



Estimación de tasas de erosión históricas en dehesas utilizando raíces arbóreas expuestas y láser escáner terrestre

Estimation of historical soil erosion rates in dehesas using exposed tree roots and terrestrial laser scanner

Rubio-Delgado, J.⁽¹⁾; Schnabel, S.⁽¹⁾; Gómez-Gutiérrez, Á.⁽¹⁾; Berenguer, F.⁽²⁾

⁽¹⁾Grupo de Investigación GeoAmbiental, Universidad de Extremadura. Avda. de la Universidad s/n 10071, Cáceres, España. juditrd@unex.es

⁽²⁾Área de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universidad de Extremadura

Resumen

Estimar tasas de erosión del suelo a medio-largo plazo representa un desafío en áreas con un uso del suelo histórico. Se presenta un ensayo metodológico, basado en raíces expuestas, con el que se analiza la morfología de la base del tronco del árbol, sus raíces expuestas y la micro-topografía de la superficie circundante (utilizando un escáner láser terrestre). Se estudió una ladera representativa del ecosistema de dehesa en la provincia de Cáceres. Se determinaron las tasas de erosión para 132 encinas, diferenciando entre espacios abiertos y bajo copa. La estimación de la edad del arbolado resultó en una media de 130 años. Fuera de copa la tasas medias de erosión fueron de $21 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ y bajo la misma de $19,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Los resultados indican un incremento de las tasas de erosión después de la segunda mitad del siglo XVII, fecha a partir de la cual se intensifica el uso del suelo según evidencias históricas. El método propuesto es adecuado para determinar tasas de erosión hídrica y su variación temporal y espacial en áreas con cobertura arbórea dispersa, aunque es necesario verificar la técnica utilizada para determinar la superficie pretérita y la estimación de la edad del arbolado.

Palabras clave: erosión hídrica, raíces arbóreas expuestas, modelo digital de elevaciones, escáner láser terrestre, dehesas.



Abstract

Estimating medium term sheet erosion rates represents a challenge in areas with long land use history. In this work an adaptation of the tree root exposure method for the determination of erosion rates is presented. The methodology is based on analyzing the morphology of tree stems, exposed roots and micro-topography using a dense point cloud with spatial (x, y and z coordinates) and radiometric (RGB) information, obtained with a terrestrial laser scanner (TLS). The work was carried out at a hillside in a representative dehesa farm in the province of Cáceres. Soil erosion rates were determined for a total of 132 holm oaks, distinguishing between the losses below tree canopies and the open areas. The determined tree ages ranged between 49 and 336 years, with a mean of 130 years. The soil loss rates for the open spaces was $21,0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ and $19,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ for the areas below tree canopies. No significant differences were detected between hillslope positions (slope gradients) of the trees, their ages and soil erosion rates, i.e. no spatial pattern could be established. The estimated soil erosion rates suggest an increase of soil erosion since the second half of the 17th century, presumably related with an intensification of land use as described by historical sources. The proposed method is appropriate for determining sheet erosion rates and its temporal and spatial variation in areas with disperse tree cover, although more work is needed for verifying the technique used for determining the past soil surface and the tree age estimation.

Key words: sheet erosion, exposed tree roots, digital elevation model, terrestrial laser scanner, dehesas.

1. Introducción

La erosión acelerada del suelo es un problema medioambiental que afecta extensas superficies en el mundo (Pimentel, 2006), especialmente a áreas con una cubierta vegetal reducida y que incluyen superficies degradadas con cultivos tradicionales y pastizales (*rangelands*) (Lal, 1990). La degradación de los pastizales naturales es un fenómeno que tiene especial relevancia en las zonas secas del mundo, es decir en territorios con riesgo de sufrir desertificación (climas áridos, semiáridos y subhúmedos secos) (Oldeman *et al.*, 1991). En el trabajo de Oldeman *et al.* (1991) se señala que el sobrepastoreo es causante del 35% de la degradación mundial, si bien es cierto que el nivel de afectación en Europa es inferior (23%). La erosión del suelo es un problema que afecta a todos los países de Europa, siendo especialmente severa en la región mediterránea (Grimm *et al.*, 2002) con los procesos de erosión hídrica como protagonistas principales. El sobrepastoreo se cita como uno de los principales factores implicados en la erosión del Mediterráneo, no obstante, existen pocos estudios que ofrezcan tasas de

