitúa en valores del 30 % al 40%, siendo significativamente mayor en la región Sur con valores superiores al 70% (Knippertz et al., 2003; Dríouech et al., 2009).

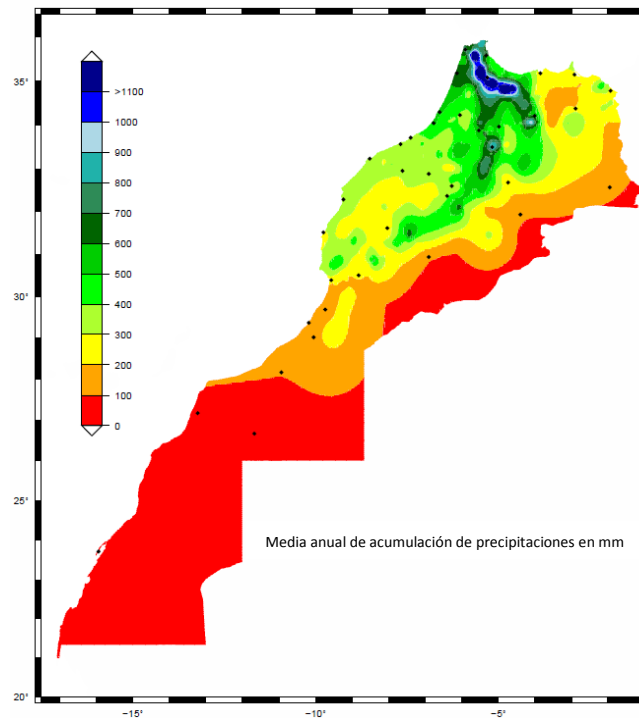


Fig. 3. Mapa de las medias anuales de la acumulación de las precipitaciones en mm. *Direction de la Météorologie Nationale, Maroc*, (en Dríouech, F., 2010).

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este estudio consiste en la estimación de la tasa de erosión potencial de la cuenca vertiente del río Moulouya aguas arriba de la presa Mohamed V (región Oriental de Marruecos) a través de la aplicación de la ecuación de pérdida de suelo de la *USLE*.

Para poder llevar a cabo la consecución del objetivo general se deben acometer diversos objetivos específicos como son los siguientes:

- Integración de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelos *USLE* en el contexto de un *SIG* (*Sistema de Información Geográfica*).
- Estimación de la pérdida de suelo en la zona de estudio.
- Interpretación de los resultados y validación de los mismos a través de su comparación con los datos disponibles en la zona de trabajo.

3. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA

3.1. 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. El río Moulouya nace en el Atlas Medio y discurre unos 600 km hasta desembocar en Saïdia (Ras el Ma), en el mar Mediterráneo. Está centrada en las coordenadas UTM 466.161 m este y 3.713.140 m norte expresadas en el sistema de referencia WGS84.

En la Fig. 4 podemos ver la localización por donde discurre el río Moulouya y la localización de la presa Mohamed V.

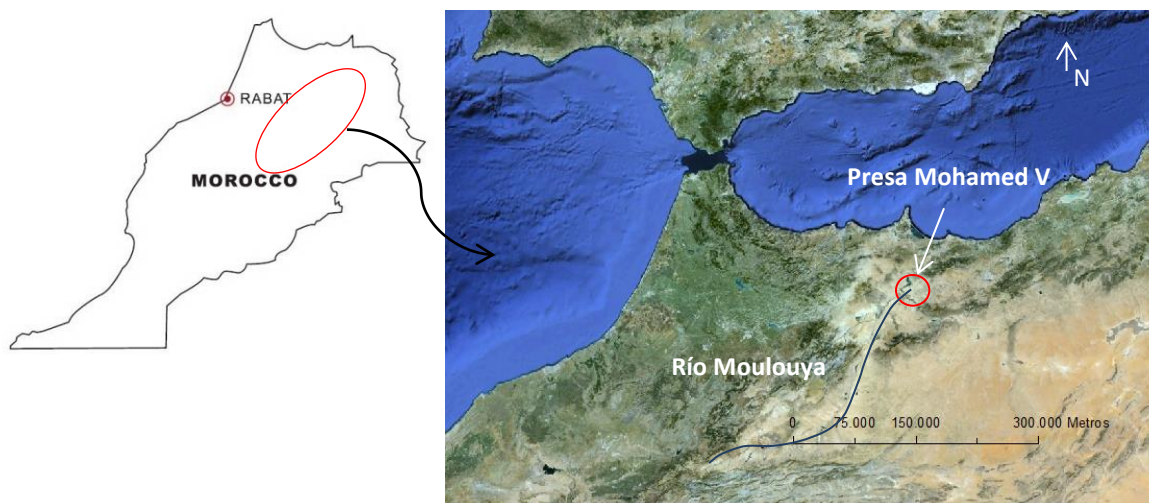


Fig. 4. Localización de la zona de estudio.

3.2. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

Un Modelo Digital del Terreno (*Digital Terrain Model, DTM*) constituye una representación numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Cuando la variable representada son las cotas o elevaciones del terreno, el *DTM* pasa a denominarse *DEM* (*Digital Elevation Model, DEM*).

Los *DTM* o *DEM* deben cumplir dos condiciones: (i) la primera es que debe existir una estructura interna de los datos que represente las relaciones espaciales entre los mismos; (ii) que la variable a representar debe de ser continua y de tipo cuantitativo. En un *DTM* las variables a representar son extraordinariamente diversas, aunque la más frecuente, sin duda, es la representación de la cota o altitud de los puntos que definen la superficie del terreno, dando lugar a los *DEM*, que en este sentido pueden considerarse como la versión digital de las curvas de nivel representadas en los mapas topográficos clásicos.

Se acepta que la elevación representada en un *DEM* es la cota de la superficie del terreno, por lo que deberíamos obviar estructuras como edificios o elementos como árboles (microrrelieve). En el caso de incluir estos elementos se suele hablar de Modelos Digitales de Superficie (*DSM*). Este término se está usando cada vez con mayor frecuencia debido a que algunos nuevos métodos de captura de datos de elevación (e.g. *LiDAR*) incluyen todos los elementos superficiales, sin aislar o filtrar el terreno del resto de estructuras (Cuartero, 2003)

3.3. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES ASTER GDEM V2

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 adquirido 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). El modelo digital de elevaciones *ASTER GDEM v2* correspondiente a la cuenca hidrográfica del río Moulouya puede observarse en la Fig. 5.

