

Evolución de la erosión estimada (USLE) y procesos de Naturbanización en el entorno de los Parques Nacionales de Doñana y Sierra Nevada (España)

ÁNGELES BARRAL MUÑOZ¹ | MARÍA JOSÉ PRADOS VELASCO²
CLAUDIA HURTADO RODRÍGUEZ³

Recibido: 18/02/2019 | Aceptado: 01/10/2019

Resumen

Este artículo analiza la diferente incidencia que muestra la erosión estimada de suelos en las áreas de influencia socioeconómica de los Parques Nacionales de Doñana y Sierra Nevada en el marco de los procesos de Naturbanización. La Naturbanización se define por la capacidad de atracción de población y actividades económicas hacia las áreas de influencia socioeconómica de espacios protegidos debida al reconocimiento de sus valores ambientales y paisajísticos. Se establece la metodología de procesado de datos con un Sistema de Información Geográfica para llevar a cabo el estudio diacrónico de los valores estimados de erosión que proporciona la Junta de Andalucía para toda la Comunidad Autónoma. Aplicando dicha metodología a las cuencas del arroyo de El Partido y del río Trevélez se pretende contribuir a una mejor comprensión de las relaciones de causalidad o de potenciación existentes entre los factores climáticos, las actividades humanas y los procesos erosivos. Se ha llevado a cabo un análisis estadístico de las cartografías raster publicadas de estimación de erosión media mensual y de las variables empleadas para su cálculo entre 2003 y 2014. Se ha constatado la relevancia que los usos y coberturas vegetales tienen como variable clave para explicar la distribución de los valores medios de erosión en ambas cuencas. En la cuenca del río Trevélez la evolución de las tasas de erosión estimada ha mostrado un mayor paralelismo con la erosividad de la lluvia, mientras que en el arroyo de El Partido han sido los cambios de usos del suelo los que determinan en mayor medida dicha evolución.

Palabras clave: Erosión del suelo estimada; Erosividad de la lluvia; Cambio de Usos del Suelo; USLE; S.I.G.; Naturbanización; Parques Nacionales

Abstract

Evolution of estimated erosion (USLE) and naturbanisation processes in the surroundings of the National Parks of Doñana and Sierra Nevada (Spain)

This article analyzes the different incidence that estimated soil erosion shows in the areas of socioeconomic influence of the national parks of Doñana and Sierra Nevada within the framework of Naturbanization processes. The naturbanization indicates the capacity of attraction of population and economic activities towards the areas of socioeconomic influence of protected spaces

1. Universidad de Huelva. mabarral@uhu.es

2. Departamento de Geografía Humana, Universidad de Sevilla. mjprados@us.es

3. Departamento de Geografía, Historia y Filosofía, Universidad Pablo de Olavide. churrod@upo.es

thanks to the recognition of their environmental and landscape values. The data processing methodology is established with a Geographic Information System to carry out the diachronic study of the estimated values of erosion provided by the Junta de Andalucía for the entire Autonomous Community. Applying this methodology to the river basins of El Partido and the river Trevélez is intended to contribute to a better understanding of the existing causal or empowering relationships between climatic factors, human activities and erosive processes. A statistical analysis of the published raster erosion estimation maps and the variables used for their calculation between 2003 and 2014 has been carried out. The relevance of plant uses and coverages as key variables to explain the distribution of mean values of erosion in both basins has been established. In the Trevélez river basin the evolution of estimated erosion rates has shown a greater parallel with the erosivity of rain, while in the stream of El Partido it has been the changes of land uses that determine this evolution to a greater extent.

Keywords: Estimated soil erosion; Erosivity of the rain; Land-use change; USLE; G.I.S.; Naturbanization; National Parks

1. Introducción

Las interrelaciones entre las actividades humanas y el medio físico son claves en el análisis geográfico y tienen una gran trascendencia sobre los cambios globales en las áreas de influencia socioeconómica de los espacios naturales protegidos. La vulnerabilidad de estos espacios frente a la reactivación demográfica y económica relacionada con los procesos Naturbanización se manifiesta en los cambios en los usos del suelo y en el paisaje. La Naturbanización se asocia a la capacidad de atracción de población y actividades económicas de las áreas de influencia socioeconómica de espacios protegidos debida al reconocimiento de sus valores ambientales y paisajísticos, lo cual tiene consecuencias claras sobre los cambios en los usos del suelo (Fernández y Prados, 2010; Calvache, Prados & Lourenço, 2015). La evolución de las actividades humanas en relación con las características del medio físico en el que se desarrollan tiene una plasmación clara en los cambios de usos del suelo y éstos, a su vez, introducen un marco de incertidumbre en la evolución futura de estos espacios que pone en riesgo la preservación de los ecosistemas naturales (Rounsevell et al., 2006; DeFries et al., 2007; Hewitt et al., 2016). Una de las principales repercusiones medioambientales derivadas de los cambios del uso del suelo son los procesos erosivos, de ahí que constituyan un tema central en numerosas investigaciones (Cebecauer, T. et al., 2008; Feng et al, 2010; Xu et al., 2011; Sun et al., 2014; Borrelli, P. et al. 2017). La utilización de los modelos de erosión del suelo basados en cambios de usos del suelo y en las distintas situaciones meteorológicas permite realizar predicciones a futuro, sirviendo de ayuda en la orientación de políticas de lucha contra la erosión y la conservación de los suelos (Eiji et al, 2010).

Los procesos de Naturbanización implican cambios en los usos del suelo a consecuencia de la extensión de la urbanización en las áreas de influencia socioeconómica (AIS) de los Parques Nacionales (Fernández y Prados, 2010; Calvache, Prados & Lourenço, 2015). Para poder conocer la respuesta de los sistemas naturales a los distintos usos y coberturas y a los cambios en los mismos, sobre todo en lo que se refiere a los procesos de erosión derivados de éstos, en áreas templadas y mediterráneas de Europa se han llevado a cabo a lo largo de las últimas décadas numerosos estudios en parcelas experimentales. Gracias a ellos puede conocerse que los máximos coeficientes de escorrentía superficial se dan en los espacios en construcción, seguidos del suelo desnudo, los viñedos y cultivos arbóreos, las tierras de cultivo y en barbecho (Maetens et al, 2012). Por otro lado, cuando los cambios de uso se producen en laderas de elevada pendiente

del área mediterránea, como pueden ser nuevas roturaciones o sobrepastoreo, la concentración de cárcavas amplifica la incidencia de procesos de erosión (Gutiérrez et al., 2009). El manejo del monte puede también provocar incrementos puntuales o regulares de la erosión del suelo, tal y como se ha constatado cuando se lleva a cabo una tala de matorral para favorecer el desarrollo de la cobertura forestal en áreas de media montaña mediterránea (Pacheco et al., 2011), o cuando se abren y mantienen cortafuegos o caminos de tierra en áreas forestales (Úbeda et al., 1998). En el polo puesto, el abandono de áreas de cultivo y el desarrollo de la vegetación herbácea o arbustiva conlleva una reducción en la tasa de erosión por aumento de la resistencia a la capacidad erosiva de la lluvia. Por último, los suelos forestales son los que cuentan con una cobertura más efectiva y mayor protección frente a la erosión (Durán, et al., 2014).

Sin embargo, a pesar de que determinados usos son especialmente favorables para la intensificación de los procesos de erosión hídrica, para que éstos se desarrollen deben coincidir con periodos de lluvias intensas (Pacheco et al., 2011). La erosividad de la lluvia constituye el motor de la erosión, por lo que es un factor que puede ser determinante a la hora de explicar la evolución de la estimación de este proceso (Angulo-Martínez y Beguería, 2009).

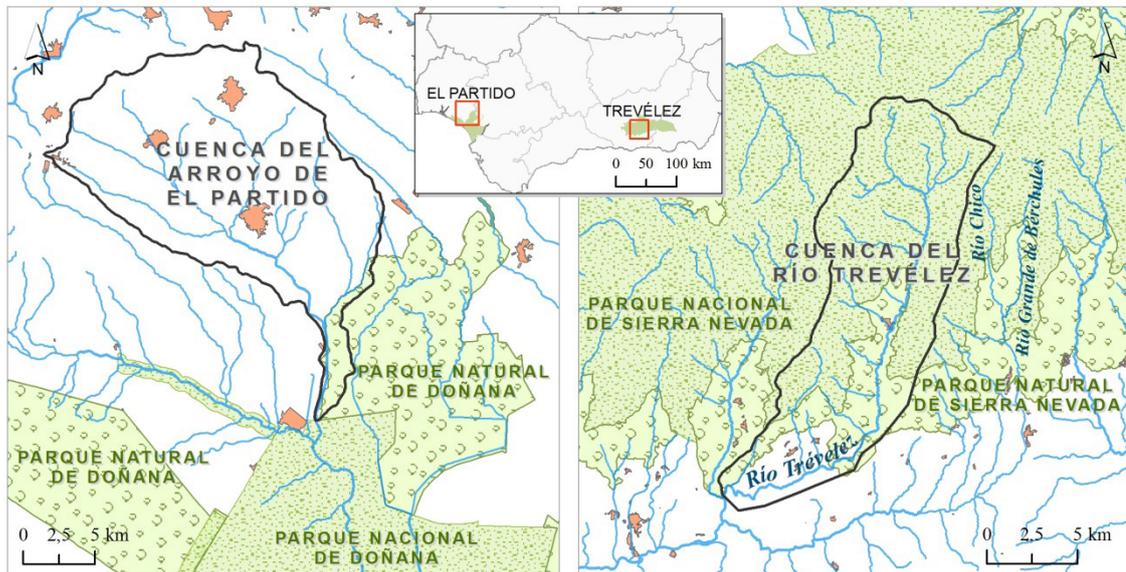
En este artículo se analiza la evolución de la erosión estimada del suelo en las AIS de los Parques Nacionales de Doñana y Sierra Nevada en Andalucía. En concreto se examina la incidencia que sobre los valores de la erosión estimada, calculados por la administración autonómica andaluza aplicando el modelo USLE, tienen los cambios en los usos de suelos y la evolución de la erosividad de la lluvia en dos cuencas fluviales correspondientes a medios naturales muy distintos y con dinámicas económicas en cierta medida opuestas. En el AIS del Parque Nacional de Sierra Nevada se analiza la cuenca del río Trevélez, donde la superficie protegida bajo dicho Parque Nacional unida a la del Parque Natural representan un total de 88,1% de la misma. Se trata de una cuenca propia de medios de alta y media montaña mediterránea sometidos a procesos de abandono agrario y regeneración del matorral. Como cuenca vertiente del Parque Nacional de Doñana se analiza la del arroyo de El Partido, donde el AIS afecta al 92,85% de su superficie y queda constituido no tanto por el área protegida por el Parque Nacional o Natural, sino por un gran número de otras figuras de protección de carácter autonómico e internacional. Se trata de un ejemplo de cuenca de escasa pendiente y con clima mediterráneo de influencia litoral, donde los procesos antrópicos vienen dirigidos por una fuerte presión que sólo puede verse frenada por medidas de preservación ambiental. El objetivo final del artículo es averiguar los posibles efectos que en la erosión estimada derivarían de la Naturbanización para orientar la planificación agro-ambiental y en la adopción de medidas de control de la erosión por parte de las administraciones públicas.

2. Ámbitos de estudio

La investigación se lleva a cabo en dos cuencas hidrográficas correspondientes a medios de montaña y litoral, con características muy diferentes en cuanto a formaciones geológicas, condicionantes geomorfológicos y climáticos, y evolución de los usos del suelo (Mapa 1). Los medios de montaña mediterráneos constituyen sistemas naturales complejos donde los procesos erosivos suelen mostrar una gran incidencia. A las elevadas pendientes hay que sumar una presencia humana histórica que alterna periodos de intenso aprovechamiento con situaciones de despoblamiento y abandono, que comienzan a verse revertidas paulatinamente por efecto de la Naturbanización. En el caso de los medios litorales y más concretamente en la Costa Occidental de Huelva, los factores que pueden ser favorables a la erosión de suelos son el carácter deleznable de

las formaciones rocosas y de los suelos escasamente desarrollados, así como el aprovechamiento agrícola de carácter intensivo.

Mapa 1. Cuencas del arroyo de El Partido (AIS PN Doñana, Huelva) y del río Trevélez (AIS PN Sierra Nevada, Granada).



Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía vectorial (REDIAM).

Al igual que sucede en el resto de Sierra Nevada, los relieves más pronunciados en la cuenca del Trevélez son el resultado del afloramiento de la formación geológica denominada Complejo del Veleta y de diversos retazos del Complejo del Mulhacén (Puga, 1976; Puga et al. 2002), mientras que el Complejo Alpujárride se observa en el sur de la misma. En los Complejos del Mulhacén y del Veleta predominan rocas metamórficas como micaesquistos que presentan un característico «lajado» o división en láminas bien definidas que se desprenden con cierta facilidad, al contrario de lo que sucede con los mármoles de las cumbres y las cuarcitas (Puga et al., 2007). Sobre estas litologías medianamente deleznable se encuentran suelos escasamente desarrollados del tipo litosoles y regosoles dístricos, y en áreas de escasa pendiente predominan cambisoles dístricos o eútricos (Junta de Andalucía, 2005). La cuenca del río Trevélez, como el resto de la vertiente sur de Sierra Nevada, cuenta con un Clima mediterráneo que, conforme va ascendiendo, pasa de una variedad Semi-continental de media montaña perimediterránea, a una Fría de cimas béticas y a Periglacial de altas cumbres béticas (Gómez-Zotano, et al., 2015). Las precipitaciones se ven, por tanto, muy condicionadas por el factor de altitud, oscilando entre 230-750 mm anuales (Raso, 2011), aunque probablemente en las zonas elevadas puedan exceder de los 1000 mm/año (Gómez-Zotano, et al., 2015). Es durante el invierno cuando se registran los meses más lluviosos, con máximos secundarios a finales de la primavera o comienzos del otoño (Raso, 2011). Por último, se describen temperaturas suaves en verano y frías en invierno.