erosión en áreas de pastoreo para diversas cargas ganaderas, es decir que permitan relacionar ambas. Se han realizado multitud de trabajos en áreas mediterráneas con vegetación natural (especialmente matorrales con diverso grado de degradación), recogidos, por ejemplo en Kosmas *et al.* (1997), Solé Benet (2006) y Wainwright y Thornes (2004). Algunas de las zonas estudiadas son pastoreadas, pero el efecto del ganado no se cuantifica de forma explícita. Igualmente es escasa la información acerca de tasas de erosión históricas en estos ambientes y con uso ganadero.

Las dehesas del O y SO peninsular representan un área de pastoreo de gran importancia con una extensión de 90.000 km^2 en la Península Ibérica (Gea-Izquierdo *et al.*, 2006). Los sistemas adehesados presentan importantes similitudes con otros sistemas agrosilvopastoriles que existen en algunos países de la cuenca mediterránea (Papanastasis y Mansat, 1996). Desde el pasado e incluso en la época más reciente, los espacios adehesados han estado sujetos a importantes cambios de uso y manejo (Joffre *et al.*, 1988; Pinto-Correia, 1993). Por ejemplo, entre los años 50 y 70 del

pasado siglo tuvo lugar una intensificación de la agricultura y la proliferación de las repoblaciones forestales con especies alóctonas que resultaron en una apertura de claros en la cubierta de grandes superficies (Elena *et al.*, 1987). Durante las últimas décadas se han puesto de manifiesto dos procesos que han ocasionado importantes modificaciones en la cubierta vegetal: el incremento en la carga ganadera debido a las subvenciones de la Unión Europea (Donázar *et al.*, 1997) y el abandono de la explotación de tierras (Lavado Contador *et al.*, 2004).

En el ecosistema de dehesa, los dos procesos erosivos más destacados son la erosión laminar y el acaravamiento, limitándose la reguerezación a las vertientes de áreas labradas. La erosión laminar es el fenómeno que se desarrolla preferentemente en las vertientes, mientras que las cárcavas se encuentran especialmente en los fondos de vaguada (Schnabel, 1997). Por otro lado, Gómez-Gutiérrez *et al.* (2009) mostraron una relación entre la erosión en cárcava y los cambios de uso del suelo en una dehesa de la provincia de Cáceres.

Los suelos de las dehesas son en su mayoría poco profundos, existiendo grandes extensiones con Leptosoles (Schnabel *et al.*, 2013). La extrema delgadez de los suelos en laderas con poca pendiente y con precipitaciones entre 500-600 mm, indican una erosión acelerada de los mismos (Schnabel *et al.*, 2013). Por otro lado, estudios realizados en una cuenca experimental con suelos poco profundos sobre pizarras ofrecen tasas de erosión laminar relativamente bajas, con $0,63 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ (Schnabel *et al.*, 2010). Es decir, las tasas actuales no justifican la delgadez de estos suelos, indicando, por tanto, tasas de erosión más elevadas en el pasado.

La existencia de árboles con raíces expuestas en las zonas adehesadas es un hecho observado en muchas fincas y ofrece la posibilidad de utilizar estas evidencias para estimar tasas de erosión hídrica históricas en dichos ambientes. Los primeros trabajos en los que se aplicaron las raíces expuestas al estudio de la

erosión hídrica se desarrollaron en Estados Unidos por Eardley y Viavant (1967) y LaMarche (1968). Entre los trabajos tempranos cabe destacar Dunne *et al.* (1978) y Carrara y Carroll (1979). Posteriormente, Shroder (1980) publicó una revisión sobre técnicas dendrogeomorfológicas, aunque no consideró erosión hídrica en laderas.