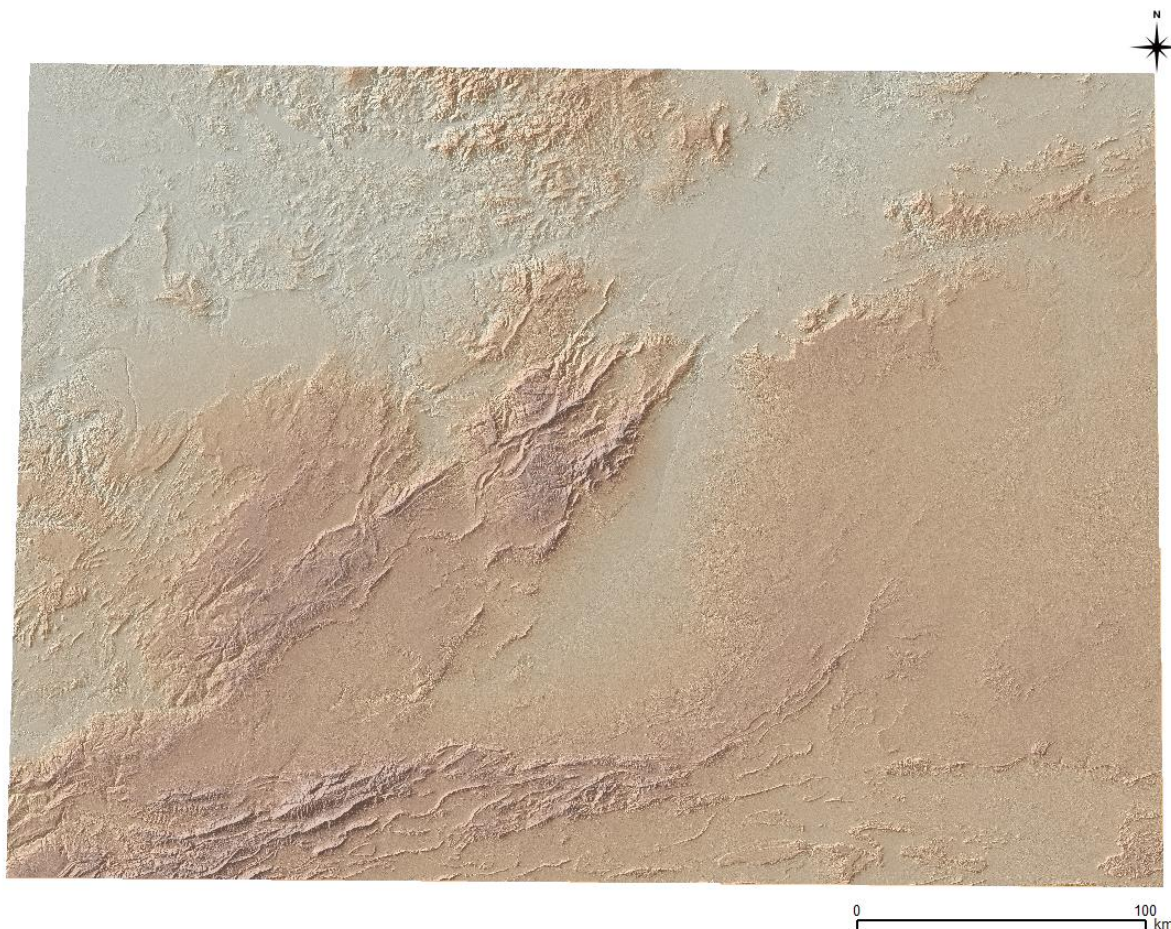


Fig. 5. Modelo ASTER GDEM v2 para la zona de estudio de la cuenca hidrográfica del río Moulouya.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. 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, debemos delimitar el área ocupada por la cuenca vertiente del río Moulouya aguas arriba de la presa citada. Para ello, a partir de los datos *ASTER GDEM v2* y mediante la implementación del módulo de análisis hidrológico de *ArcGIS v. 10* se procedió, en un primer paso, a la delineación automática de la cuenca vertiente (fichero vectorial en formato SHP).

4.2. APLICACIÓN DEL MODELO USLE

Para el cálculo de la tasa de erosión potencial en la cuenca del Río Moulouya aplicamos la conocida ecuación de la *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. De esta forma la ecuación de la *USLE* vendría dada por la siguiente expresión:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

Donde **A** es la pérdida de suelo en $t \cdot ha^{-1}$, **R** es la erosividad de las precipitaciones ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$), **K** es la erosionabilidad del suelo ($t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$), **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 exhaustiva de los parámetros que intervienen en la ecuación de la *USLE*.

4.2.1. 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 et al., 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 6h. 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 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):

$$e_i = 1,213 + 0,89 * \log I_M \quad (4)$$

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 $mm \cdot h^{-1}$, siendo las unidades finales las de energía por unidad de superficie y mm de precipitación en la forma $J \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$.

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

$$E_i = e * pp_i \quad (5)$$

Donde E_i es la energía total de cada intervalo, e_i 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 años con el fin de obviar la variabilidad temporal de la intensidad y frecuencia de los episodios de tormenta. Se puede simplificar el cálculo con el uso de simuladores de lluvia tal y como se ha demostrado en diferentes estudios (e.g. Wischmeier et al., 1971; Sanroque, 1988).

Debido a la falta de datos para el cálculo del parámetro I_{30} 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 Irvem et al. (2007) o Payet et al. (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):

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} p_i^2 / P \quad (8)$$

Donde p_i (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 (Irvem et al. 2007). Por ello Arnoldus (1977) estableció un mapa de isoeredentas 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 WorldClimb (<http://www.worldclim.org/tiles.php>), y 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 Meteorological 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 et al., 2005).

4.2.2. 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 múltiples (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):

$$K = 2,1 * M^{1,14} * 10^{-6} (12-MO) + 0,0325 * (b-2) + 0,025 * (c-3) \quad (10)$$

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):

$$M = (Arena\ fina\ (\%) + Limo) * (100 - Arcilla(\%)) \quad (11)$$

Cabe indicar 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), por lo que 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, Ashiagbor et al., 2013). En este sentido, y para poder clasificar los tipos de suelo dentro del área estudiada, se ha empleado la base de datos global en formato ráster proporcionada por SoilGrids1km (<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 (perfiles de suelo y capas de covarianza). Los datos obtenidos para este estudio fueron actualizados el 2 de abril de 2014.

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).

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

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	0,194
Calcisols	0,22
Cambisols	0,25
Fluvisols	0,20
Kastanozems	0,16
Leptosols	0,20
Luvisols	0,234
Phaeozems	0,3
Regosols	0,15
Vertisols	0,11

4.2.3. FACTOR LS : LONGITUD Y PENDIENTE DE LA LADERA

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, E., 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. Del mismo modo, la capacidad de transporte de sólidos en suspensión crece de manera exponencial con el aumento de la velocidad del flujo (Zingg, A. W., 1940)

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

$$LS = (\lambda/22,1)^m * (65,4 \sin \vartheta^2 + 4,56 \sin \vartheta + 0,065) \quad (12)$$

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).

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

PORCENTAJE DE LA PENDIENTE (%)	FACTOR m CORRESPONDIENTE
≥ 5	0,5
3,5 - 4,5	0,4
1 - 3	0,3
< 1	0,2

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* (Moore et al., 1991; Desmet y Govers, 1996; Böhner y Selige, 2006). 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).

4.2.4. FACTORES 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 (Soutter et al., 2007).

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; El Garouani et al., 2008). 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 1/1500000 (Cavallar, 1950).

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

Tipo de cultivo	Valor del factor C
Suelo desnudo	1
Bosque degradados	0,7
Árboles y arbustos	0,3
Área de reforestación	0,18

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).

5. RESULTADOS

5.1. OBTENCIÓN DE LA CUENCA VERTIENTE

Una vez obtenido el *DEM* procedente del modelo *ASTER GDEM v2*, se procedió al cálculo de la cuenca vertiente del río Moulouya mediante el módulo de hidrología implementado en *ArcGis v.10*, obteniendo un mapa con la cuenca vertiente aguas arriba de la presa Mohamed V que se utilizará a partir de ahora como zona de actuación, tal y como se presenta en el mapa de la Fig. 6. 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.