El río Trevélez es un afluente por la margen derecha del río Guadalfeo, por lo que su cuenca se sitúa en la vertiente meridional de Sierra Nevada y conecta a través de pronunciadas pendientes con algunas de sus máximas elevaciones (Mulhacén 3.478,6 m, Alcazaba 3.371 m y Atalaya 3.138 m) (vid. mapa 1). La cuenca ocupa una extensión de aproximadamente 15.000 ha, de las cuales dos terceras partes pertenecen al parque nacional, que protege la zona de cumbres, rodeada del

parque natural que constituye casi un 20% de la cuenca. La zona de alta montaña presenta formaciones de pastizales y matorral característicos, como el piornal. La consideración de la erosión de suelos como un problema de gran relevancia en esta cuenca ha llevado a la administración a desarrollar diversas iniciativas de reforestación a lo largo del s.XX orientadas a frenar la torrencialidad de los cauces fluviales (Jiménez Olivencia *et al.*, 2015). Estas prácticas se intensifican a partir de mediados de 1950 con repoblaciones de coníferas en los tramos medio y bajo, anteriormente cubiertos por matorral o cultivos abandonados en la cuenca del Trevélez (Camacho *et al.*, 2002). Como resultado de estas políticas forestales la cuenca pasó a ser considerada como de vulnerabilidad erosiva baja, estimándose pérdidas medias de suelos inferiores a 30 T/ha/año (Castillo *et al.*, 1996).

Por su parte, los procesos de abandono de las actividades agrarias tradicionales, con los característicos cultivos en terrazas de las Alpujarras, dieron paso a monte bajo (Douglas *et al.*, 1996), así como al desarrollo de vegetación forestal en estadios superiores, lo que sin duda ha favorecido la convivencia en los campos de cultivo de retazos de vegetación natural o especies forestales insertadas en el espacio labrado (Jiménez Olivencia *et al.*, 2015). En el AIS las áreas que se mantienen en cultivo, dedicadas anteriormente a la producción de herbáceos, cereal o cultivos hortícolas, han sido sustituidas por cultivos leñosos tales como olivos, almendros e incluso nogales, cerezos y otros frutales (Jiménez Olivencia *et al.*, 2015). El tramo bajo de la cuenca no cuenta con protección ambiental y es ahí donde se concentra la mayor actividad antrópica con procesos de intensificación agrícola en regadío propios de la desembocadura de los ríos mediterráneos (Fernández y Prados, 2010).

La cuenca del arroyo de El Partido, por su parte, es característica de medios litorales mediterráneos, con relieve suave y escasa pendiente. Las formaciones geológicas en cabecera se encuentran formadas por calcarenitas, arenas, margas y calizas, mientras que en el tramo central predominan los limos arenosos calcáreos del Mioceno superior, acompañados localmente por arenas y areniscas del Pliocuatnario. Buena parte de estos materiales se ven cubiertos en las proximidades de los cursos fluviales por sedimentos del Cuaternario formados por arenas y gravas (IGME, 1976). La cartografía de suelos de la que se dispone en la actualidad informa de suelos muy condicionados por la litología, principalmente alfisoles y entisoles, aunque también aparecen histosoles y aridisoles en el extremo sur de la cuenca (Junta de Andalucía, 2005). El clima presente en la cuenca del arroyo de El Partido se ha clasificado como Mediterráneo semi-oceánico del bajo Guadalquivir, clima templado-cálido y subhúmedo, si bien localmente puede mostrarse relativamente seco (Gómez-Zotano *et al.*, 2015). Muestra temperaturas suaves y precipitaciones medias anuales moderadas, que se han marcado históricamente en torno a los 500-548 mm (Siljestrom, *et al.*, 2002; Siljestrom y Díaz-Paniagua, 2015) pero que pueden alcanzar los 780 mm generalmente concentradas desde noviembre a enero-febrero (Gómez-Zotano *et al.*, 2015), si bien se ha descrito alguna precipitación importante en otoño (Ramos, 2012).

A pesar del carácter deleznable de las litologías y el escaso desarrollo de los suelos, la combinación de precipitaciones moderadas y pendientes débiles parece no ser muy favorable a la erosión hídrica. Sin embargo, la relevancia de la intervención humana en la modificación de flujos y capacidad de carga del arroyo ha provocado la aceleración de los procesos erosivos reconocidos (Borja *et al.*, 2009; Mintegui *et al.*, 2010).

El arroyo de El Partido forma parte de la subunidad hídrica de Doñana y desemboca en las Marismas del Guadalquivir dentro del Parque Nacional (vid. mapa 1). Por su relevancia como cuenca

vertiente del Parque Nacional de Doñana y dado que lo que suceda en ésta tiene repercusión directa sobre las marismas de la desembocadura, el arroyo de El Partido se ha convertido de manera progresiva en un espacio fuertemente protegido a distintos niveles (nacional, comunitario e internacional). En efecto, aunque tan solo el tramo sur de la cuenca queda bajo la protección del Parque Natural de Doñana, otras figuras como Espacio Natural de Doñana (Ley 8/1999 del Espacio Natural de Doñana), Reserva de la Biosfera (UNESCO, 1980), Zona de Especial Conservación (ZEC) (Decreto 142/2016), Patrimonio de la Humanidad (UNESCO, 1994), Humedal de Importancia Internacional incluido en la lista RAMSAR y monte declarado de Utilidad Pública, alcanzan a protegerla en su totalidad. A pesar de ello las actividades económicas intensivas se han venido sucediendo, provocando un gran impacto medioambiental a lo largo de la segunda mitad del siglo XX. Entre 1965 y 1991 se produce una transición desde los cultivos de viñedo y olivar hacia herbáceos y leñosos en secano y regadío (Fernández *et al.*, 2007). Estos cultivos han consolidado su posición dominante en la cuenca durante la década de 1990 lo que, unido al impacto producido por la extracción de áridos y el manejo inadecuado del cauce, ha dado lugar a la eliminación de sedimentos del fondo y la desarticulación del canal principal del arroyo (Borja *et al.*, 2009). La recuperación de las formaciones naturales y las importantes labores de desmonte del eucalipto han supuesto la segunda gran transformación de la cuenca (García_Novo *et al.*, 2007). La canalización del tramo final del arroyo en 1981 produjo un incremento de los aportes sedimentarios, dando lugar al desarrollo a un abanico aluvial en las marismas de Doñana. Por último el Proyecto Doñana 2005 desarrolló nuevas intervenciones sobre el cauce y la llanura de inundación con el objetivo de reducir los aportes sedimentarios y el consiguiente crecimiento de dicho abanico aluvial (Colmenar, 2004; Mintegui *et al.*, 2010).

Se trata por tanto de dos cuencas de diferente naturaleza en cuanto a formaciones geológicas, geomorfológicas y características orográficas y climáticas. Por otra parte ambas cuencas han conocido una evolución muy dispar en la intensidad de los usos del suelo relacionados con procesos de abandono e intensificación agrícolas y con actuaciones forestales de las autoridades ambientales.

3. Objetivos e hipótesis

El objetivo principal de este artículo se centra en analizar la evolución de la erosión estimada en las cuencas del Arroyo de El Partido (Huelva) y del Río Trevélez (Granada) entre 2003 y 2014, señalando si el incremento o descenso de las tasas concuerdan en mayor o menor medida con los cambios de usos del suelo o bien con la evolución de la erosividad de la lluvia. Debido a un cambio en las fuentes, el período comprendido entre 2011 y 2014 se interpretará como un modelo a futuro (vid *infra*, Fuentes).

Para alcanzar dicho objetivo se analiza, por un lado, las similitudes entre los patrones espaciales de distribución en la superficie de la cuenca de la erosión estimada y la implantación espacial tanto de la erosividad de la lluvia como de los usos y coberturas vegetales. Por otro lado, más allá de la variabilidad interna mostrada en cada cuenca, se trata de reconocer posibles paralelismos en la evolución temporal de los resultados globales de los tres parámetros considerados.

La hipótesis de partida del presente estudio se basa en que los cambios de usos del suelo que se han producido de manera muy dispar en las dos cuencas analizadas debe reflejarse en la evolución de las tasas estimadas de erosión del suelo, más allá de las variaciones que pudiesen haberse producido en la erosividad de la lluvia, el otro gran factor variable de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

4. Fuentes

Para llevar a cabo este estudio se han utilizado los mapas de erosión potencial de suelo elaborados por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía para todo el territorio andaluz. La administración autonómica aplica la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE según sus siglas en inglés) para lograr una cartografía mensual y de medias anuales que abarcan desde 1992 hasta 2015, última fecha publicada (Junta de Andalucía, 2018a).

La ecuación USLE constituye uno de los métodos de estimación de la erosión potencial de suelos más popular desde su formulación (Wischmeier y Smith, 1978) y con sus posteriores revisiones (RUSLE, Renard et al., 1997). Se trata de la estimación de la posible removilización de sedimentos en función de un conjunto de parámetros fijos y variables. El cuadro 1 recoge el modelo USLE haciendo mención de los distintos factores que participan en su cálculo. La formulación implica factores como la pérdida anual de suelo (A); erosividad (R); erodibilidad (K); longitud (L) y ángulo de inclinación de las pendientes (S); cubierta vegetal (C); y la eficacia en el control de la erosión conseguida con la implantación de medidas de conservación de suelos (P). La combinación de todos estos factores es de gran relevancia para analizar los resultados de la estimación de la erosión hídrica a lo largo del tiempo, pudiendo establecer diferencias en función del tipo de suelo, cobertura, etc., así como comparar la evolución de los resultados obtenidos en medios naturales muy distintos, como son en este caso las áreas de montaña y las áreas costeras. A través del Geoportal REDIAM, la administración pone a disposición de la comunidad de investigadores o usuarios particulares las imágenes ráster de erosión estimada de suelos correspondientes a todo el territorio andaluz. El ingente trabajo llevado a cabo por la administración ambiental de Andalucía se muestra en una serie cartográfica de gran interés por su calidad y por su continuidad en el tiempo. Concretamente se proporcionan imágenes a escala 1:200.000 (75 m de resolución espacial) correspondientes a valores medios mensuales y medios anuales según cuatro rangos de erosión (vid. cuadro 2).

Cuadro 1: Especificaciones del modelo USLE utilizado por la Consejería de Medio Ambiente

A Pérdida anual de suelo en Tm/ha/año
R Erosividad de la lluvia
K erodibilidad del suelo medida en campo
L longitud estimada de pendiente en parcelas experimentales
C protección del suelo por cubiertas vegetales a partir del MUCVA-SIOSE
S ángulo de inclinación de pendiente en parcelas experimentales
P eficacia en el control de la erosión debido medidas de conservación de suelos a partir del MUCVA-SIOSE.

Fuente: Modificado de J. Andalucía, 2014.

Cuadro 2. Rangos de erosión de suelos

Erosión (A)	Tm/Ha/Año
Bajas	0-12
Moderadas	12-50
Altas	50-100
Muy altas	>100

Fuente: Modificado de J. de Andalucía, 2014.

Los resultados del cálculo de la erosividad de la lluvia (Factor R) que se emplea para el modelo USLE se proporcionan igualmente como imágenes raster con información cualitativa de los resultados medios anuales siguiendo la escala mostrada en el cuadro 3.

Cuadro 3. Rangos de erosividad de la lluvia (Factor R)

Erosividad de la lluvia (R)	
Extremadamente baja	10-250
Muy baja	250-500
Baja	500-750
Moderadamente baja	750-1000
Moderada	1000-1500
Moderadamente alta	1500-2000
Alta	2000-3000
Muy alta	3000-5000
Extremadamente alta	(>5000)

Fuente: Modificado de J. de Andalucía, 2014.

La erosividad de la lluvia constituye un parámetro resultado del producto de la energía cinética y la intensidad máxima de la precipitación durante 30 minutos consecutivos. La administración autonómica ha elaborado estos mapas de erosividad utilizando datos de precipitación procedentes de la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de la Agencia Estatal de Meteorología y de la Red de Estaciones Secundarias (J. de Andalucía, 2014). Para extrapolar los datos a partir de los cálculos puntuales que se llevan a cabo a partir de los datos de cada estación automática, la administración utilizó el método IDW (Inverse Distance Weighted) para llevar a cabo la espacialización de los datos hasta alcanzar un mapa de formato raster del Factor R.

La información a partir de la cual la administración calcula el factor C corresponde al Mapa de Usos y Coberturas Vegetales de Andalucía (MUCVA) a escala 1:25.000 (Moreira, 1991), y este cálculo se ha hecho público en el geoportal REDIAM. Con el objeto de conocer la correlación entre las categorías de usos de suelo MUCVA y el factor C otorgado por la administración, y permitir así reproducir el proceso para el año 2011 cuyos resultados aún no han sido publicados, se ha rasterizado el MUCVA y se ha utilizado la herramienta de análisis espacial «combinar» de ArcGIS entre dicho raster MUCVA y el raster del Factor C. Se ha obtenido una nueva capa raster en cuya tabla asociada se recogieron los datos procedentes de las dos capas originales (vid. cuadro 4). En los últimos años, sin embargo, dicho cálculo del factor C se ha llevado a cabo a partir de la cartografía generada por el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España-Andalucía (SIOSEA) a escala 1:10.000 (Junta de Andalucía, 2018b).