Más tarde, varios autores han aplicado esta técnica a los estudios de erosión del suelo (Schnabel, 1994; McAuliffe *et al.*, 2006), incluyendo también arbustos o cultivos como especies indicadoras (Chartier *et al.*, 2009; Casali *et al.*, 2009; Vanwallegem *et al.*, 2011). Una notable ventaja de esta metodología consiste en que ofrece una tasa media de erosión para un periodo de tiempo largo, un aspecto importante, si se considera la elevada variabilidad temporal de la erosión del suelo en el Mediterráneo (González-Hidalgo *et al.*, 2007). Otros trabajos analizan de forma específica el momento en el que las raíces quedaron expuestas, a partir de los cambios en la anatomía de las mismas (Gärtner *et al.* 2001; Bodoque *et al.*, 2005; Corona *et al.*, 2011; López Saez *et al.*, 2011; Ballesteros-Cánovas *et al.* 2013).

Cabe destacar las revisiones recientes de las técnicas dendrogeomorfológicas para el estudio de la erosión del suelo realizadas por Gärtner (2007) y Stoffel *et al.* (2013) en las que destacan sus posibilidades, pero también ponen de manifiesto algunos problemas metodológicos. Por otro lado, Gärtner *et al.* (2009) resaltaron el potencial de utilizar equipos de láser escáner terrestres para generar modelos 3D de plantas en los estudios forestales y Bodoque *et al.* (2012) mostraron la necesidad de realizar mediciones de gran detalle en torno a la raíz expuesta para evitar errores en la estimación de las tasas de erosión, pero no se tiene constancia de la utilización de ésta técnica para la estimación de tasas de erosión empleando evidencias como raíces expuestas.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente expuesto, este trabajo plantea como objetivo principal analizar la aplicabilidad de las técnicas dendrogeomorfológicas para la estima-

ción de tasas de erosión hídrica en ambientes adherados. Adicionalmente, se plantean como objetivos secundarios el análisis de la variabilidad espacial de dichas tasas a lo largo de la vertiente, en espacios bajo y fuera de la copa de los árboles y el análisis de la dinámica temporal de las tasas.

2. Área de estudio

El trabajo se desarrolló en una ladera representativa del ecosistema adherado con evidencias de erosión hídrica, es decir con exposición de raíces de los árboles, localizada en una finca privada al Este de la provincia de Cáceres (figura 1). La selección del área de estudio se basó en la investigación previa llevada a cabo en 54 fincas en Extremadura (Schnabel *et al.*, 2006). La explotación presenta una extensión de 435 ha con una altitud media de 523 msnm.

La precipitación media anual es de 646 mm y la temperatura media es de 16°C. El área de estudio forma parte de una extensa su-

perficie de erosión (Gómez Amelia, 1982), desarrollada en pizarras y grauvacas de edad precámbrica (Monteserín y Pérez, 1988). La ladera seleccionada tiene una superficie de 4,41 ha y una pendiente media del 10,7%. En ella, la vegetación está compuesta por un arbolado disperso de encinas (*Quercus ilex*) y un estrato herbáceo dominado por especies terófitas. La densidad de arbolado del conjunto de la ladera es de 38,3 pies·ha⁻¹ (según estimación sobre ortofotografía de 2009, con un tamaño de píxel de 0,625 m), habiéndose mantenido desde el año 1956 (39,9 pies·ha⁻¹), valores acordes a la media proporcionada por el MAPA (2008) para dehesas, que oscila entre los 30-40 pies·ha⁻¹. El suelo es poco profundo (no supera los 25 cm) y con un espesor muy variable, observándose afloramientos de pizarras en algunos puntos de la ladera. Respecto a su estructura vertical, consta de un horizonte Ah de 3 cm, aproximadamente, así como un horizonte Bw poco desarrollado. Su textura es franco-arenosa y, tanto la capacidad de intercambio catiónico, como el pH, presentan valores bajos, provocando que la satura-