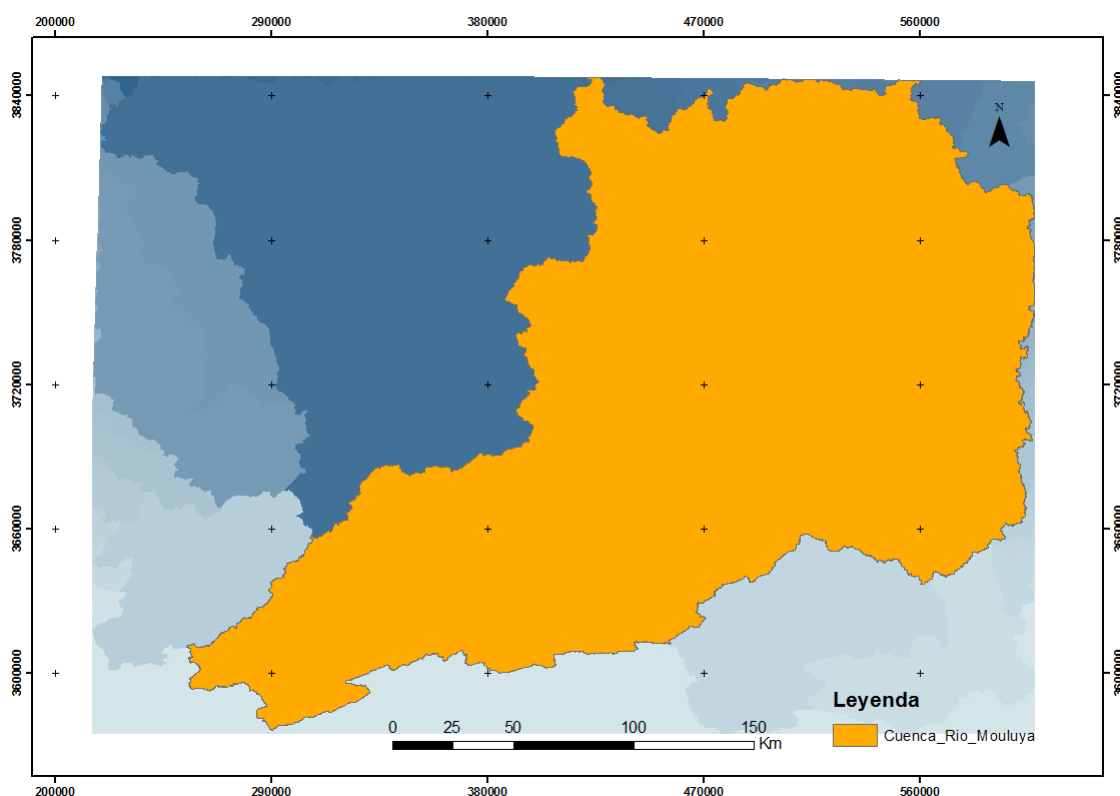


Fig. 6. Obtención de la cuenca vertiente aguas arriba de la presa Mohamed V.

5.2. APLICACIÓN DEL MODELO USLE

Los resultados obtenidos representan, por un lado, los cálculos detallados de los diferentes parámetros que intervienen en el cálculo de la ecuación de la *USLE*: *R*, *K*, *LS*, *C* y *P* (Ecuación 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.

5.2.1. 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. Para ello calculamos el valor medio de las precipitaciones anuales a partir de los datos proporcionados por *WorldClim* obteniendo el mapa mostrado en la Fig. 7, donde podemos

observar como las zonas donde se encuentran las mayores precipitaciones anuales se localizan en las zonas elevadas, llegando a alcanzar valores medios de hasta 850 mm.año^{-1} .

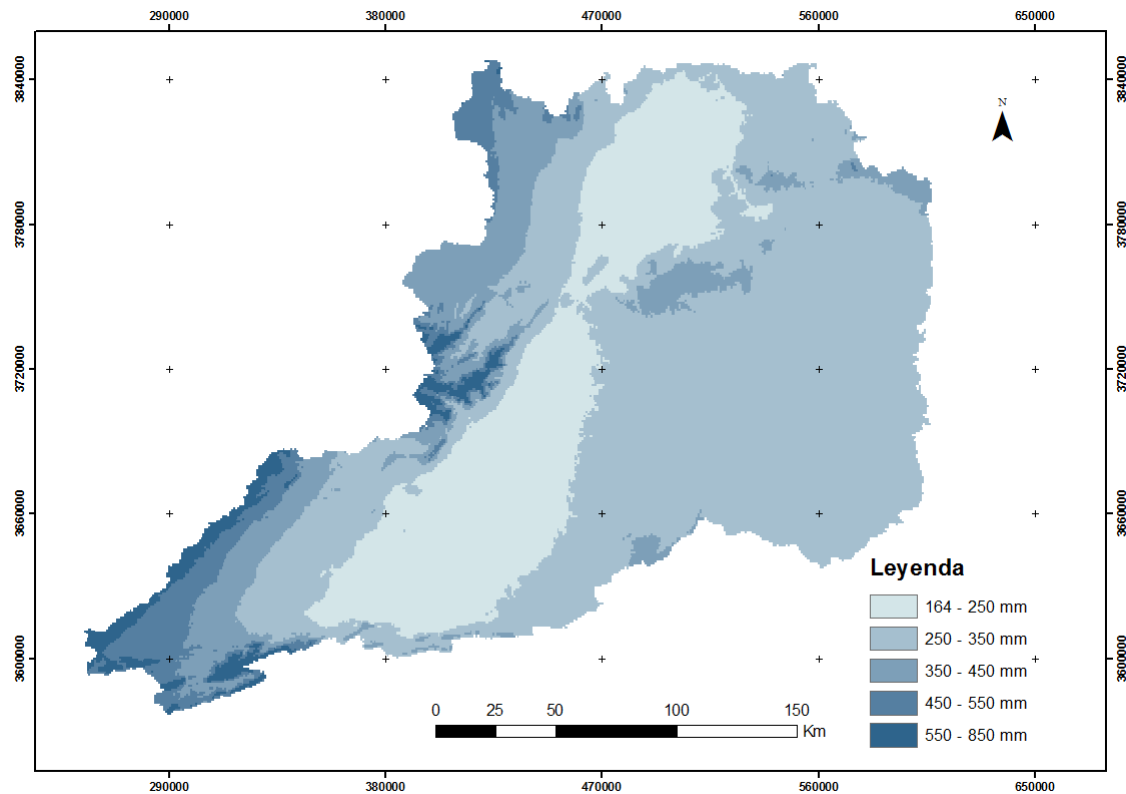


Fig. 7. Valor medio de las precipitaciones anuales (mm/año).

En relación a la distribución de las precipitaciones en función de la altitud, en el mapa temático obtenido tras calcular el factor R mediante la aplicación del índice IMF para la zona de estudio podemos observar un crecimiento de los valores de dicho factor en relación con la elevación sobre el nivel del mar, variando entre 18 y $190 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{año}^{-1}$. En efecto, los valores más elevados se corresponden con las zonas de mayor altitud, aunque son los menos abundantes, predominando los valores en el intervalo de 18 a $80 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{año}^{-1}$. La distribución espacial del factor R en el área de estudio puede observarse en el mapa temático de la Fig. 8. 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 $300 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{año}^{-1}$.

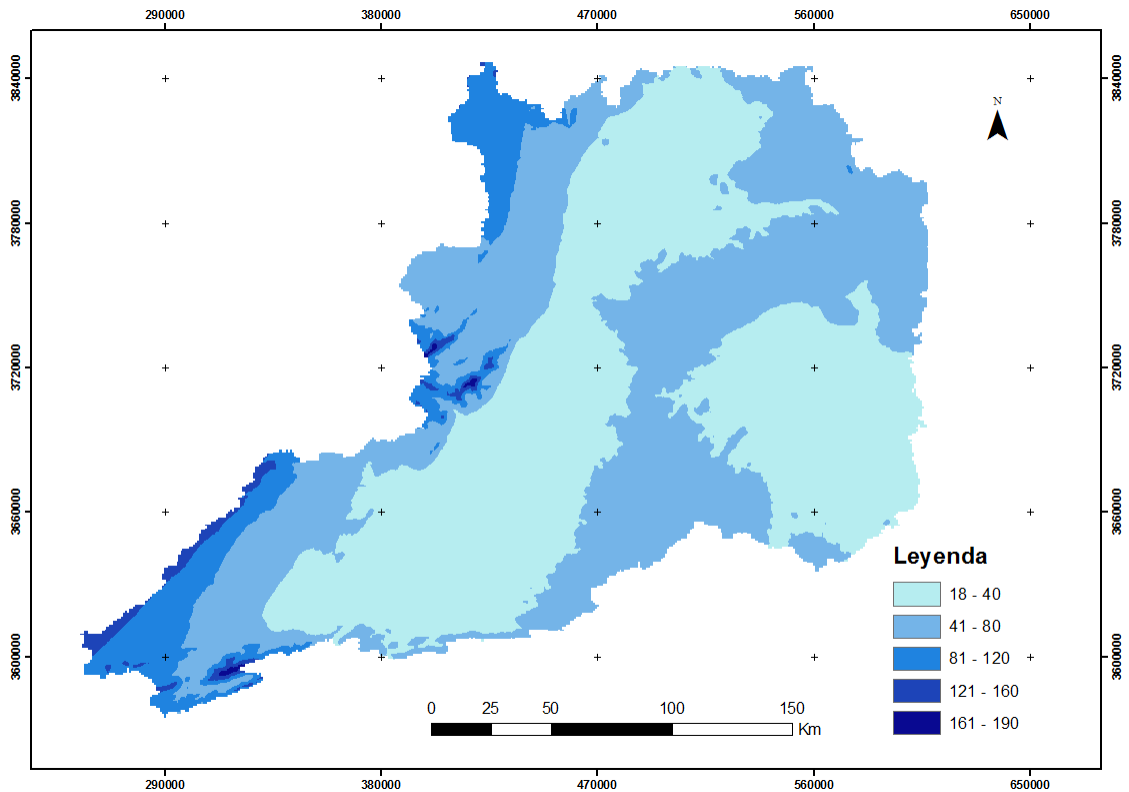


Fig. 8. Valores del factor R ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$).