Es preciso mencionar que la administración ha estimado la erosión del suelo de 2011 a 2014 utilizando la cartografía SIOSE de 2011 para calcular el Factor C.

En este sentido hay que destacar que una de las principales diferencias entre ambas fuentes radica en la estructura del modelo de datos utilizado. En el caso de MUCVA se trata de un modelo jerárquico, es decir, cada polígono tiene asociado una única cobertura. SIOSE en cambio se estructura sobre un modelo orientado a objetos, lo que quiere decir que cada polígono puede estar compuesto por varias coberturas, permitiendo una mayor versatilidad y adquiriendo una mayor complejidad en su uso.

Cuadro 4. Relación de valores de Factor C para cada categoría MUCVA de usos del suelo establecida por la administración.

COD	DESCRIPCIÓN	FACTOR C	COD	DESCRIPCIÓN	FACTOR C	COD	DESCRIPCIÓN	FACTOR C
111	TEJIDO URBANO	0	650	MATORRAL DENSO ARBOLADO: QUERCINEAS+CONIFERAS	40	917	MATORRAL DISPERSO CON PASTO Y ROCA O SUELO	200
115	URBANIZACIONES RESIDENCIALES	0	660	MATORRAL DENSO ARBOLADO: QUERCINEAS+EUCALIPTOS	40	925	PASTIZAL CON CLAROS (ROCA, SUELO)	200
117	URBANIZACIONES AGRICOLA / RESIDENCIALES	0	670	MATORRAL DENSO ARBOLADO: CONIFERAS+EUCALIPTOS	40	459	MOSAICO DE LEÑOSOS EN REGADIO	290
121	ZONAS INDUSTRIALES Y COMERCIALES	0	680	MATORRAL DENSO ARBOLADO: OTRAS MEZCLAS	40	469	MOSAICO DE SECANO Y REGADIO CON CULTIVOS LEÑOSOS	290
131	AUTOVIAS, AUTOPISTAS Y ENLACES VIARIOS	0	711	MATORRAL DISP. ARBOLADO: QUERCINEAS. DENSO	40	481	OLIVAR ABANDONADO	300
133	COMPLEJOS FERROVIARIOS	0	721	MATORRAL DISP. ARBOLADO: CONIFERAS. DENSO	40	451	CULTIVOS HERBACEOS Y LEÑOSOS REGADOS	337
135	ZONAS PORTUARIAS	0	431	CULTIVOS LEÑOSOS REGADOS: CITRICOS	41	455	CULTIVOS HERBACEOS Y LEÑOSOS EN REGADIO PARCIALMENTE REGADOS	337
137	AEROPUERTOS	0	435	CULTIVOS LEÑOSOS REGADOS: FRUTALES TROPICALES	41	457	CULTIVOS HERBACEOS Y LEÑOSOS EN REGADIO NO REGADOS	337
141	OTRAS INFRAESTRUCTURAS TECNICAS	0	615	MATORRAL DENSO ARBOLADO: QUERCINEAS DISPERSAS	50	465	MOSAICO DE SECANO Y REGADIO CON CULTIVOS HERBACEOS Y LEÑOSOS	340
151	ZONAS MINERAS	0	625	MATORRAL DISP. ARBOLADO: CONIFERAS DISPERSAS	50	901	TALAS Y PLANTACIONES FORESTALES RECIENTES	360
153	ESCOMBRERAS Y VERTEDEROS	0	911	MATORRAL DENSO	52	425	OTROS CULTIVOS HERBACEOS REGADOS	364
155	ZONAS EN CONSTRUCCION	0	811	PASTIZAL ARBOLADO: QUERCINEAS. DENSO	83	427	CULTIVOS HERBACEOS EN REGADIO: REGADOS Y NO REGADOS	364
157	BALSAS DE ALPECHIN	0	715	MATORRAL DISP. ARBOLADO: QUERCINEAS. DISPERSO	90	429	CULTIVOS HERBACEOS EN REGADIO: NO REGADOS	364
191	ZONAS VERDES URBANAS	0	725	MATORRAL DISP. ARBOLADO: CONIFERAS. DISPERSO	90	489	OTROS CULTIVOS LEÑOSOS ABANDONADOS	370
193	EQUIPAMIENTO DEPORTIVO Y RECREATIVO	0	730	MATORRAL DISP. ARBOLADO: EUCALIPTOS	90	479	OTROS MOSAICOS DE CULTIVOS Y VEGETACION NATURAL	386
211	MARISMA MAREAL CON VEGETACION	0	740	MATORRAL DISP. ARBOLADO: OTRAS FRONDOSAS	90	461	MOSAICO DE SECANO Y REGADIO CON CULTIVOS HERBACEOS	390
217	MARISMA RECIENTE SIN VEGETACION	0	750	MATORRAL DISP. ARBOLADO: QUERCINEAS+CONIFERAS	90	415	CULTIVOS LEÑOSOS EN SECANO: OLIVAR	400
221	SALINAS TRADICIONALES	0	760	MATORRAL DISP. ARBOLADO: QUERCINEAS+EUCALIPTOS	90	433	CULTIVOS LEÑOSOS REGADOS: OLIVOS	400
225	SALINAS INDUST. Y PARQUES DE CULTIVOS	0	770	MATORRAL DISP. ARBOLADO: CONIFERAS+EUCALIPTOS	90	411	CULTIVOS HERBACEOS EN SECANO	419
231	LAGUNAS LITORALES	0	780	MATORRAL DISP. ARBOLADO: OTRAS MEZCLAS	90	471	CULTIVOS HERBACEOS Y PASTIZALES	419
241	ESTUARIOS Y CANALES DE MAREA	0	915	MATORRAL DISPERSO CON PASTIZAL	90	473	CULTIVOS HERBACEOS Y VEGETACION NATURAL LEÑOSA	419
291	MARES Y OCEANOS	0	921	PASTIZAL CONTINUO	90	895	CULTIVO HERBACEO ARBOLADO: QUERCINEAS. DISPERSO	419
311	RIOS Y CAUCES NAT.:LAMINA DE AGUA	0	821	PASTIZAL ARBOLADO: CONIFERAS. DENSO	110	441	CULTIVOS HERBACEOS Y LEÑOSOS EN SECANO	444
315	RIOS Y CAUCES NAT.:BOSQUE GALERIA	0	891	CULTIVO HERBACEO ARBOLADO: QUERCINEAS. DENSO	110	445	OLIVAR-VIÑEDO	470
317	RIOS Y CAUCES NAT.:OTRAS FORM. RIPARIAS	0	815	PASTIZAL ARBOLADO: QUERCINEAS. DISPERSO	140	934	ZONAS INCENDIADAS	500
321	CANALES ARTIFICIALES	0	830	PASTIZAL ARBOLADO: EUCALIPTOS	140	417	CULTIVOS LEÑOSOS EN SECANO: VIÑEDO	540
331	LAGUNAS CONTINENTALES	0	840	PASTIZAL ARBOLADO: OTRAS FRONDOSAS	140	419	OTROS CULTIVOS LEÑOSOS EN SECANO	540
341	EMBALSÉS: LAMINA DE AGUA	0	850	PASTIZAL ARBOLADO: QUERCINEAS+CONIFERAS	140	430	CULTIVOS LEÑOSOS EN REGADIO: PARCIALMENTE REGADOS O NO REGADOS	540
345	BALSAS DE RIEGO Y GANADERAS	0	860	PASTIZAL ARBOLADO: QUERCINEAS+EUCALIPTOS	140	439	OTROS CULTIVOS LEÑOSOS REGADOS	540
423	CULTIVOS FORZADOS BAJO PLASTICO	1	870	PASTIZAL ARBOLADO: CONIFERAS+EUCALIPTOS	140	449	OTRAS ASOCIACIONES Y MOSAICOS DE CULTIVOS LEÑOSOS EN SECANO	540
510	FOR. ARBOL. DENSA: QUERCINEAS	10	880	PASTIZAL ARBOLADO: OTRAS MEZCLAS	140	475	CULTIVOS LEÑOSOS Y PASTIZALES	540
520	FOR. ARBOL. DENSA: CONIFERAS	10	825	PASTIZAL ARBOLADO: CONIFERAS. DISPERSO	180	477	CULTIVOS LEÑOSOS Y VEGETACION NATURAL LEÑOSA	540
530	FOR. ARBOL. DENSA: EUCALIPTOS	10	215	MARISMA NO MAREAL CON VEGETACION	200	931	PLAYAS, DUNAS Y ARENALES	1000
540	FOR. ARBOL. DENSA: OTRAS FRONDOSAS	10				932	ROQUEDOS Y SUELO DESNUDO	1000
550	FOR. ARBOL. DENSA: QUERCINEAS+CONIFERAS	10				933	AREAS CON FUERTES PROCESOS EROSIVOS	1000
560	FOR. ARBOL. DENSA: QUERCINEAS+EUCALIPTOS	10				935	ZONAS SIN VEGETACION POR ROTURACION	1000
570	FOR. ARBOL. DENSA: CONIFERAS+EUCALIPTOS	10						
580	FOR. ARBOL. DENSA: OTRAS MEZCLAS	10						
421	ARROZALES	38						
611	MATORRAL DENSO ARBOLADO: QUERCINEAS DENSA	40						
621	MATORRAL DENSO ARBOLADO: CONIFERAS DENSA	40						
630	MATORRAL DENSO ARBOLADO: EUCALIPTOS	40						
640	MATORRAL DENSO ARBOLADO: OTRAS FRONDOSAS	40						

Fuente: Elaboración propia a partir de MUCVA25.

Si bien los estudios orientados a estimar las diferencias entre el uso de SIOSE y MUCVA son aún escasos, se han desarrollado propuestas para tratar de transformar el modelo orientado a objetos de SIOSE a un modelo jerárquico similar a MUCVA (Cantarino, 2013). Desde la Consejería de Medio Ambiente se han realizado a su vez esfuerzos por cuantificar estas diferencias a nivel regional, y se destaca que en el caso de SIOSE hay una clara sobreestimación de las superficies construidas o artificiales y por otro lado una menor detección de zonas agrícolas (Gil Jiménez y otros, 2012). Estos estudios ponen en evidencia las discrepancias que pueden resultar del uso de ambas fuentes, debido principalmente a la diferencia estructural de ambos modelos, pero también al uso de nomenclaturas diferentes y a la falta de coincidencia entre las geometrías de los elementos espaciales, por un lado por la diferencia de escala, pero también por el uso de distintas fuentes básicas y auxiliares para el levantamiento cartográfico.

No obstante, teniendo en cuenta la apuesta por parte de la administración por ofrecer información detallada y actualizada sobre la ocupación del suelo a nivel estatal, actualmente se parte de SIOSE para el cálculo del factor C, y del mismo modo para obtener la erosión estimada con la ecuación USLE.

En la presente investigación se ha considerado interesante contar con los datos correspondientes a la estimación de la erosión de los años 2011, 2012, 2013 y 2014, calculadas utilizando el factor C a partir de SIOSE. Debido al cambio en la metodología de la fuente de información, la información relativa a este período no se interpretará al mismo nivel que para los otros años anteriores (2003-2010) sino que se considerará con la misma cautela que, en investigaciones similares, se hace de las estimaciones a futuro de la erosión estimada del suelo en base a posibles cambios de usos del suelo (Zare et al, 2017; Verstraeten & Prosser, 2008) o de los escenarios de cambio climático planteados por organismos internacionales (Hancock et al., 2017; Rodríguez-Lloveras, X et al., 2016), o incluso planteando cambios en ambas variables (Marker, 2008).

5. Metodología

Para alcanzar los objetivos fijados se ha utilizado un Sistema de Información Geográfica con el software ArcGIS 10.5.1. de ESRI. En primer lugar se han recortado las imágenes ráster anuales de toda Andalucía con el límite de las cuencas del río Trevélez y del arroyo de El Partido. Concretamente se han recortado tanto las imágenes de erosión del suelo estimada media anual, como las de erosividad de la lluvia media anual (Factor R) y la de protección del suelo por la cubierta vegetal (Factor C) publicadas entre 2003 y 2014, para lo cual se ha utilizado la herramienta de análisis espacial *Extract by Mask*. Se han obtenido un total de 52 imágenes ráster (12 imágenes ráster para cada una de las dos cuencas de erosión estimada anual, 24 de erosividad de la lluvia media anual de ambas cuencas más las 2 imágenes de Factor C que proporciona la administración para cada cuenca correspondientes a 2003 y 2007).

Los resultados de la erosión media anual se publican en formato ráster con valores separados en clases de 1 a 4, cada una de ellas correspondiente a un rango de erosión de suelos (vid. Cuadro 2) y no es posible consultar la tabla en la que se asocia el número de píxeles con que cuenta cada clase, lo cual es imprescindible para conocer la superficie de la cuenca afectada por cada rango de erosión. Para convertir dichas imágenes ráster en otras de las que sí se pueda consultar su tabla es necesario transformarlas a números enteros. Antes de hacerlo, sin embargo, y dado que se trata de calcular medias de dichos rangos cada cuatro o más años, se ha considerado preferible contar con varias cifras decimales para que se amplíe la posibilidad de recoger una mayor variabilidad de situaciones. Para lograr este objetivo, antes de convertir las imágenes a números enteros se ha procedido a multiplicarlas por 1000, de manera que los rangos serán ahora de 1000, 2000, 3000 y 4000 y las medias podrán tener hasta tres decimales. Por ejemplo un píxel que tenga una evolución en los cuatro años de rangos 1000, 1000, 1000, 2000 tendrá una media de 1250, que corresponderá a un 1,25. Este paso es necesario porque el cálculo de medias entre números enteros ofrecería resultados sin decimales $[(1+1+1+2)/4=1]$. Tanto para hacer esta operación aritmética como para pasar las imágenes a números enteros se utiliza la herramienta de análisis espacial *Raster calculator*.