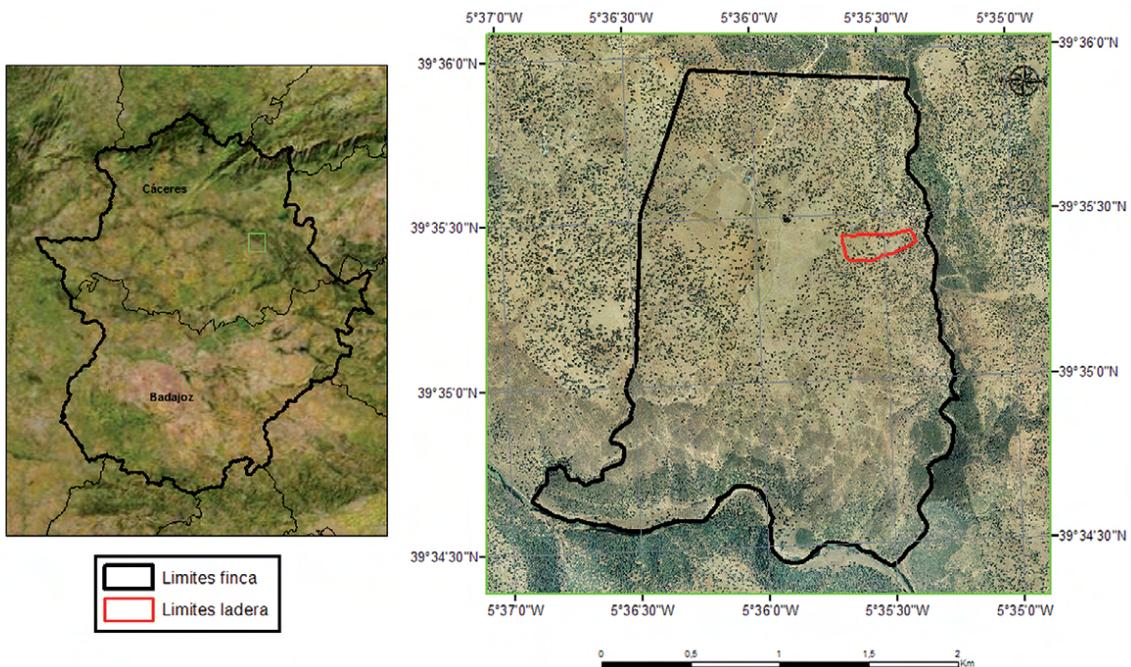


Figura 1: Localización del área de estudio. Se muestra la ladera seleccionada en la finca piloto.
 Figure 1: Location of the study area. The selected hillside in the pilot farm is shown.

ción de bases sea inferior al 50%, lo que se relaciona, además, con el bajo contenido en arcillas y materia orgánica.

El uso del suelo dominante en la finca actualmente es el ganadero, siendo de menor importancia el aprovechamiento forestal a través de la poda de encinas. A lo largo de la historia, especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XX, se han registrado importantes cambios en la actividad agrícola y ganadera de la explotación. Así, la superficie cultivada ha descendido paulatinamente desde la década de los años 50, pasando del 100% de la superficie a menos del 2% en la actualidad. En cambio, la actividad ganadera se ha intensificado, pasando de 665 cabezas de ganado en 1945 a 1840 en 2012, siendo el ganado ovino el que ha experimentado un mayor aumento. Se sabe, a partir de fotografías aéreas, que la ladera objeto de estudio se cultivaba en 1945. Dicha actividad se abandonó en la década de los 60 y la superficie se destinó al aprovechamiento ganadero exclusivamente.

3. Metodología

La determinación de las tasas históricas de erosión hídrica se llevó a cabo mediante una técnica no invasiva que se basa en el cálculo del volumen de suelo erosionado entre dos superficies (la superficie actual o S_a y la superficie pretérita o S_p) para un período de tiempo definido por la edad de los árboles localizados en la vertiente. Por lo tanto, la escala temporal del trabajo viene definida por la edad estimada para los individuos más viejos. En los siguientes apartados se explica la obtención de S_a , S_p y la estimación de la edad del arbolado. A partir de estos tres parámetros es posible estimar las tasas de erosión hídrica en la vertiente del área de estudio.