5.2.2. FACTOR K: EROSIONABILIDAD DEL SUELO

La presencia de diferentes tipos de suelo en la zona de la cuenca vertiente del río Moulouya propicia que los valores del factor K varíe entre 0,11 y 0,3 $\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ (Fig. 9). La relación entre la textura del suelo y la erosionabilidad de los mismos ha contribuido a delimitar los suelos más erosionables de la cuenca vertiente del río Moulouya. En efecto, si nos fijamos en el mapa de la Fig. 9 y tenemos en cuenta la relación entre el factor K y los tipos de suelo de la Tabla 1, podemos comprobar como las zonas más sensibles a la erosión corresponden a suelos clasificados como *luvisoles* o *phaeozems*, mientras que los suelos catalogados como *vertisoles*, *regosoles* o *andosoles*, y *arenosoles* presentan una menor susceptibilidad a la erosión (menor valor del factor K).

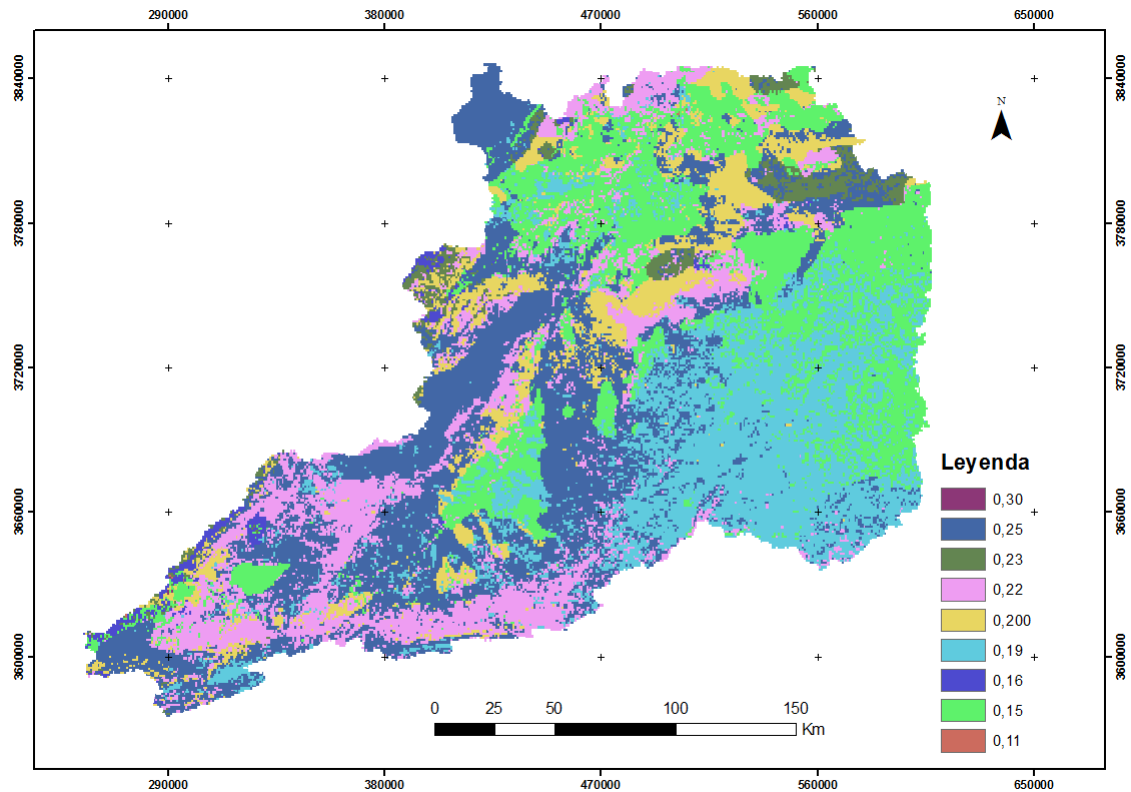


Fig. 9. Valores obtenidos para el factor K ($\text{t.ha.h.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$) en función del tipo de suelo.

5.2.3. FACTOR LS: LONGITUD Y PENDIENTE DE LA LADERA

El *DEM* elegido juega un papel fundamental para el estudio del 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 (Fig. 10). Como podemos apreciar en la Fig. 10.b, el suavizado del *DEM* original representa de una forma visualmente más adecuada y realista la topografía de la cuenca vertiente del río Moulouya, eliminando eficazmente el ruido inherente al *ASTER GDEM v2* inicial (Fig. 10.a).