A continuación se construye una serie de modelos con la herramienta *model builder* de ArcMap que se programan para que calculen medias aritméticas de las imágenes raster tanto de erosión estimada como de erosividad para el período global de 2003 a 2014 y para los períodos de cuatro

años. Una vez obtenidas las nuevas imágenes raster resultantes del cálculo de dichas medias, se han consultado los archivos .dbf que las acompañan para obtener la superficie de cada cuenca afectada por las tasas de erosión o erosividad establecidas.

La utilización de medias de cuatro años en lugar de la comparativa año a año viene determinada por el cálculo del Factor C, que se actualiza únicamente cada cuatro años con la elaboración de las cartografías MUCVA. Es por ello que la fecha de publicación de estos mapas de usos constituye el inicio del período (vid cuadro 5) y se descarta la variabilidad interna en estos períodos de cuatro años que se deberían exclusivamente a los cambios en la erosividad de la lluvia, puesto que en ese período se utiliza el mismo mapa de factor C.

Cuadro 5. Relación de años con Mapa de Usos del Suelo publicados (MUCVA-SIOSE) frente a los años con Mapas de Erosión del Suelo publicados por la Junta de Andalucía.

AÑO	USOS DEL SUELO (MUCVA)	USOS DEL SUELO (SIOSE)	FACTOR C	EROSIÓN DE SUELOS Y EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (FACTOR R)	PERÍODO
2003	X		X	X	1
2004				X	
2005				X	
2006				X	
2007	X		X	X	2
2008				X	
2009				X	
2010				X	
2011		X	X	X	3
2012				X	
2013				X	
2014				X	

Fuente: Elaboración propia.

Dado que la Junta de Andalucía aún no ha publicado en su geoportal REDIAM la imagen raster correspondiente al cálculo del Factor C utilizado para la ecuación USLE de 2011 a 2014, ésta se ha elaborado a partir del SIOSEa de 2011 utilizando la pasarela entre las categorías SIOSE y las categorías MUCVA desarrollada minuciosamente por la administración (Junta de Andalucía, 2015). Con posterioridad se ha aplicado la correspondencia establecida entre categorías MUCVA y Factor C por la Junta de Andalucía, tal y como ya se mostró en el cuadro 4. Para mantener la uniformidad de los datos, esta cartografía vectorial se ha convertido a ráster con tamaño de píxel de 75 m.

6. Resultados

6.1. Evolución de la erosión estimada de suelos

Los valores USLE de erosión estimada media anual del período completo analizado entre 2003 y 2014 muestran que la cuenca del río Trevélez presenta una escasa pero representativa proporción de superficie afectada por tasas de erosión elevadas a muy elevadas, si bien la mayor parte del te-

territorio se reparte entre los valores bajos y moderados (vid cuadro 6). En El Partido los valores de erosión elevada a muy elevada afectan al 6,15% de la cuenca, mientras que el resto de la superficie se reparte entre los valores moderados y, sobre todo, bajos.

Cuadro 6. Valores medios de erosión de suelos estimada en las cuencas del Río Trevélez (Granada) y del arroyo de El Partido (Huelva). (1=0-12 Tm/ha/año; 2=12-50 Tm/ha/año; 3=50-100 Tm/ha/año; 4=>100 Tm/ha/año)

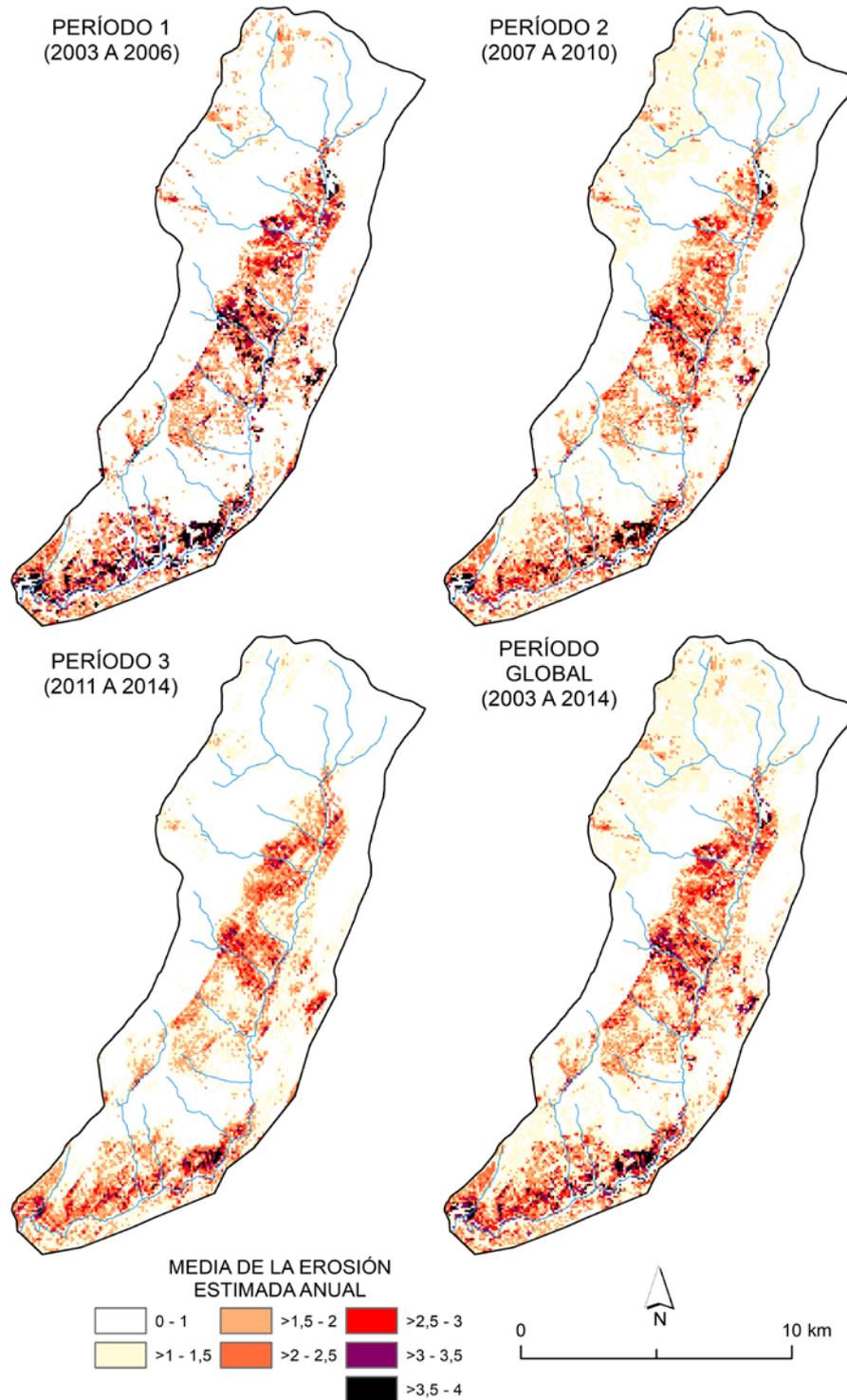
CUENCA DEL RÍO TREVÉLEZ				
% superficie con escala de erosión estimada de 1 a 4	Baja 0-1	Moderada >1-2	Alta >2-3	Muy alta >3-4
PERÍODO 1 (2003-2006)	53.1	34.5	10.0	2.4
PERÍODO 2 (2007-2010)	66.8	19.0	8.5	5.7
PERÍODO 3 (2011-2014)	61.7	29.2	7.9	1.2
PERÍODO GLOBAL (2003-2014)	44.6	42.0	10.0	3.3
CUENCA DEL ARROYO DE EL PARTIDO				
% superficie con escala de erosión estimada de 1 a 4	Baja 0-1	Moderada >1-2	Alta >2-3	Muy alta >3-4
PERÍODO 1 (2003-2006)	74.4	18.1	6.7	0.8
PERÍODO 2 (2007-2010)	78.6	14.3	5.0	2.1
PERÍODO 3 (2011-2014)	76.2	19.8	3.8	0.3
PERÍODO GLOBAL (2003-2014)	69.23	24.11	6.13	0.52

Fuente: Elaboración propia.

Los píxeles que muestran las tasas más elevadas de erosión estimada se distribuyen por las laderas próximas a los cursos fluviales, en el tramo medio y bajo del río Trevélez y en el centro-norte de El Partido (vid. mapas 2 y 3). Cabe destacar una pequeña zona que separa el tramo medio-alto y el tramo bajo del río Trevélez donde aparecen tasas bajas de erosión estimada explicable por el importante descenso de la pendiente en torno al núcleo de Los Llanos, correspondiente al municipio de Busquístar. Además de este ámbito, los rangos moderados y bajos de erosión en la cuenca del río Trevélez se sitúan sobre todo en el área de cumbres y en los límites entre cuencas. Estas áreas cercanas a los interfluvios con valores bajos de erosión se reproducen igualmente en la cuenca del arroyo de El Partido, además de en todo el tramo bajo de la misma.

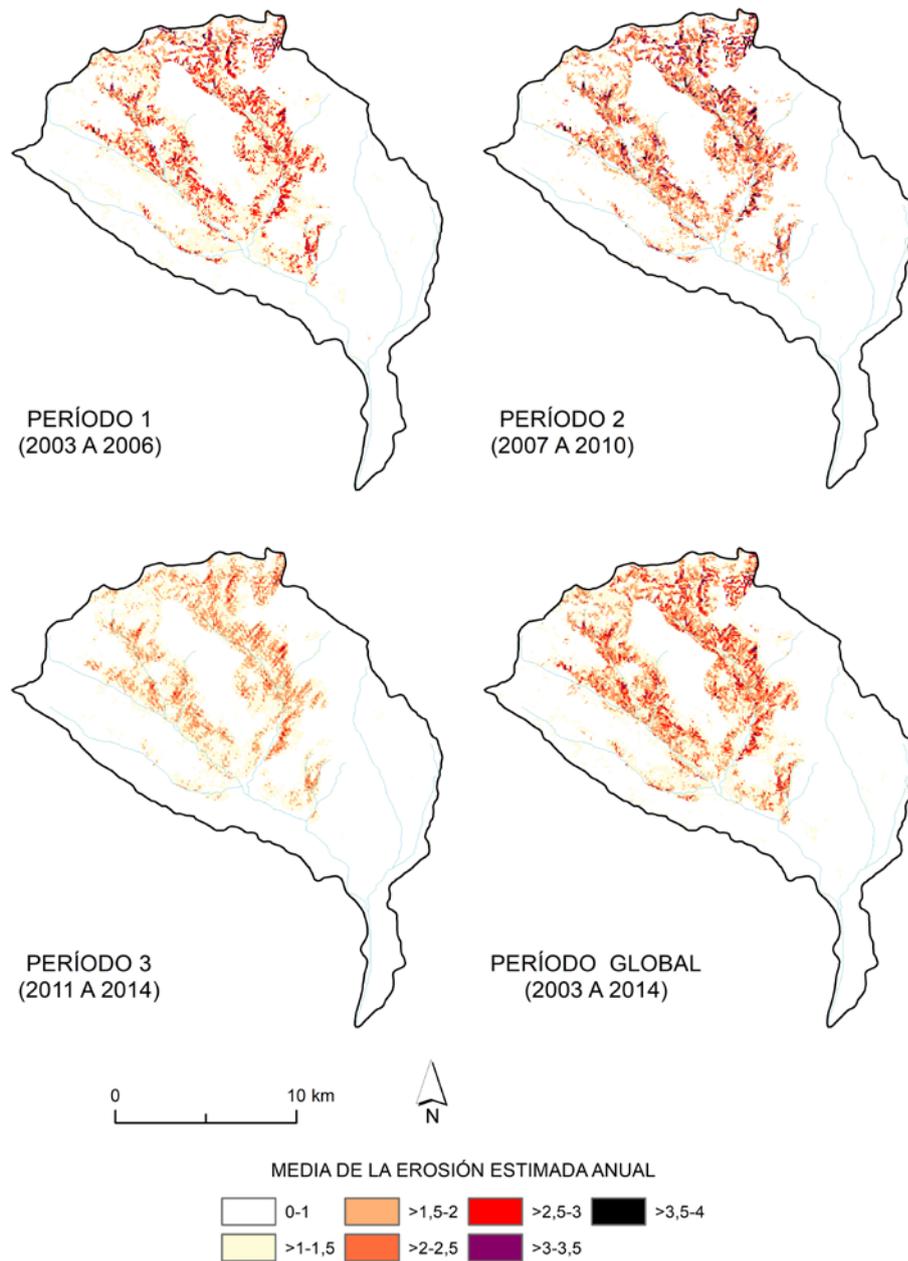
La comparación de las tasas medias de erosión estimada entre los sucesivos períodos de cuatro años muestra que en la cuenca del río Trevélez se produce un descenso de la superficie que presenta rangos bajos y moderados desde el período 1 (2003-2006) al 2 (2007-2010) de -1,8%, mientras que en el período 3 (2011-2014) se produciría un incremento de +6,1%. Estos valores se compensan, lógicamente, con la tendencia contraria de la erosión alta a muy alta, por lo que se puede afirmar que la erosión de esta cuenca es algo más elevada durante el período 2. Esta interpretación se confirma al observar el incremento de los valores más elevados de erosión en un 3,3% de la cuenca durante ese mismo período 2. Tan sólo queda hacer una matización al considerar independientemente las tasas de erosión baja y la erosión moderada, cuyo comportamiento es inverso, con incremento de la primera entre los períodos 1 y 2 a la vez que la segunda disminuye, cambiando ambas la tendencia en el período 3.