3.1. Registro de la topografía de la vertiente

Para el registro de la topografía se utilizó un escáner láser terrestre (Leica Scanstation C10), que fue estacionado en 9 localizaciones, tratando de minimizar los posibles ocul-

tamientos provocados por el arbolado, ya que el láser devuelve las coordenadas y señales de la primera superficie sobre la que incide. Este equipo permite obtener nubes de puntos con coordenadas X, Y, Z y valores de color (RGB). Las nubes de puntos obtenidas en cada estacionamiento fueron posteriormente enlazadas en una única nube, utilizando puntos homólogos definidos por dianas y mediante el software Cyclone (<http://hds.leica-geosystems.com>). A este proceso se le conoce como registro y arrojó errores en el enlace de las tomas entre 0,002 m y 0,010 m. Como resultado de este proceso se obtuvo una única nube de puntos para toda la vertiente objeto de estudio, cuyas características se recogen en la tabla 1. Sobre esta nube de puntos se ha trabajado en dos escalas: a escala de ladera, llevando a cabo una caracterización de su topografía; y a escala de individuo, estimando el volumen de suelo erosionado en el área de influencia de la copa de cada árbol (figura 2).

Sobre la nube de puntos se llevó a cabo una depuración para eliminar diferentes errores (haces verticales, cobertura herbácea y animales). Seguidamente, y con el objetivo de caracterizar desde el punto de vista topográfico el área de estudio, se elaboró un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de toda la vertiente, con un tamaño de píxel de 1 m. La elaboración del MDE se basó en superponer a la zona de estudio una malla con paso de 1 m y seleccionar dentro de cada retícula el punto con menor coordenada Z. Así, y teniendo en cuenta el número de puntos y la densidad de la nube (tabla 1), puede asumirse que el punto seleccionado se encuentra en la superficie del suelo. A partir de este MDE se calculó un Modelo Digital de Pendientes (MDP) utilizando el método de Horn (1981). En el desarrollo de estos procedimientos se utilizó el Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.0.

3.2. Estimación de las tasas históricas de erosión hídrica

Como se ha mencionado anteriormente, sobre la nube de puntos global se llevó a cabo una individualización de cada árbol y su área

Número de puntos	91.007.950
Información contenida en los puntos	Coordenadas xyz*, valores de reflectividad y color (RGB)
Espaciado medio entre puntos	0,06 m
Densidad media de puntos	297,38 puntos·m ⁻²

Tabla 1: Propiedades de la nube de puntos (*el sistema de coordenadas es relativo, para evitar pérdidas de precisión en la transformación de los datos).

Table 1: Cloud point properties (*the coordinate system is relative, to avoid loss of precision in data transformation).

de influencia. Esta última consta de la proyección de la copa del árbol sobre el suelo y una aureola de 1,5 m alrededor de la misma (figura 2). Para cada individuo se elaboró un MDE bajo el área de influencia que incluye las raíces expuestas y la base del tronco. El límite vertical de estos modelos de superficie se localizó en el punto de inflexión (P_i), punto a partir del cual se considera que el tronco pasa a ser raíz. El MDE se elaboró superponiendo a cada árbol una malla de 0,05 m de paso y seleccionando el valor de Z del punto con coordenada Z mínima. Este modelo digital de superficie definirá, lo que anteriormente hemos denominado S_a .

Para la definición de la S_p resulta necesario

desplazar el P_i hasta su posición en el momento del nacimiento del árbol aplicando una corrección, ya que este punto experimenta un desplazamiento vertical con el paso del tiempo, debido al crecimiento secundario del árbol, que va añadiendo sucesivas capas de madera anual (figura 2). Posteriormente, se genera un plano inclinado con la pendiente media de la S_a y se desplaza en cota hasta la posición del P_i corregido. Es decir, se obtiene una superficie con una inclinación similar a la actual y que pasa por la cota del P_i en el momento del nacimiento del árbol, que se asume como S_p .