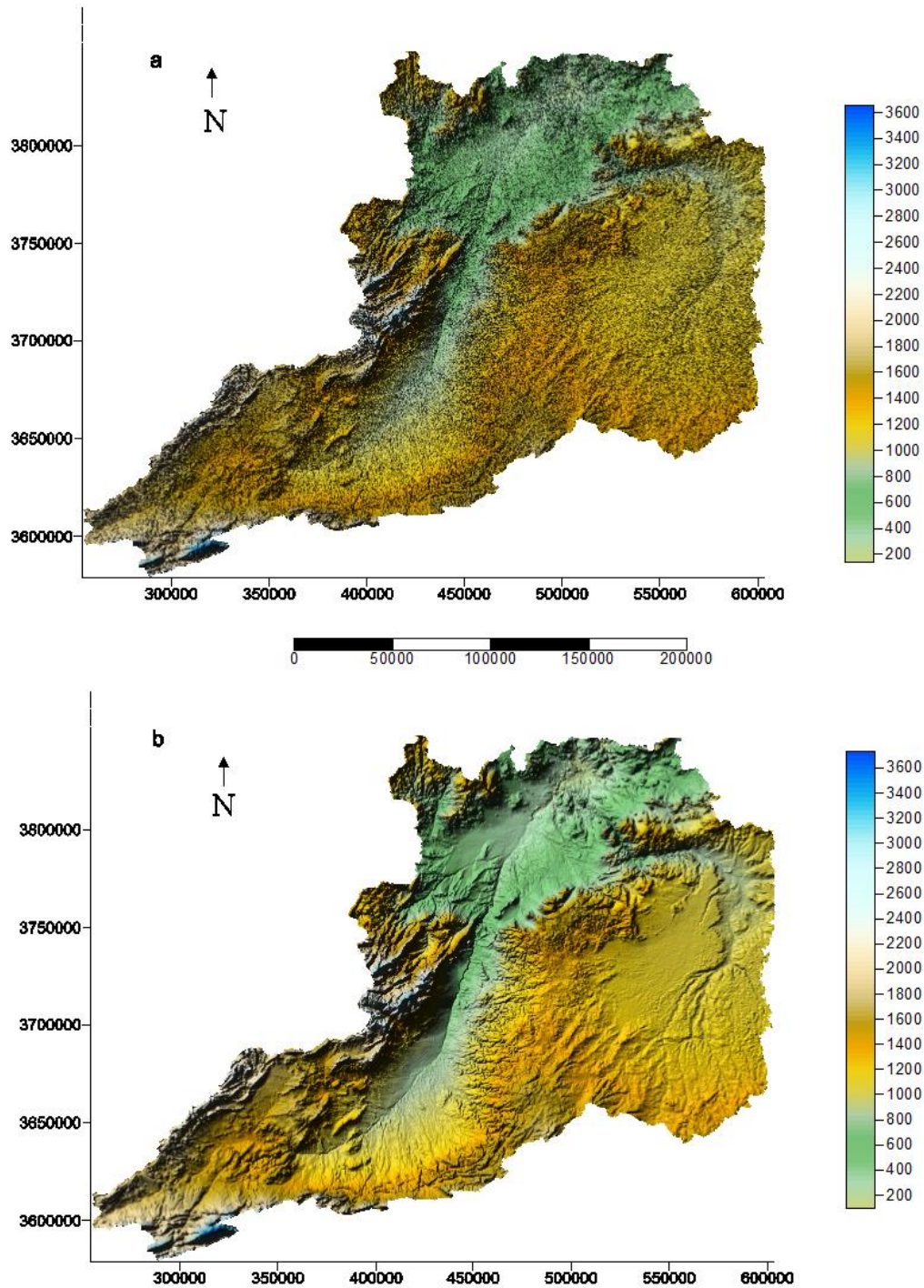


Fig. 10. Representación del modelo ASTER GDEM v2 de la zona de estudio: a) modelo ASTER GDEM v2 con resolución horizontal de 30 m b) modelo ASTER GDEM v2 suavizado con resolución de 120 m. Nota: Cotas de la leyenda expresadas en metros sobre el nivel del mar. Unidades de la escala gráfica en metros

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.

En el mapa de pendientes de la Fig. 11, obtenido mediante el método propuesto por [Zenvenger y Thorne \(1987\)](#), podemos observar como los valores con mayor pendiente aparecen en las áreas más elevadas y abruptas de la zona de estudio, destacando que, en general, la zona de la cuenca vertiente del río Moulouya presenta pendientes relativamente bajas como corresponde a un medio físico donde predomina una topografía poco accidentada.

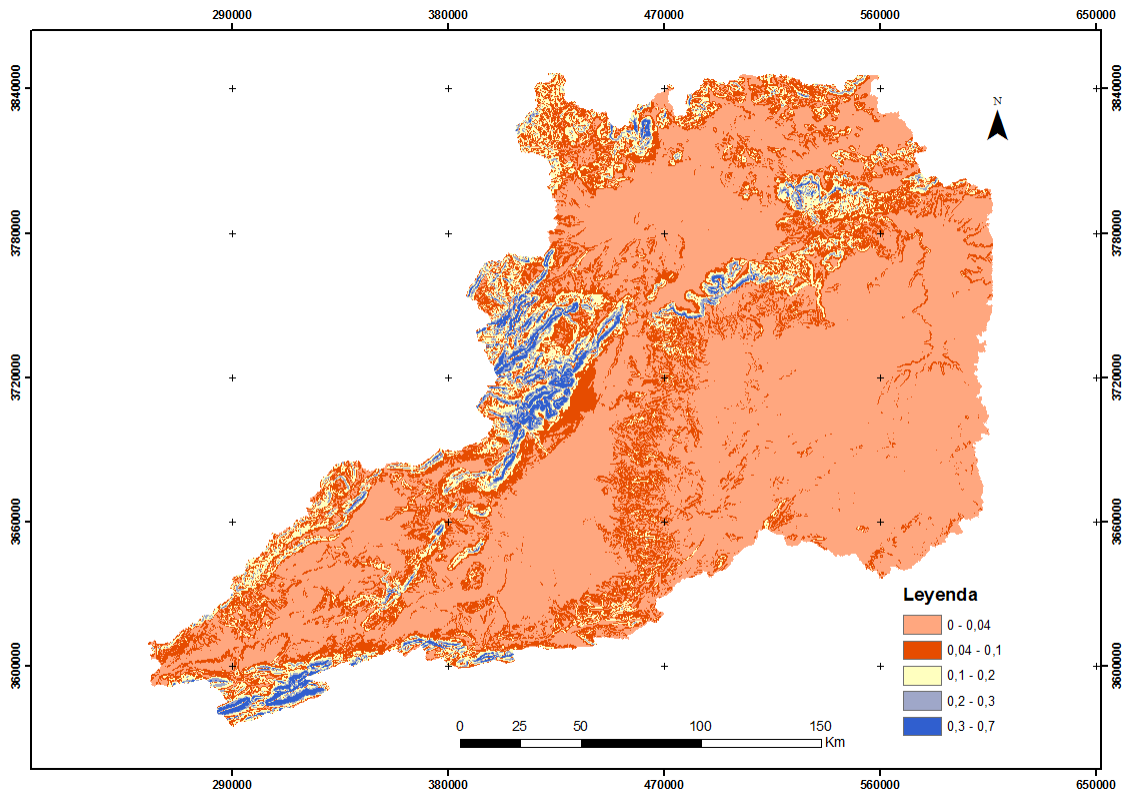


Fig. 11. Mapa de pendientes (expresadas en tanto por uno) obtenido a partir del modelo *ASTER GDEM v2* suavizado.

El cálculo de la acumulación de flujo a partir del *DEM* suavizado permitió extraer la red de drenaje y calcular el flujo acumulado para cada celda mediante la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda sumidero según una pendiente descendente.

En la Fig. 12 se muestra la delineación automática de la red de drenaje de la cuenca vertiente del río Moulouya superpuesta sobre la superficie de dicha cuenca.

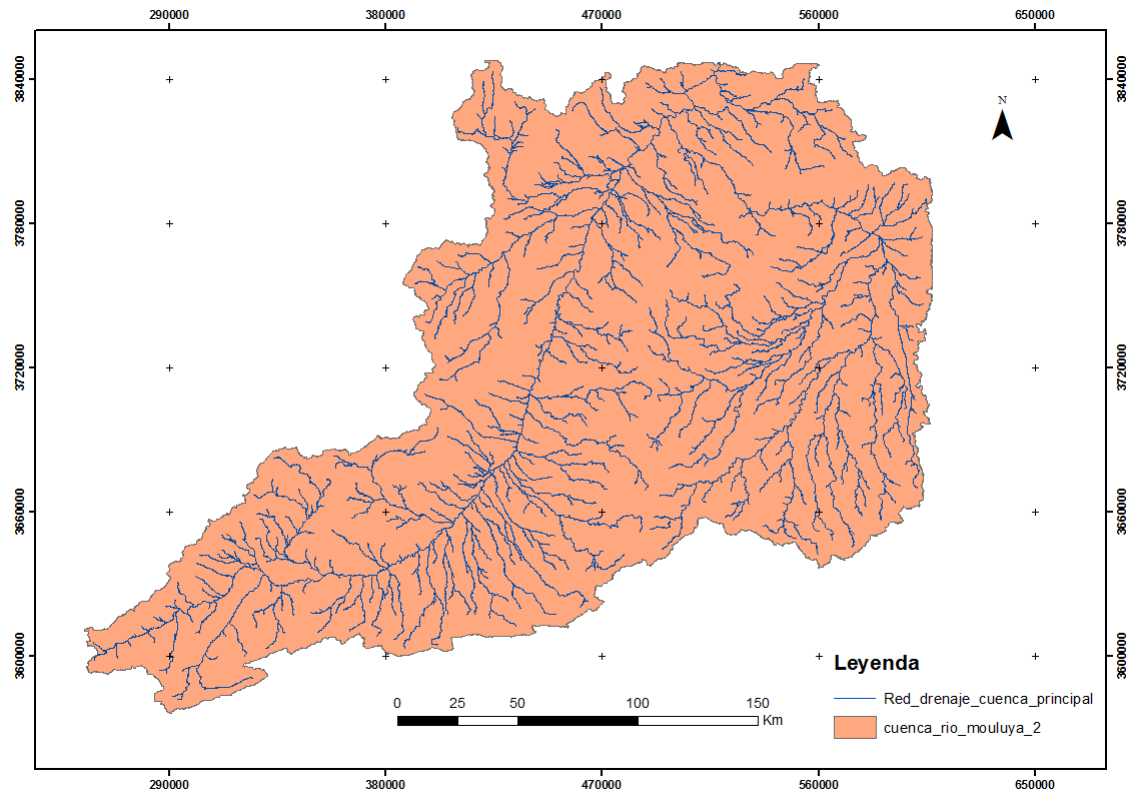


Fig. 12. Representación de la red de drenaje de la cuenca vertiente del río Moulouya. Marruecos.