Mapa 2. Media de la erosión estimada en la cuenca del río Trevélez (Granada). Se representa la media, para los cuatro o 12 años de cada período, de la erosión media anual proporcionada por la Junta de Andalucía.



Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía de erosión de suelos (J. de Andalucía).

Mapa 3. Media de la erosión estimada en la cuenca del arroyo de El Partido (Huelva). Se representa la media, para los cuatro o 12 años de cada período, de la erosión media anual proporcionada por la Junta de Andalucía.



Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía de erosión de suelos (J. de Andalucía).

En la cuenca del arroyo de El Partido, por su parte, la división en tres períodos de los datos obtenidos informa del período 1 como el que muestra valores más elevados de erosión estimada. En este sentido se interpreta el aumento de la superficie afectada por las tasas bajas-moderadas de erosión estimada a lo largo de los tres períodos, tendencia que se compensa con el correspondiente descenso de la superficie afectada por tasas altas-muy altas. En detalle, sin embargo, destaca un cierto descenso de la erosión estimada en el período 2, durante el cual se reconoce una menor superficie afectada por tasas moderadas compensado con un incremento de la superficie afectada por tasas bajas. A pesar de ello, es durante este período 2 cuando se produce un máximo en las tasas muy altas, afectando al 2,1% de la cuenca.

Considerando ambas cuencas cabe destacar una evolución paralela entre las distintas tasas de erosión estimada. En este sentido los resultados muestran una inflexión durante el período 2, con incrementos de superficie afectada por tasas bajas y muy altas a la vez que desciende la afectada por tasas moderadas. Tan solo se observa un descenso mantenido en los tres períodos de las tasas altas de erosión estimada en ambas cuencas. Si se consideran agrupados los rangos de erosión baja-moderada y alta-muy alta se puede destacar en ambas cuencas el incremento que se produciría durante el período 3 de las tasas bajas a muy bajas, que pasarían a afectar a más del 90% de la superficie de ambas cuencas. En este sentido se puede señalar al período 3 como el que se estima que contaría con una menor incidencia de la erosión hídrica.

El análisis de la distribución espacial de la erosión en los tres períodos analizados revela que los ámbitos más afectados por las máximas intensidades se han mantenido a lo largo del tiempo, siempre cercanos al valle fluvial del curso medio-bajo en el río Trevélez, y medio-alto en el arroyo de El Partido. En la primera destacan las variaciones producidas en el área de cumbres del NW de Sierra Nevada y el progresivo descenso de los valores de erosión en el tramo bajo del valle. En la cuenca de El Partido, por el contrario, es el extremo norte el que acusa las mayores intensidades de erosión. En todo caso cabe destacar que en ambas cuencas la mayor erosión se localiza en las áreas más alejadas de los Parques Nacionales.

Dado que esta estimación deriva de la evolución de los distintos parámetros que intervienen en la ecuación de erosión USLE, sobre todo de aquéllos que son variables en el tiempo, se ha considerado de interés llevar a cabo un análisis pormenorizado de los dos factores variables que son considerados como más determinantes a la hora de calcular la erosión, es decir, Factor C y Factor R.

6.2. Evolución del Factor R en relación a la erosión de suelos

Entre 2003 y 2004 los valores medios de R muestran una erosividad de la lluvia relativamente reducida en la cuenca del río Trevélez, a la vez que se producen grandes oscilaciones entre los tres períodos analizados. La mayor parte de la superficie de la cuenca del río Trevélez se ha visto afectada entre 2003 y 2014 por lluvias con valores medios anuales de erosividad en torno a los >3 a $4 \text{ MJ} \times \text{mm} / \text{ha} \times \text{hora} \times \text{año}$ (87,4%), registrándose en total valores que oscilan entre $>2,5$ y $4 \text{ MJ} \times \text{mm} / \text{ha} \times \text{hora} \times \text{año}$ (vid. cuadro 7).

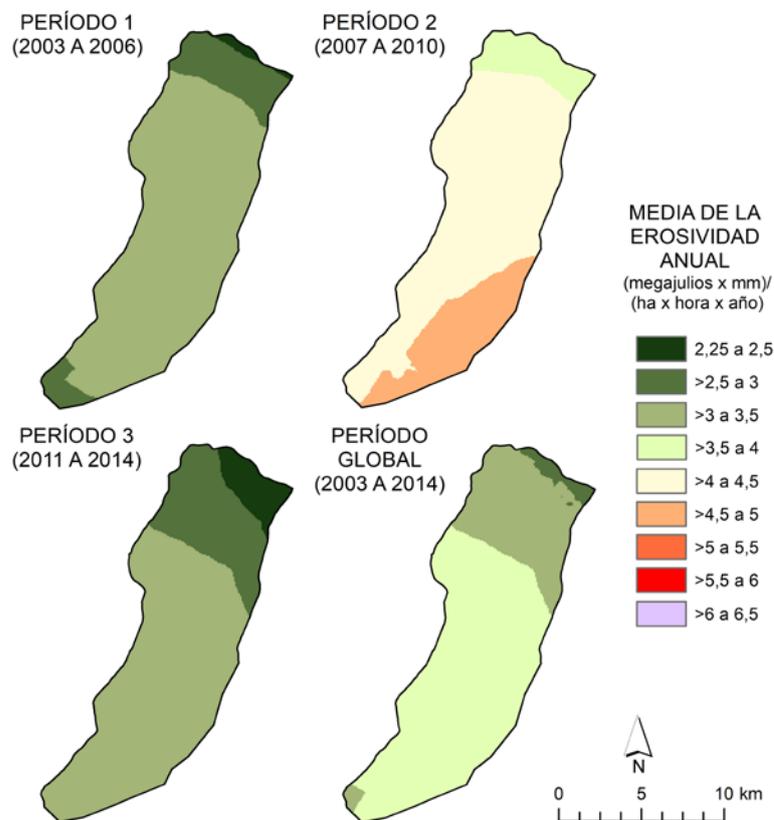
La distribución espacial de erosividad de la lluvia en esta cuenca muestra sus valores más elevados en el tramo bajo de la misma, mientras que los más reducidos se localizan en su extremo norte (vid mapa 4).

Cuadro 7. Erosividad media (MJ×mm)/(ha×hora×año).

CUENCA RÍO TREVÉLEZ									
	>2-2.5	>2.5-3	>3-3.5	>3,5-4	>4-4.5	>4.5-5	>5-5.5	>5.5-6	>6-6.5
PERÍODO 1 (2003-2006)	1.2	15.2	83.5						
PERÍODO 2 (2007-2010)				10.1	69.1	20.8			
PERÍODO 3 (2011-2014)	6.9	22.3	70.8						
PERÍODO GLOBAL (2003-2014)		2.6	27.4	70.0					
CUENCA ARROYO EL PARTIDO									
	>2-2.5	>2.5-3	>3-3.5	>3,5-4	>4-4.5	>4.5-5	>5-5.5	>5.5-6	>6-6.5
PERÍODO 1 (2003-2006)						17.1	82.8	0.1	
PERÍODO 2 (2007-2010)								92.5	7.5
PERÍODO 3 (2011-2014)				9.0	67.6	23.3			
PERÍODO GLOBAL (2003-2014)						6.9	93.1		

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 4. Erosividad de la lluvia (Factor R) en la cuenca del río Trevélez (Granada). Media calculada para los períodos 2003-2006, 2007-2010 y 2011-2014, así como para el período 2003-2014.



Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía de Erosividad de la lluvia, Junta de Andalucía.

Considerando la variabilidad entre los distintos períodos analizados destacan los valores más elevados del período 2, con la mayor parte de la superficie de la cuenca bajo lluvias de erosividad por encima de la media (>4 a $5 \text{ MJ} \times \text{mm}/\text{ha} \times \text{h} \times \text{año}$, 89,9%). Dicho período resalta particularmente como contraste frente a los reducidos valores de la erosividad de la lluvia producidos en los períodos 1 y 3. Dentro de estos valores reducidos, cabe mencionarse que es durante el período 3 cuando la erosividad de la lluvia se presenta con menos intensidad en la cuenca del río Trevélez, con apenas un 70% de su superficie afectada por precipitaciones de entre >3 - $3,5 \text{ MJ} \times \text{mm}/\text{ha} \times \text{h} \times \text{año}$, mientras que en el primer período incide con dicha capacidad erosiva a más del 80% de la misma.

Se pueden establecer distintos paralelismos entre la evolución de la erosividad de la lluvia y la de la erosión estimada en la cuenca del río Trevélez. En primer lugar el período 3, con los valores mínimos de erosividad de la lluvia, coincide con los valores más elevados de erosión baja y moderada y mínimos de erosión alta y muy alta. Por otro lado, el repunte de la erosividad de la lluvia durante el período 2 puede relacionarse con el incremento, leve pero significativo, tanto de las tasas muy altas como de las tasas altas y muy altas consideradas en conjunto. Hay que señalar que este período intermedio de máxima erosividad de la lluvia coincide también, sin embargo, con un incremento de la erosión baja y un descenso de la erosión moderada.

La cuenca del arroyo de El Partido, por su parte, se ha visto afectada por precipitaciones con mayor capacidad erosiva de lo que se han registrado en Trevélez, con predominio de valores medios para el período completo situados entre >5 y $5,5 \text{ MJ} \times \text{mm}/\text{ha} \times \text{h} \times \text{año}$ (93,1%, cuadro 7). En cuanto a la distribución espacial de la erosividad de la lluvia en la cuenca hay que mencionar que no muestra variaciones de importancia, con un cierto descenso de los valores hacia el oeste e incrementos hacia el este (vid. mapa 5).

Al analizar el comportamiento de los resultados en períodos sucesivos se observa una tendencia similar a la de la cuenca del río Trevélez, con los valores más elevados en el período 2, algo menores en el período 1 y mínimos en el período 3. Concretamente, los valores de erosividad que afectan a la mayor parte de la cuenca del arroyo de El Partido oscilan desde los $>4,5$ y $5,5 \text{ MJ} \times \text{mm}/\text{ha} \times \text{h} \times \text{año}$ en el primer período (99,9%), subiendo hasta los $>5,5$ a $6 \text{ MJ} \times \text{mm}/\text{ha} \times \text{h} \times \text{año}$ en el segundo (92,5%), y descendiendo a >4 - $5 \text{ MJ} \times \text{mm}/\text{ha} \times \text{h} \times \text{año}$ en el período 3 (91,9%).

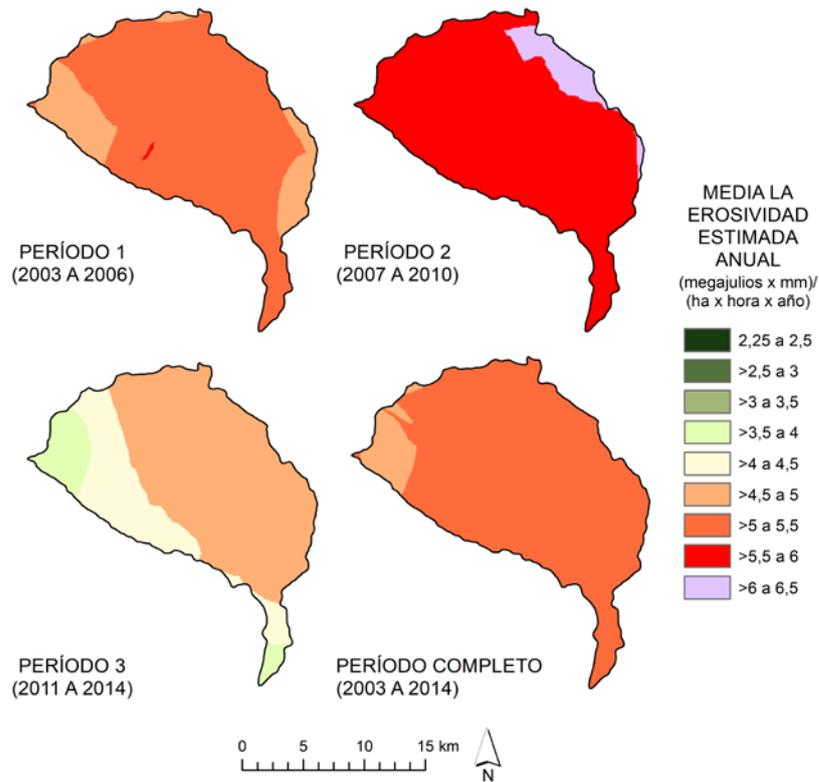
El principal paralelismo que puede establecerse entre los resultados por períodos de la erosividad de la lluvia y la erosión estimada en la cuenca de El Partido es la coincidencia durante el período 2 de la erosividad de la lluvia más elevada y del incremento de la superficie afectada por tasas de erosión estimada muy alta, prácticamente inexistente en los otros dos períodos.