La corrección de la posición en cota del P_i se desarrolló a partir de la geometría de la base del tronco del árbol (ecuación 1).

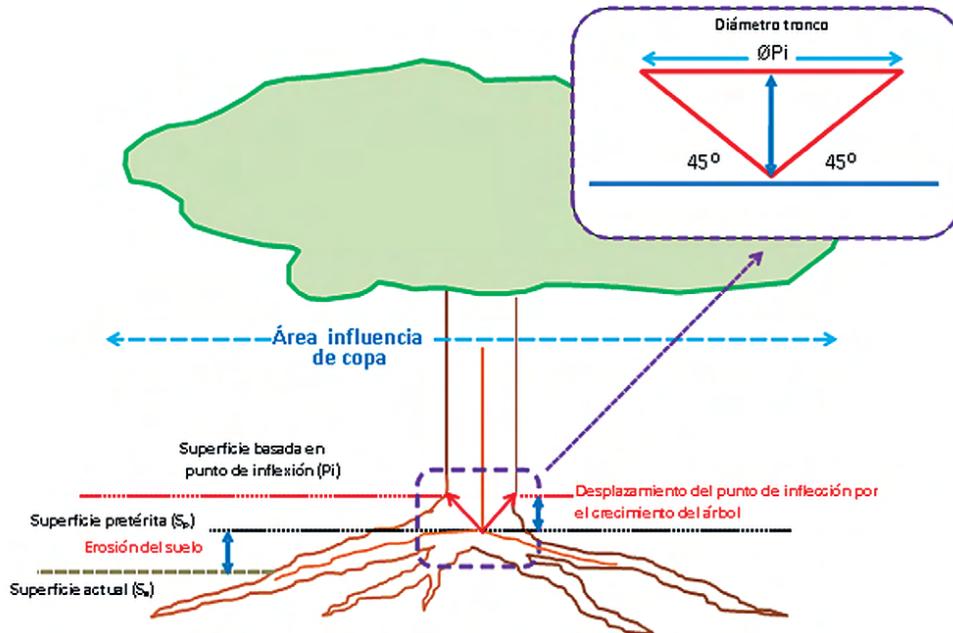


Figura 2: Representación gráfica de la metodología para estimar tasas de erosión y del desplazamiento del punto de inflexión.

Figure 2: Graphical representation of the methodology to estimate erosion rates and the inflection point displacement.

Ecuación 1. Corrección de P_i

$$\text{Corrección de } P_i = ZP_i - \left[\left(\frac{\emptyset P_i}{2} \right) \cdot \cos 45^\circ \right]$$

donde ZP_i es la altura de P_i y $\emptyset P_i$ es el diámetro del tronco a la altura de P_i (figura 2). Tradicionalmente, el desplazamiento del P_i en el eje vertical, debido a la adición anual de capas de madera, ha imposibilitado su utilización en los estudios de erosión del suelo, ya que cada individuo, en función de su edad, presentará un mayor o menor desplazamiento de P_i . Incluso la propia raíz del árbol ocasiona una elevación del terreno cercano a la misma si ésta se encuentra parcialmente expuesta, y por lo tanto, se estarían sobreestimando las tasas de erosión calculadas a partir de técnicas dendrogeomorfológicas (Gärtner, 2007; Bodoque *et al.*, 2011).

El volumen final de suelo erosionado bajo la copa de cada árbol se obtuvo mediante la sustracción de S_p y S_a . Para las zonas fuera de la influencia de la copa se emplearon dos localizaciones en las que se estimó la superficie rebajada. En primer lugar, bajo la copa de cada árbol, se determinó la dirección de la máxima pendiente que pasa a través del tronco del mismo y se trazó una perpendicular a ésta. Sobre dicha perpendicular, se seleccionaron dos puntos situados a 1,5 m de los extremos de la proyección de la copa sobre la superficie. Estimando la diferencia de altura entre S_p y S_a en estos puntos y calculando la media aritmética entre ambos valores se estimó el rebajamiento de la superficie.