Los resultados obtenidos para el factor LS (Fig. 13) 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 Fig. 13 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 et al., 2004](#); [Dumas et al., 2010a](#); [Dumas et al., 2010b](#); [Payet et al., 2011](#)).

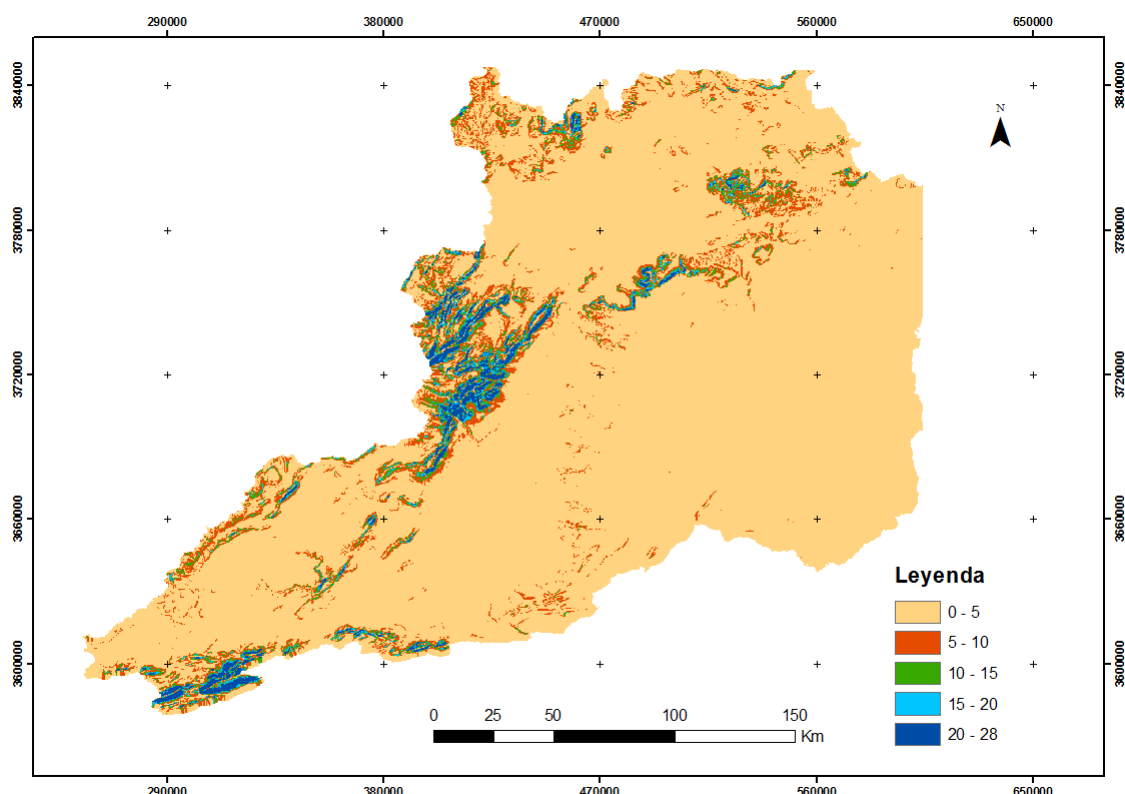


Fig. 13. Distribución espacial de los valores obtenidos para el Factor LS.

5.2.4. FACTOR C: CULTIVO 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 Fig. 14.

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 este 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.

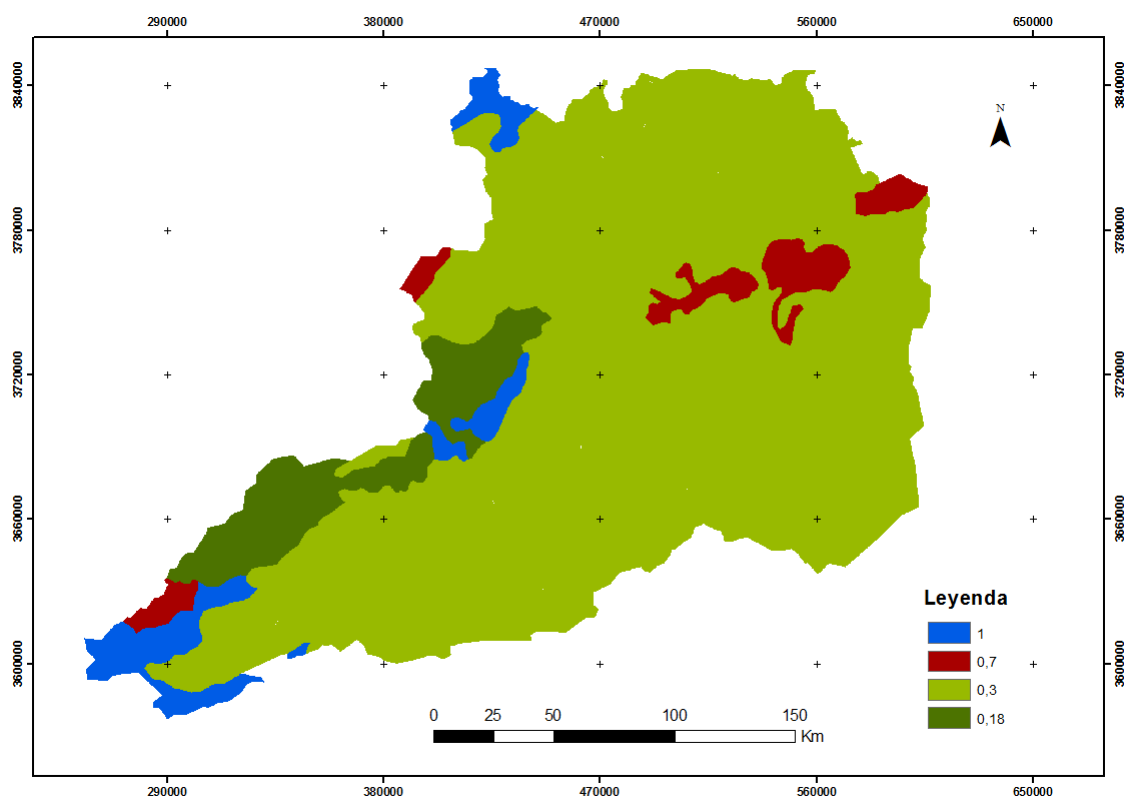


Fig. 14. Cartografía de la distribución espacial de los valores empleados para el Factor C.

5.2.5. TASA DE EROSIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El modelo de la *USLE* presenta una estimación promedio del potencial de pérdida del suelo por erosión hídrica expresada en $t \cdot ha^{-1}$. 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 Fig. 15 se muestra la variabilidad espacial de la tasa de erosión estimada en este trabajo cuyos valores se sitúan entre 0 y $1.000 t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ a lo largo de la cuenca vertiente. Aproximadamente el 85% de la zona de estudio presenta una baja estimación de pérdida de suelo, con tasas de erosión entre 0 y $5 t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$. Los valores más altos, situados entre 400 y $1.000 t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, 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 $2000 t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, por lo que los resultados del presente estudio quedan dentro del rango propuesto en el citado trabajo.