En el extremo opuesto, los niveles mínimos de erosividad de la lluvia durante el período 3 vienen a coincidir con la máxima extensión afectada por la erosión moderada considerada independientemente o en conjunto con la erosión baja, así como la mínima extensión que presenta valores de erosión alta a muy alta. El período 1, por su parte, cuyos valores de erosividad de la lluvia pueden considerarse bastante más elevados que el período 3, destaca por un repunte en los resultados de las tasas altas y muy altas de erosión estimada.

Al comparar los resultados de ambas cuencas se puede destacar que los valores de erosividad máximos que se registran en Trevélez coinciden con los mínimos de El Partido. A pesar de ello, el período 2 resalta por contar en ambas cuencas con los valores máximos de erosividad registrados y coincide con repuntes de las tasas más elevadas de erosión estimada de suelos, que afectan a

una mayor proporción de la cuenca de Trevélez que de El Partido, probablemente derivado de las diferencias de pendientes entre ambas.

Mapa 5. Erosividad de la lluvia (Factor R) en la cuenca del arroyo de El Partido (Huelva). Media calculada para los períodos 2003-2006, 2007-2010 y 2001-2014, así como para el período 2003-2014.



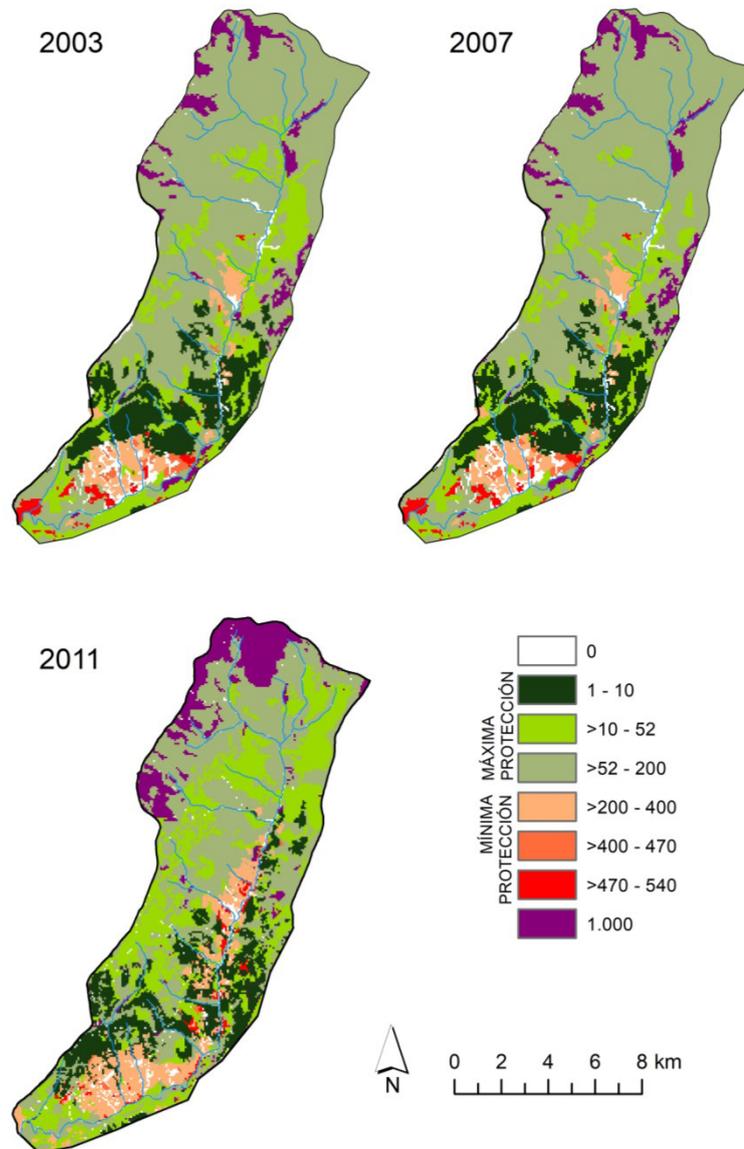
Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía de Erosividad de la lluvia, Junta de Andalucía.

6.3. Evolución del Factor C en relación a la erosión de suelos.

El análisis de la distribución espacial y la evolución del Factor C en la cuenca del río Trevélez muestra una continuidad en los usos de buena parte de su extensión en las cartografías de 2003 y 2007 (vid. mapa 6). En las dos primeras fechas destacan las elevadas proporciones de superficie de la cuenca dedicadas a usos que favorecen en mayor grado la conservación del suelo, tales como masas arboladas y pastizal con matorral denso (88% con un Factor C entre 0 y 200). Por el contrario, los valores máximos, correspondientes a los usos que ejercen una menor protección del suelo frente a la erosión (superficie desprovista de vegetación Factor C=1000), tan sólo se reconocen en el 5,5% de la extensión de la cuenca (cuadro 8). Es necesario tener en cuenta que las cumbres de Sierra Nevada se encuentran cubiertas de nieve en invierno y desprovistas de ella en verano, por lo que la vegetación será estacional y de escaso porte. Por ello los valores máximos de Factor C se localizan en la zona de cumbres, tanto al NW de la cuenca del río Trevélez como en el límite oriental de la misma, coincidiendo con las crestas que la separan de la cuenca de los ríos Chico y Grande de Bérchules (vid. mapa 1). Sin que afecten a una gran superficie (en torno al 6%), es necesario señalar los usos agrícolas que se sitúan en valores medios y medio-altos de Factor C (> 200 y 540), tales como el olivar y viñedo abandonado o los cultivos herbáceos y leñosos, etc...

Estos usos relativamente impactantes se localizan en las proximidades del cauce fluvial del río Trevélez en su tramo medio y bajo.

Mapa 6. Factor de protección de la cobertura vegetal (Factor C) de la cuenca del río Trevélez (Granada).



Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía de Factor C, Junta de Andalucía.

La cartografía que estima los valores del Factor C de 2011 muestra diferencias relativamente importantes respecto a los dos años anteriores, destacando el incremento en las cumbres de los valores máximos, que pasarían a superar el 9% de la cuenca (Factor C = 1000) y, sobre todo, la importante reducción de los valores mínimos, que ocuparían el 81% de su superficie (Factor C entre 0 y 200).

El análisis del Factor C indica que la evolución de los usos y coberturas vegetales no parece ser responsable única de los elevados valores que localmente alcanza la erosión estimada en la cuenca del río Trevélez, donde las diferencias de pendiente explican que los ámbitos de alta montaña

que cuentan con sus valores máximos de Factor C no sean los que muestren una erosión más intensa. Cabe destacar, sin embargo, la influencia que esta variable tiene en las laderas próximas al cauce fluvial en su tramo medio y bajo, donde se concentra la actividad agrícola.

El mantenimiento casi idéntico de los valores de Factor C en los dos primeros períodos analizados indica un cierto estancamiento de los usos en la cuenca. El cambio relativamente importante que se observa en el período 3 con respecto a los anteriores podría deberse en parte al cambio metodológico en la elaboración del SIOSE frente al MUCVA, aunque es probable que vaya acompañado también de un cierto dinamismo de la economía local. Dicha estimación de los usos y coberturas para 2011 mostraría un descenso del 7% de la superficie de la cuenca dedicada a los usos que ejercen una mayor protección frente a la erosión hídrica, con masas forestales más fragmentadas, que darían paso a un incremento de las áreas agrícolas de secano avanzando río arriba.

Cuadro 8. Valores de Factor C en las cuencas del Río Trevélez y del Arroyo de El Partido para cada año analizado.

CUENCA DEL RÍO TREVÉLEZ	% superficie con escala de 0 a 1000	0-200	>200-400	>400-540	1000
2003		88.26	4.03	2.25	5.45
2007		88.25	4.05	2.24	5.46
2011		81.05	8.42	1.32	9.22
CUENCA DEL ARROYO DE EL PARTIDO	% superficie con escala de 0 a 1000	0-200	>200-400	>400-540	1000
2003		36.40	14.42	47.37	1.80
2007		35.18	19.70	43.29	1.83
2011		39.24	20.63	38.84	1.28

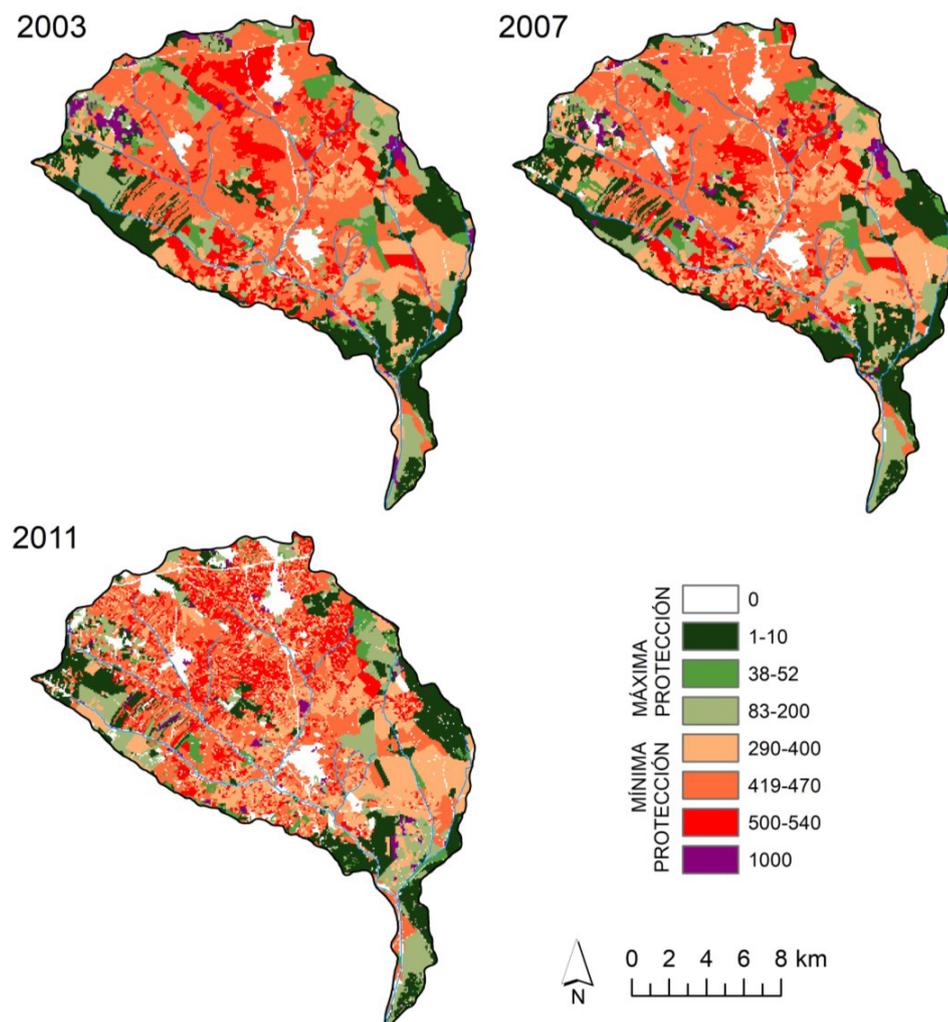
Fuente: Elaboración propia.

El cotejo de los valores estimados de erosión y Factor C por períodos en Trevélez no permite hacer una correlación plena entre el incremento de la erosión estimada durante el período 2 y la expansión de usos que representan una menor cobertura del suelo frente a los procesos erosivos. El comportamiento en esta cuenca de los usos durante los dos primeros períodos puede relacionarse con un proceso de estancamiento que solo se rompe en 2011. Esta continuidad de los usos durante las dos primeras fechas analizadas puede verse tal vez reflejada en el mantenimiento de los valores de la erosión baja-moderada, con una oscilación que no supera el 1,8% de la extensión de la cuenca. La estimación de la expansión de los usos agrícolas y descenso de las formaciones arbóreas y de matorral en 2011 tan solo encontraría correspondencia en el incremento relativamente importante de la erosión moderada (de 19,0 a 29,2%) frente al descenso de los valores bajos, altos y muy altos.

En lo que se refiere a la cuenca del arroyo de El Partido, los usos no se encuentran tan concentrados en una categoría de Factor C como lo hacía en Trevélez sino que se encuentran más diversificados. Como categoría mayoritaria, los usos agrícolas como cultivos herbáceos de secano, viñedos y otros cultivos leñosos con un Factor C medio-alto (>400-540) se desarrollan en torno al 40% de la superficie de la cuenca, mostrando un retroceso de 2003 a 2011. Este descenso se vería compensado por un incremento en usos con Factor C de impacto medio (>200-400) tales como

plantaciones forestales, herbáceos de regadío, mosaicos de cultivos y olivar, que se extenderían por el centro de la cuenca. Los usos que ejercen una protección más efectiva frente a la erosión, como son las formaciones forestales o de matorral (Factor C 0-200), también se encuentran bien representadas en esta cuenca, superando el 35% de su extensión en las fechas analizadas. Este tipo de cobertura se distribuye en los límites oriental y occidental de la cuenca, así como en el extremo sur de la misma. Los proyectos de regeneración del cauce (Doñana 2005) y la protección del Parque Nacional de Doñana constituyen la explicación de este predominio de la vegetación natural en el ámbito sur, más cercano al mismo. Los usos y coberturas que desarrollan una menor labor de protección del suelo frente a la erosión hídrica (Factor C=1000) no alcanzan el 2% de la cuenca (vid. cuadro 8 y mapa 7).

Mapa 7. Factor de protección de la cobertura vegetal (Factor C) de la cuenca del arroyo de El Partido (Huelva) calculada para los años 2003, 2007 y 2011.



Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía de Factor C, Junta de Andalucía.

El uso intensivo del territorio que se desprende del análisis del Factor C en la cuenca del arroyo de El Partido se encuentra en consonancia con la relevancia de las tasas de erosión estimada de moderadas a muy altas, muy por encima de lo que podría esperarse dadas las escasas pendientes presentes en dicha cuenca.

La consideración conjunta de los valores del Factor C y de la erosión hídrica estimada permite, en el caso de la cuenca del arroyo de El Partido, reconocer ciertos paralelismos. En primer lugar se confirma que el incremento de las superficies dedicadas a cubierta arbórea y matorral favorece las reducciones de las tasas de erosión estimada más elevadas. Efectivamente, la extensión dedicada a formaciones forestales y matorral (0-200), que disminuye levemente durante el período 2 y aumenta con más intensidad en las estimaciones del período 3, tiene un reflejo en la tendencia mostrada por la superficie afectada por tasas bajas-moderadas de erosión estimada. En segundo lugar el descenso progresivo de la superficie de la cuenca ocupada por usos agrícolas de impacto medio-alto (>400-550) coincide con un descenso similar de la superficie afectada por tasas de erosión alta y alta-muy alta. En tercer lugar, la dinámica descrita por la extensión desprovista de vegetación (1000) a lo largo de los tres períodos, aún afectando a una escasa proporción de la cuenca, es similar a la que muestra las tasas de erosión estimada muy altas.

7. Discusión y Conclusiones

Se ha constatado la relevancia que los usos y coberturas vegetales tienen como variable clave a la hora de explicar la distribución espacial de los valores de erosión estimada en la cuenca del río Trevélez. El predominio de los niveles de erosión bajos y moderados en dicha cuenca deriva, en gran medida, de los esfuerzos de reforestación llevados a cabo a partir de mediados del siglo XX. De manera coetánea se fue produciendo un abandono de las actividades agrarias en áreas de media montaña, favoreciendo la expansión del monte bajo e incluso de la vegetación forestal, coberturas que permitieron una reducción aún mayor de las tasas de erosión. Tan sólo se observan tasas más elevadas allí donde se mantuvo una actividad agrícola dedicada fundamentalmente a cultivos leñosos y a agricultura intensiva, concretamente en las áreas próximas al cauce fluvial y en el tramo bajo del río. La relevancia de los usos del suelo en la erosión se ha estimado en otras áreas montañosas europeas (Latocha, *et al.*, 2016; Cebecauer y Hofierka, 2008)

En el caso de la otra variable considerada, la homogeneidad de los cálculos de erosividad de la lluvia a lo largo de la cuenca, derivada de la extrapolación de los datos a partir de los puntos donde se localizan las estaciones meteorológicas, impide su consideración a la hora de explicar las variaciones espaciales de detalle mostradas por los valores de erosión estimada.

Los períodos de cuatro años que se suceden entre 2003 y 2014 muestran que los valores extremos de erosión en la cuenca del río Trevélez se asocian al incremento de la erosividad de la lluvia en mayor medida que a los cambios en los usos del suelo dado que éstos muestran escasas variaciones. Así sucede en el período 2, cuando se producen los valores más elevados de erosividad de la lluvia en la cuenca del río Trevélez coincidiendo con la máxima extensión de la erosión alta-muy alta. En sentido contrario sucede de la misma forma, es decir, en el período 3 se dan los valores mínimos de erosividad de la lluvia, que coincidirían con la más reducida extensión de la erosión alta y muy alta. Cuando la erosividad de la lluvia es moderada, como sucede durante el período 1, se produce un predominio de la erosión media. Otros estudios han destacado la relevancia de la erosividad de la lluvia en el incremento de las tasas de erosión de suelos en áreas de media montaña mediterránea (Marker *et al.* 2008).

A pesar de esta cierta correlación de valores extremos de erosión y erosividad de la lluvia que se detecta en Trevélez, cabe destacar que la erosión extrema siempre afecta a una reducida superficie de la cuenca situada en ámbitos con pendientes máximas. En el extremo opuesto, durante el pe-

riodo 2 los valores de erosividad de la lluvia máximos coinciden con la mayor superficie afectada por erosión baja de toda la serie.

La importancia que la distribución espacial de los usos del suelo tienen sobre los valores de erosión hídrica estimada en la cuenca del río Trevélez ya ha sido expuesta considerando el período de doce años analizados. Al considerar los datos medios en períodos de cuatro años, sin embargo, destaca la estabilidad que se observa en los usos del suelo para los dos primeros períodos que no coincide con un mantenimiento de las tasas de erosión. De hecho, el período 2, que se caracteriza por los valores más elevados de erosividad de la lluvia, coincide con un incremento de la erosión alta y muy alta a pesar del mantenimiento de los usos del suelo. Esto lleva a considerar que la estabilidad en usos tales como los presentes en el tramo más bajo de la cuenca del río Trevélez (olivar y viñedo abandonados, cultivos herbáceos y leñosos etc...) o en el tramo medio (matorral o pastizal con o sin arbolado) no representaron un impedimento para que la intensificación de las precipitaciones durante el período 2 llevara a un incremento estimado de la erosión alta y muy alta.

El período 3 cuenta en Trevélez con cambios en el Factor C que, si bien tampoco afectan a una proporción elevada de la cuenca (7,20%), corresponderían a un leve retroceso de las cubiertas de matorral y arbolado en pos de actividades agrícolas, lo cual se traduciría en un incremento de la erosión moderada (+10,2%), a pesar de contar con los valores más bajos de erosividad de la lluvia de los tres períodos analizados.

En función de estas correlaciones, se podría concluir que una intensificación de los procesos de Naturbanización en la cuenca del río Trevélez que se basase en recuperar áreas de cultivo favorecería inevitablemente el incremento de la erosión hídrica, si bien una buena planificación podría evaluar previamente su impacto utilizando la misma metodología USLE, con el objeto de determinar las áreas de menor impacto y la extensión máxima que podría ponerse en cultivo para mantener los valores actuales de erosión estimada.

En lo que respecta a la cuenca del arroyo de El Partido, se ha constatado el predominio de los niveles bajos y moderados de erosión. Son los cauces fluviales, en el tramo alto y medio de la cuenca, los que concentran los valores de erosión más intensos. Dada la homogeneidad espacial que muestran los valores considerados de erosividad de la lluvia, la distribución de la erosión del suelo en El Partido es un reflejo de los usos agrícolas intensivos desarrollados prácticamente en toda su extensión. Tan solo el tramo bajo más próximo al Parque Nacional de Doñana cuenta con una importante presencia de usos forestales y de matorral que repercuten en unos valores de erosión más reducidos.

El análisis de la evolución de la erosión del suelo por períodos de cuatro años en la cuenca del arroyo de El Partido encuentra una mayor correlación con los cambios de usos del suelo interpretados a partir de las cartografías de Factor C. Se podría concluir que la reducción de la extensión dedicada a cultivos herbáceos de secano, viñedo y otros cultivos leñosos producida en El Partido a lo largo de los tres períodos considerados se traduce en un paulatino descenso de las tasas altas de erosión estimada.

La erosividad de la lluvia, que destaca en esta cuenca por las oscilaciones importantes de sus valores a lo largo del tiempo, no tiene una repercusión proporcional. Si acaso puede mencionarse cómo el fuerte incremento de la erosividad de la lluvia durante el período 2 se refleja en un repre-

sentativo incremento de las tasas de erosión muy altas (>3-4), prácticamente inexistentes en los otros dos períodos.

Se puede, por tanto, deducir que en la cuenca del arroyo de El Partido los usos forestales y de matorral denso constituyen un buen elemento de control de la erosión. Sin embargo, el impacto de la agricultura intensiva coincidiendo con lluvias con valores de erosividad por encima de los 5 MJ·mm/ha·h·año repercuten en un incremento de las tasas muy altas de erosión.

En el caso de la cuenca del arroyo de El Partido, los procesos de Naturbanización que no se centrasen en una intensificación de los usos no tendrían por qué reflejarse en un incremento de la erosión hídrica. Al igual que en el caso de Trevélez, sería necesaria una planificación previa para minimizar su impacto.

Abordar el estudio diacrónico de los valores de erosión hídrica estimada y su comparación en dos cuencas tan distintas como las del río Trevélez y el arroyo de El Partido ha resultado de gran interés. En primer lugar se ha puesto de manifiesto la importancia de las pendientes a la hora de explicar la variabilidad interna de cada cuenca en las tasas de erosión estimada, sobre todo en Trevélez, así como en las diferencias existentes entre las dos cuencas analizadas. De ahí que la cuenca del río Trevélez presente una erosión más intensa a pesar de contar con una mayor cubierta forestal y de matorral y precipitaciones de menor intensidad. En segundo lugar se observa una correlación relativamente importante entre la distribución de los usos y coberturas en las cuencas y la intensidad de la erosión hídrica estimada, conexión que se mantiene al analizar la evolución temporal de ambas variables en El Partido. Este vínculo no queda tan claro en la cuenca del río Trevélez, sobre todo cuando se observa que los usos de suelo intensivos no se traducen en tasas de erosión estimada elevadas a menos que coincidan con lluvias de erosividad por encima de los 4,5-5 MJ·mm/ha·h·año. Y en tercer lugar se constata que la erosividad de la lluvia queda amortiguada en zonas de escasa pendiente como sucede en la cuenca del arroyo de El Partido. A pesar de contar con precipitaciones con valores de erosividad media en su mayor parte por encima de los 4-4,5 MJ·mm/ha·h·año y de contar con usos con escasa capacidad de retención de suelos, los volúmenes totales de sedimentos removilizables en dicha cuenca son relativamente bajos. En Trevélez, sin embargo, estos volúmenes son más elevados a pesar de contar con lluvias de menor capacidad erosiva y una cubierta vegetal más protectora.

La erosión de suelos siempre representa un gran problema, de hecho en la cuenca del río Trevélez se puso en marcha todo un proyecto de reforestación cuyo principal objetivo era reducir los niveles de erosión. Que el arroyo de El Partido desemboque en las marismas del Parque Nacional de Doñana eleva aún más la alarma ante la intensidad de la erosión y los volúmenes de sedimentos que transporta. Los sedimentos que acarrea éste junto a otros arroyos próximos hacia la marisma del Guadalquivir en el entorno de El Rocío (Almonte, Huelva) producen una enorme preocupación dado que puede derivar en la colmatación de la marisma (Mintegui *et al.*, 2010) y de los escasos ámbitos de acumulación de agua dulce que existen en ella, de gran importancia para la variedad ornitológica que se alimenta o reproduce en estos ecosistemas. En este tipo de cuencas litorales, con escasas pendientes y formaciones geológicas y edáficas de elevada erodibilidad, los valores de erosión de suelos se verán mucho más influidos por las fluctuaciones producidas en la capacidad erosiva de la lluvia, sobre todo cuando se trata de cuencas con usos intensivos y escasa capacidad de retención de suelos. Dado que la erosividad de la lluvia no es una variable que pueda ser controlada, se considera de gran interés comparar ésta con otras cuencas cercanas, de características físicas muy similares, que cuenten con usos del suelo más respetuosos y protectores

frente a la erosión, para determinar en qué medida otro tipo de coberturas daría lugar a un menor volumen de aportes de sedimentos a las marismas y de esa manera poder orientar las actuaciones futuras de la administración ambiental.

En la cuenca del río Trevélez se confirma que los usos más impactantes son los responsables de los valores de erosión más elevados localizados en las proximidades del tramo medio y bajo del valle. Desde este punto de vista es desaconsejable que se produzca una intensificación agrícola, sino que se debería promover más bien el aprovechamiento tradicional de las zonas forestales y de monte que no repercutan en un nuevo incremento de las tasas de erosión.

Es de destacar, por último, la dificultad para interpretar la variabilidad de los parámetros analizados a lo largo de ambas cuencas fluviales. Más allá de los datos de superficies totales afectadas por los distintos grados de erosión, Factor C o Factor R mostrados en cuadros, cada sector dentro de la cuenca ha evolucionado de manera distinta. El sentido de la evolución de dichos parámetros en cada uno de los sectores en los que se pudiera dividir dicha cuenca es difícil de detectar mediante un análisis cualitativo. Sería por tanto interesante desarrollar una metodología que permitiese poder comparar cuantitativamente dicha evolución, detectando tendencias positivas o negativas en los valores de cada uno de los parámetros para cada sector de la cuenca, en lugar de utilizar valores medios para toda su extensión.