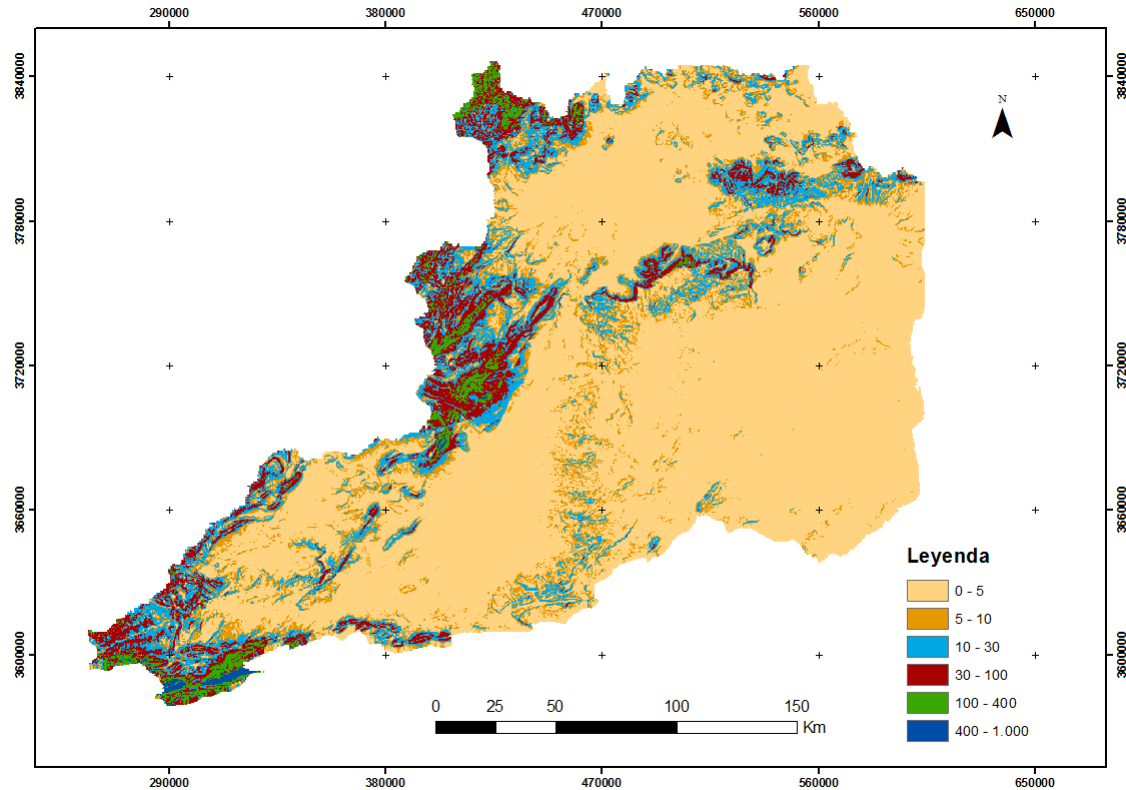


Fig. 15. Distribución espacial de la tasa de erosión estimada mediante la aplicación de la ecuación de la USLE en $t.ha^{-1}$.

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**. 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 irá siendo depositado o atrapado a lo largo de la cuenca. A la fracción de la cantidad de suelo que se moviliza por procesos erosivos 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 m^3 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 embalses, una forma de 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:

$$W_T = W_1 + k * \log (T-1) \quad (13)$$

Donde W_T es el peso específico del sedimento después de T años en el embalse, W_1 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):

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

Siendo W_T el peso específico del sedimento después de T años en el embalse, X_1 , X_2 y X_3 corresponden a los porcentajes de arena, limo y arcilla de la muestra, W_1 , W_2 y W_3 son los pesos

específicos iniciales para arena, limo y arcilla y B_1 , B_2 y B_3 son las constantes de consolidación en función del material (Tabla 4):

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

Condiciones del Embalse	Arena		Limo		Arcilla	
	W_1	B_1	W_2	B_2	W_3	B_3
Sedimentos siempre sumergidos	1.490	0	1.040	91,3	480	256
Embalse moderadamente vacío	1.490	0	1.185	43,2	737	171,4
Embalse considerablemente vacío	1.490	0	1.265	16,0	961	96,1
Embalse normalmente vacío	1.490	0	1.314	0	1.249	0

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 $W_T = 1117,914 \text{ kg/m}^3$. Si aplicamos este valor como factor de conversión para pasar de t.año^{-1} a $\text{Mm}^3.\text{año}^{-1}$ llegamos a la conclusión de que llegarían al embalse una cantidad aproximada de $52,18 \text{ Mm}^3.\text{año}^{-1}$ 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 es de $10 \text{ Mm}^3.\text{año}^{-1}$ (Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la lutte Contre la Désertification, 1996), lo que supondría una proporción de desplazamiento de sedimentos del 19,17 % del suelo total erosionado o, lo que es lo mismo, $225 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$. 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 $240 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$. 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 ($\text{t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$) y A es el área total de la cuenca vertiente en km^2 .

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 $49,563 \text{ km}^2$), estimamos una tasa de sedimentos depositada en el embalse de unas $183 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$, valor muy próximo al obtenido en nuestros cálculos.

Por último, la capacidad de embalse de la presa Mohamed V ha pasado de 726 Mm^3 , en la fase inicial, a 331 Mm^3 , lo que representa una reducción del 46 % (Fig. 16). 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).

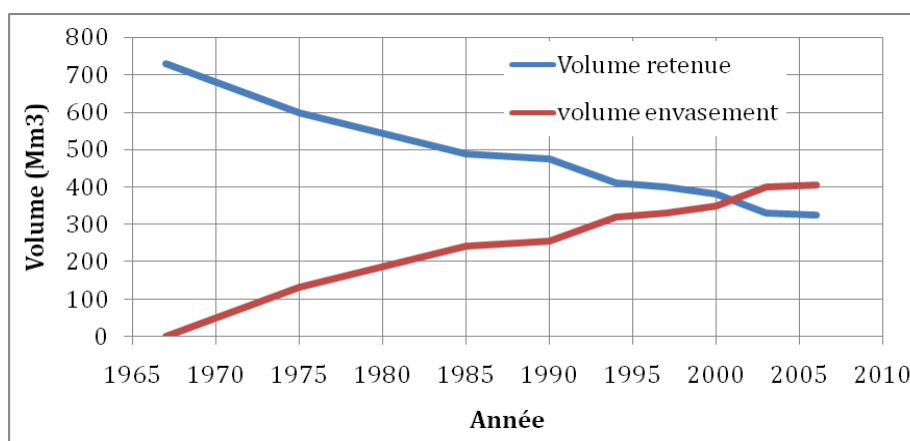


Fig 16. Evolución de la capacidad de embalse y colmatación de la presa Mohamed V.

6. 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 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ 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.

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 $12,11 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, lo que equivale a una pérdida de perfil de suelo de unos $0,089 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ para un suelo de textura media (franco-arenoso a areno-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 $12,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, según los tipos de suelo, su profundidad y propiedades físicas. En general se ha venido admitiendo que una pérdida de $12,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ es el máximo aceptable para suelos bastante profundos, permeables y bien drenados, mientras que tasas de erosión de 2 a $4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ 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 $4 - 8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ para las zonas más elevadas aguas arriba de la presa de Mohamed V, incrementándose hasta $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ 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.

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 $225 \text{ t.Km}^{-2}.\text{año}^{-1}$ 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 et al., 2001](#)). En cualquier caso, la aplicación de este tipo de modelos requeriría una mayor cantidad y calidad de datos de campo.

7. ANEXO

Localización de la estación meteorológica Dar El Caïd.