8. Bibliografía

- Angulo-Martínez, M., & Begueria, S. (2009). Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: a comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology* 379, 111-121. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.09.051
- Borrelli, P.; Robinson, D.A.; Fleischer, L.R.; Lugato, E.; Ballabio, C.; Alewell, C.; Meusburger, K.; Modugno, S.; ... & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications* 8, 2013. doi: 10.1038/s41467-017-02142-7
- Borja, F.; Borja, C.; Fernández, M., & Lama, A. (2009). Dinámica hidromorfológica e impacto antrópico en la cuenca del arroyo del Partido (NW del Parque Nacional de Doñana, Huelva, España). Evaluación de procesos actuales. *Cuaternario y Geomorfología* 23 (3-4), 45-64. Recuperado de <https://recyt.fecyt.es/index.php/CUGEO/article/view/16934/10357>
- Calvache, M. F., Prados, M. J., & Lourenço, J. M. (2015). Assessment of National Parks affected by naturbanization processes in Southern Europe. *Journal of Environmental Planning and Management*, 59 (9), 1629-1655. doi: 10.1080/09640568.2015.1083416
- Cantarino-Martí, I. (2013). Elaboración y validación de un modelo jerárquico derivado de SIOSE. *Revista de Teledetección* 39, 5-21. Recuperado de http://www.aet.org.es/revistas/revista39/Numero39_01.pdf
- Castillo, A., Del-Valle, M., Rubio-Campos, J.C. & Fernández-Rubio, R. (1996). Síntesis hidrológica del macizo de Sierra Nevada (Granada y Almería). Actas de la 1ª Conferencia Internacional Sierra Nevada: Conservación y Desarrollo Sostenible (pp. 389-417). Recuperado de <https://proyectoaguas.es/download/Articulos/1996.a4.pdf>
- Cebecauer, T., & Hofierka, J. (2008) The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. *Geomorphology* 98, 87-198. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.12.035
- Colmenar, E. (2004) Proyecto Doñana 2005. Restauración del humedal más emblemático de Europa. *Ambienta* Enero, 22-27. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=998053&orden=0&info=link>
- De-Fries, R., Hansen, A., Turner, B. L., Reid, R., & Liu, J. (2007). Land use change around protected areas: management to balance human needs and ecological function. *Ecological Applications*, 17(4), 1031-1038. doi: 10.1890/05-1111
- Douglas, T., Critchley, D., & Park, G. (1996). The deintensification of terraced agricultural land near Trevelez, Sierra Nevada, Spain. *Global Ecology and Biogeography Letters* 5, 258-270. doi: 10.2307/2997794

- Durán, V.H., Rodríguez, C.R., Cuadros, S., & Francia, J.R. (2014). Impacto de la erosión y escorrentía en laderas de agrosistemas de montaña mediterránea. *Ecosistemas* 23(1), 66-72. doi: 10.7818/ECOS.2014.23-1.12
- Eiji-Maeda, E., Pellikka, P., Siljander, M., & Clark, B. (2010). Potential impacts of agricultural expansion and climate change on soil erosion in the Eastern Arc Mountains of Kenya. *Geomorphology* 123, 279-289. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.07.019
- Feng, X., Wang, Y., Chen, L., Fu, B., & Bai, G. (2010). Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology* 118, 239-248. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.01.004
- Fernández, M., Borja, F., & Borja, C. (2007). Análisis de la evolución de los usos del suelo en la cuenca del Partido durante las últimas décadas. En Mata et al: *La Geografía en la Frontera de los conocimientos*. UNIA, Sevilla. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/242755053>
- Fernández, M., & Prados, M-J (2010). Cambios en las coberturas y usos del suelo en la cuenca del río Guadalfeo. *GeoFocus* 10, 158-184. Recuperado de <http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/196/50>
- García-Novo, F., Escudero, J.C., Carotenuto, L., García, D., & Fernández, R.P. (2007). The restoration of El Partido stream watershed (Doñana Natural Park). A multiscale, interdisciplinary approach. *Ecological engineering*, 30, 122-130. doi: 10.1016/j.ecoleng.2006.09.003
- Gil-Jiménez, Y., Cáceres-Clavero, F., & Giménez-de-Azcárate-Fernández, F. (2012). «Perspectiva autonómica sobre la información de usos y coberturas del suelo». En *Conferencia ESRI España 2012*. Recuperado de <https://de.slideshare.net/ESRI/suelos-andalucia-fgazcarate4>
- Gómez-Zotano, J., Alcántara-Manzanares, J., Olmedo-Cobo, J.A., & Martínez-Ibarra, E. (2015). La sistematización del clima mediterráneo: identificación, clasificación y caracterización climática de Andalucía (España). *Revista de Geografía Norte Grande*, 61, 161-180. doi: 10.4067/S0718-34022015000200009
- Gutiérrez, A.G., Schnabel, S., & Contador, F.L. (2009). Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain. *Land Degradation & Development* 20, 535-550. doi: 10.1002/ldr.931
- Hanckock, G.R., Kidd, V., & Lowry J.B.C. (2017). Soil erosion predictions from a landscape evolution model – An assessment of a post-mining landform using spatial climate change analogues. *Science of the Total Environment* 601-602, 109-121. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.038
- Hewitt, R., Pera, F., & Escobar, F. (2016). Cambios recientes en la ocupación del suelo de los Parques Nacionales. *Cuadernos Geográficos* 55(2), 46-84. Recuperado de <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/3130/5136>
- IGME (1976). *Mapa geológico de España 1:50.000. Hoja 1001. Almonte*. IGME, Madrid. Recuperado de http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/jpgs/d10_G50/Editado_MAGNA50_1001.jpg
- Jiménez-Olivencia, Y., Porcel-Rodríguez, L., & Caballero-Calvo, A. (2015). Medio siglo en la evolución de los paisajes naturales y agrarios de Sierra Nevada (España). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 68, 205-232. doi: 10.21138/bage.1859
- Junta-de-Andalucía (2005). *Mapa morfoedáfico de Andalucía a escala 1:400.000*. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla. Recuperado de http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/mapwms/REDIAM_Suelos_Andalucia?
- Junta-de-Andalucía (2015). *Pasarela de SIOSE Andalucía 2011 Modelo Relacional a un Modelo Plano (Ocupación del Suelo)*. Red de Información Ambiental de Andalucía. SIOSE. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Recuperado de <https://tinyurl.com/yazx6gre>
- Junta-de-Andalucía (2018). *Mapa de seguimiento anual de la evolución e incidencia de la erosión del suelo en Andalucía* Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. Periodo 1992-2015. Recuperado de <https://goo.gl/viyFgA>
- Junta-de-Andalucía (2018). *Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (Andalucía) SIOSEA* Recuperado de <https://goo.gl/k6i3ym>
- Latocha, A., Szymanowski, M., Jeziorska, J., Stec, M., & Roszczewska, M. (2016). Effects of land abandonment and climate change on soil erosion. An example from depopulated agricultural lands in the Sudetes Mts., SW Poland. *Catena* 145, 128-141. doi: 10.1016/j.catena.2016.05.027
- Maetens, W., Vanmaercke, M., Poesen, J., Jankauskas, B., Jankauskiene, G., & Ionita, I. (2012). Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean: A meta-analysis of plot data. *Progress in Physical Geography* 36(5), 599-653. doi: 10.1177/0309133312451303

- Marker, M., Angeli, L., Bottai, L., Costantini, R., Ferrari, R., Innocenti, L., & Siciliano, G. (2008). Assessment of land degradation susceptibility by scenario analysis: A case study in Southern Tuscany, Italy. *Geomorphology* 93, 120-129. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.12.020
- Mintegui, J.A., Robredo, J.C., De-Gonzalo, C., & Huelin, P. (2010). Restoration of a degraded torrential stream by means of a flood control system: the case of Arroyo del Partido stream (Spain). *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 67, 213-223. doi: 10.2495/DEB100181
- Moreira-Madueño, J.M. (1991). *Capacidad de uso y erosión de suelos. Una aproximación a la evaluación de tierras en Andalucía*. Agencia de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla, España.
- Pacheco, E., Farguell, J., Úbeda, X., Outeiro, L., & Miguel, A. (2011). Runoff and sediment production in a mediterranean basin under two different land uses. *Cuaternario y Geomorfología* 25 (3-4), 103-114. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3844610&orden=333105&info=link>
- Puga, E., Díaz-de-Federico, A., & Nieto, J.M. (2002). Tectonostratigraphic subdivision and petrological characterisation of the deepest complexes of the Betic Zone: a review. *Geodinamica Acta*, 15, 23-43. doi: 10.1080/09853111.2002.10510737
- Puga, E., Díaz-de-Federico, A., Nieto, J.M., & Díaz-Puga, M.A. (2007). Petrología, evolución geodinámica y georrecursos del Espacio Natural de Sierra Nevada. *Estudios Geológicos*, 63(2), 19-40. doi: 10.3989/egol.07632199
- Ramos-Fuertes, A. (2012). *Hidrometeorología y balance térmico de la marisma de Doñana* (Tesis doctoral) Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/94797>
- Rodríguez-Lloveras, X., Buytaert, W., & Benito, G. (2016). Land use can offset climate change induced increases in erosion in Mediterranean watersheds. *Catena* 143, 244-255. doi: 10.1016/j.catena.2016.04.012
- Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Araújo, M.B., Carter, T.R., Dedoncker, N., Ewert, F., House, J.I., Kankaanpää, S., ... & Tuck, G. (2006). A coherent set of land use change scenarios for Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114(1), 57-68. doi: 10.1016/j.agee.2005.11.027
- Siljestrom, P., Clemente, L., & Rodríguez-Ramírez, A. (2002). Clima. En V. García-Canseco (ed): *Parque Nacional de Doñana*. (pp.43-56). Talavera de la Reina, España, Canseco Editores.
- Siljestrom, P., & Díaz-Paniagua (2015). Climatología del área de Doñana. En Díaz-Paniagua, C. (Coord): *El Sistema de Lagunas Temporales de Doñana, una red de hábitats acuáticos singulares*. (pp.45-48) España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10261/132159>
- Sun, W., Shao, Q., Liu, J., & Zhai, J. (2014). Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. *Catena* 121, 151-163. doi: 10.1016/j.catena.2014.05.009
- Úbeda, X., Reina, L., & Sala, M. (1998). Cuantificación de la erosión en un camino forestal de un bosque típico mediterráneo de *Quercus suber*. *Norba*, X, 185-196. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/109745.pdf>
- Verstraeten, G., & Prosser, I. (2008). Modelling the impact of land-use change and farm dam construction on hillslope sediment delivery to rivers at the regional scale. *Geomorphology* 98 (3-4), 199-212. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.12.026
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. USDA Handbook 537. Department of Agriculture, Washington D.C, U.S. Recuperado de <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>
- Xu, Y., Luo, D., & Peng, J. (2011). Land use change and soil erosion in the Maotiao River watershed of Guizhou Province. *Journal of Geographical Sciences* 21(6), 1138-1152. doi: 10.1007/s11442-011-0906-x
- Zare, M., Panagopoulos, T., & Loures, L. (2017). Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran *Land Use Policy* 67, 568-572. doi: 10.1016/j.landusepol.2017.06.028

Sobre las autoras

ÁNGELES BARRAL MUÑOZ

Profesora de la Universidad de Huelva, Doctora en Geografía y Máster en Conservación y Gestión del Medio Natural por la UNIA. Su investigación ha estado ligada al estudio de las interrelaciones entre el ser humano y el medio natural, abordándolas desde su perspectiva histórica o en su evolución actual. Enmarcadas en esta temática pueden mencionarse publicaciones como: "On the fringe: Tracking and evaluating changes in land use in the areas surrounding three National Parks in Spain and Portugal" Ed. Universidad de Varsovia (2015); "Protection of beach and dune systems of the western coast of Huelva. Developments in the planning and future prospect", Ed. Taylor & Francis Group (2009); Estudio Geoarqueológico de la ciudad de Sevilla. Ed. Servicio de Publicaciones Univ. Sevilla y Fundación Focus-Abengoa (2009). En la actualidad participa en el proyecto H2020 MSC RISE PEARLS (Planning and Engagement Arenas of Renewable Energy Landscapes) y en el proyecto español TERRYER (Sostenibilidad territorial del modelo de energía baja en carbono. Regiones y energías renovables).

MARÍA JOSÉ PRADOS VELASCO

Catedrática de la Universidad de Sevilla. Doctora en Geografía, Posgraduada en Ordenación Rural en el ITC de Holanda y Diplomada Técnica Urbanista por el I.A.P. en España. A lo largo de su carrera ha colaborado con la FAO, CONACYT, AECID y REA. En los últimos años, ha dirigido los proyectos de investigación en español NATURBA (Naturbanización y Preservación del Medio Ambiente) y NATURBOUNDS (Tierras en el borde: costes y beneficios de los procesos de Naturbanización), combinando estas responsabilidades con la participación en los Comités de Gestión Españoles de Costos de Agricultura Urbana en Europa (TD-1106 EAU) y Energía Renovable y Calidad del Paisaje (TU-1401 RELY). Actualmente está coordinando el proyecto H2020 MSC RISE Planning and Engagement Arenas of Renewable Energy Landscapes PEARLS y es investigadora principal del proyecto español TERRYER (Sostenibilidad territorial del modelo de energía baja en carbono. Regiones y energías renovables). También es cofundadora de redes de investigación y unidades como RESERP (Red Española de Energía Renovable y Paisaje) y EUSOCLAB (Laboratorio Europeo de Ciencias Sociales).

CLAUDIA HURTADO RODRÍGUEZ

Licenciada en Ciencias Ambientales por la Universidad Pablo de Olavide. Máster en Sistemas de Información Geográfica (Universidad de Sevilla, 2011) y Máster en Gestión del Territorio y Medioambiente (Universidad Pablo de Olavide, 2013). Actualmente se encuentra en la finalización de su Tesis Doctoral en la Universidad Pablo de Olavide. Durante su trayectoria como investigadora ha publicado varios artículos en revistas indexadas y participado en diversos proyectos relacionados con el patrimonio territorial y los sistemas metropolitanos. Sus líneas de investigación se centran en el desarrollo de metodologías para el análisis espacial de procesos urbanos y el análisis morfológico del crecimiento urbano a nivel metropolitano.