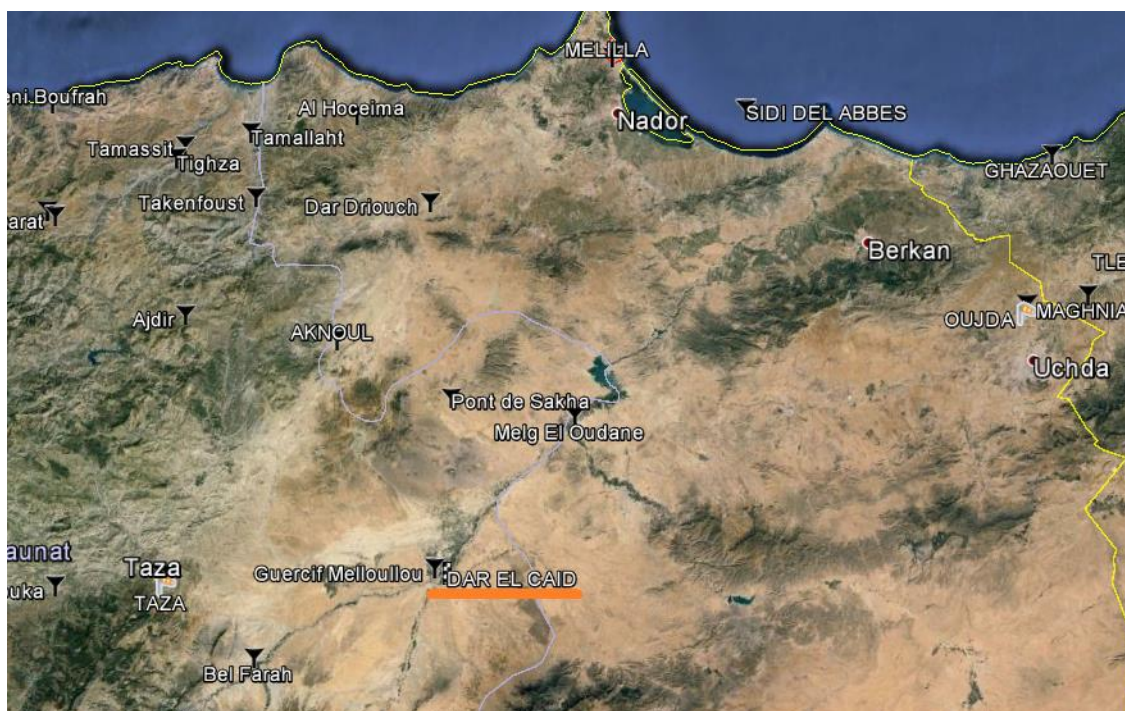


Figura 2. Fuente: www.hydrosiences.fr (www.hydrosiences.fr/sierem/kmz_files/generalMOULOUIY.kml)

8. BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- Ashiagbor, 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.
- Böhner, J. y Selige, T. (2006). Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, 115, 13-28.
- Bzioui M. (2004). *UN Water Africa: Rapport National 2004 sur les ressources en eau du Maroc, November 2004*, Rabat, Maroc: United Nations Development Programme.
- 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., 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 Basin or arid Xin-Jian. En J. M. Laften, 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.
- Cuartero, A. (2003). *Análisis de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) generados con imágenes SPOT-HRV y TERRA-ASTER*. Tesis de doctorado no publicada, Universidad de Jaén, Jaén, España.
- De Vente, J. (2007). The sediment delivery problem revisited. *Progress in Physical Geography*, 31(2), 155-178. doi: 10.1177/0309133307076485
- Demmak, A. (1982). *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale*. Tesis de doctorado no publicada, Universidad de París, París, Francia.
- 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.
- Dríouech, F. (2010). *Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes*. Tesis de doctorado no publicada. Universidad de Toulouse, Toulouse, Francia.
- Dríouech, F., Déqué M., y Mokssit, A., 2009. Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco. *Clim Dyn*, 32, 1055-1063. doi: 10.1007/s00382-008-04310-6
- Dumas, P., J. Printemps, M. Mangeas y G. Luneau, G. (2010a). Developing Erosion Models for Integrated Coastal Zone Management. A Case Study of New Caledonia West Coast. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 519-529. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.06.013
- Dumas, P., y Printemps, J. (2010b). Assessment of Soil Erosion Using USLE Model and GIS for Integrated Watershed and Coastal Zone Management in the South Pacific Islands. *Proceedings Interpraevent, International Symposium in Pacific Rim*, 856-866.
- 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.
- El Garouani, A., Chen, H., Lewis, L., Triback, A., y Abahrour, M. (2008). Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG IDRISI au Nord-Est du Maroc. *Télédétection*, 8(3), 193-201.
- Ellison, W.D. (1944). Studies of raindrop erosiom. *Agricultural Engineering*, 25, 131-136.
- FAO. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma, Italia: PNUMA-FAO.
- 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

Heusch, B. (1970). *L'érosion du Préif occidental: une étude quantitative de l'érosion hydrique dans les collines marneuses du Préif occidental*. *Annales de la Recherches Forestières du Maroc*, Tome 12. Rabat, Maroc : Rabat-E.T.N.A

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.

Hudson, N.W. (1991). *A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects*. *FAO Soils Bulletin* 64. Rome, Italy: FAO.

Irvem, A., Topaloglu, F., y Uygur, V. (2007). Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan river basin in Turkey. *Journal of Hydrology*, 336, 30-37.

Knippertz, P., Christoph, M., y Speth, P. (2003). Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 83, 67-88.

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.

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.

Meddi, M. (1992). Hydro-pluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie). Tesis de doctorado, Universidad Louis Pasteur, Strasbourg, Francia.

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

Moore, I. D., Grayson, R. B., y Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling : a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*, 5, 3-30.

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.

Payet, E., Dumas, P., y Pennober, G., 2011. Modélisation de l'érosion 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.

Roose E. 1977a. *Erosion et Ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesure en parcelles expérimentales*. París, Francia: ORSTOM.

Roose E., Arabi M., Brahmi K., Chebani R., Mazour M., y Morsli B. (1997). Recherches sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéenne algérienne. En G., De Noni, J. M., Lamachère, E., Roose (Ed.). *Erosion en montagnes semi-arides et méditerranéennes : Journées du Réseau Erosion, Villeneuve de Berg (FRA)*, (pp. 161-167). Montpellier, France : Centre IRD. (fdi:010011102).

Roose E., y Sarrailh J.M. (1990). Erodibilité de quelques sols tropicaux, vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahiers de l'ORSTOM, Serie Pedologique*, 25(1), 7-30.

Roose 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.

Sanroque, P. (1988). Estudio de la erosionabilidad del suelo en las comarcas septentrionales de la provincia de Valencia (Camp de Morvedre, Camp de Turia, Los Serranos y Rincon de Ademuz). Tesis de doctorado no publicada, Universidad de Valencia, Valencia, España.

Soutter M., Mermoud A., y Musy A. (2007). *Ingénierie des eaux et du sol Processus et aménagements*. Lausanne, Suiza : Presse polytechniques et universitaires romandes .

Touaibia, B., Gomer, D., y Aidaoui, A. (2000). Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les micro bassins expérimentaux de l'Oued Mina en Algérie du Nord. *Bull Réseau Erosion*, 20, 478-84.

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.

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. (1960). Erosion rates and contributing factors in semi-arid regions. *International seminar on water and soil utilisation*, Brookings, South Dakota.

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., Johnson, C. B., y Cross, B. V. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of soil and water conservation*, 26, 189-193.

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.

Zervenbergn, L. W., y Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth surface processed and landforms*, 12, 47-56.

Zingg, A.W. (1940). Degree and Length of Land Slope as it Affects Soil Loss in Runoff. *Agricultural Engineer*, 21, 59-64.

Páginas Web consultadas:

Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation. (2014). Recuperado de www.hydrosciences.fr/sierem/kmz_files/generalMOULOUIY.kml

ISRIC World Soil Information. (2014). *SoildGrids1km*. Recuperado de <http://soilgrids1km.isric.org>

Le ministère Délégué Auprès du Ministre de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, Chargé de l'eau. (2014.) Recupeardo de www.water.gov.ma

WorldClim - Global Cimate Data. (2014). *Free climate data for ecological modelling and GIS*. Recuperado de <http://www.worldclim.org/tiles.php>