A partir de la nube de puntos se llevó a cabo la delimitación del área de influencia de la copa de cada árbol, es decir, su proyección sobre la superficie y la medición del diámetro del tronco a una altura de 1,30 m (DBH; del inglés Diameter Breast Height). Este último parámetro será empleado en la estimación de la edad de cada árbol. El cálculo se llevó a cabo a partir del modelo de Montero *et al.* (2008), elaborado para encinas en condiciones ambientales similares a las del área de estudio, y que correlaciona DBH con la edad

del árbol (E_a) (ecuación 2), con un coeficiente de correlación R^2 de 0,92 para una muestra de 278 árboles.

Ecuación 2. Relación DBH-edad de *Quercus ilex* L.

$$E_a = \frac{L_n \left(1 - \frac{DBH}{98,73} \right)}{-0,00546}$$

Con las edades obtenidas se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) con el programa SPSS, para comprobar si existen diferencias estadísticas significativas en la distribución de la edad del arbolado a lo largo de la vertiente.

Toda esta información fue almacenada en una base de datos e incorporada a un SIG que además contenía otras capas con información espacial que posteriormente facilitaron el análisis de los datos (ortofotografías de alta resolución y cartografía de manejo y usos).

Una vez obtenidos los volúmenes de material erosionado para cada árbol y para los espacios abiertos cercanos a cada árbol y estimadas las edades de cada individuo, se procedió al cálculo de las tasas de erosión. Para ello se utilizó la ecuación 3. El resultado se expresa en $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$ (rebajamiento medio de la superficie) o bien en $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ (peso medio de material perdido anualmente), considerando la densidad aparente media de los suelos del área de estudio de $1,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. La densidad media se calculó a partir de 22 muestras obtenidas con anillos de 100 cm^3 en profundidades de 0-5 cm y de 5-10 cm (Coile, 1936).

Ecuación 3. Estimación de tasas de erosión.

$$T_{eo} = \frac{(S_{po} - S_{ao})}{E_a} = \frac{V_{eo}}{E_a}$$

$$T_{ec} = \frac{(S_{pc} - S_{ac})}{E_a} = \frac{V_{ec}}{E_a}$$

donde T_{eo} : tasa de erosión en espacios abiertos; T_{ec} : tasa de erosión en espacios cubiertos por las copas de los árboles; S_{po} : superficie pretérita en espacios abiertos; S_{ao} : superficie actual en espacios abiertos; S_{pc} : superficie pretérita en espacios cubiertos; S_{ac} : superficie actual en espacios cubiertos; E_a : edad del árbol; V_{eo} : volumen de suelo erosionado en espacios abiertos; V_{ec} : volumen de suelo erosionado en espacios cubiertos.

4. Resultados y discusión

4.1. Características topográficas de la vertiente

Las figuras 3a y 3b muestran: el modelo digital de elevaciones (MDE) y el modelo digital de pendientes (MDP) de la ladera objeto de estudio. Con una extensión de 4,44 ha y una longitud de 343 m tiene un desnivel de 29,8 m, lo que equivale a una pendiente del 10,7%. En la ladera se pueden diferenciar tres áreas (figu-

ra 3b) cuyas características se presentan en la tabla 2: un área culminante (A) de relieve suave, con una pendiente media del 3,4%, otra de pendiente más marcada (B) con 10,8%; y un tercer área (C), que presenta la mayor pendiente media, 16,7%. En las áreas B y C se observan algunos afloramientos de pizarras. Asimismo, las áreas definidas de la ladera muestran un aumento de la variación de sus pendientes desde la parte alta hacia la parte baja, indicando un aumento de la heterogeneidad ladera abajo. La vertiente presenta una orientación E-SE. La figura 3 muestra que dos zonas de la ladera presentan concavidad horizontal (perpendicular a la máxima pendiente) y delimitan una zona central cóncava.

4.2. Características del arbolado: edad y distribución

La densidad del arbolado a lo largo de la ladera resultó homogénea, aunque con peque-

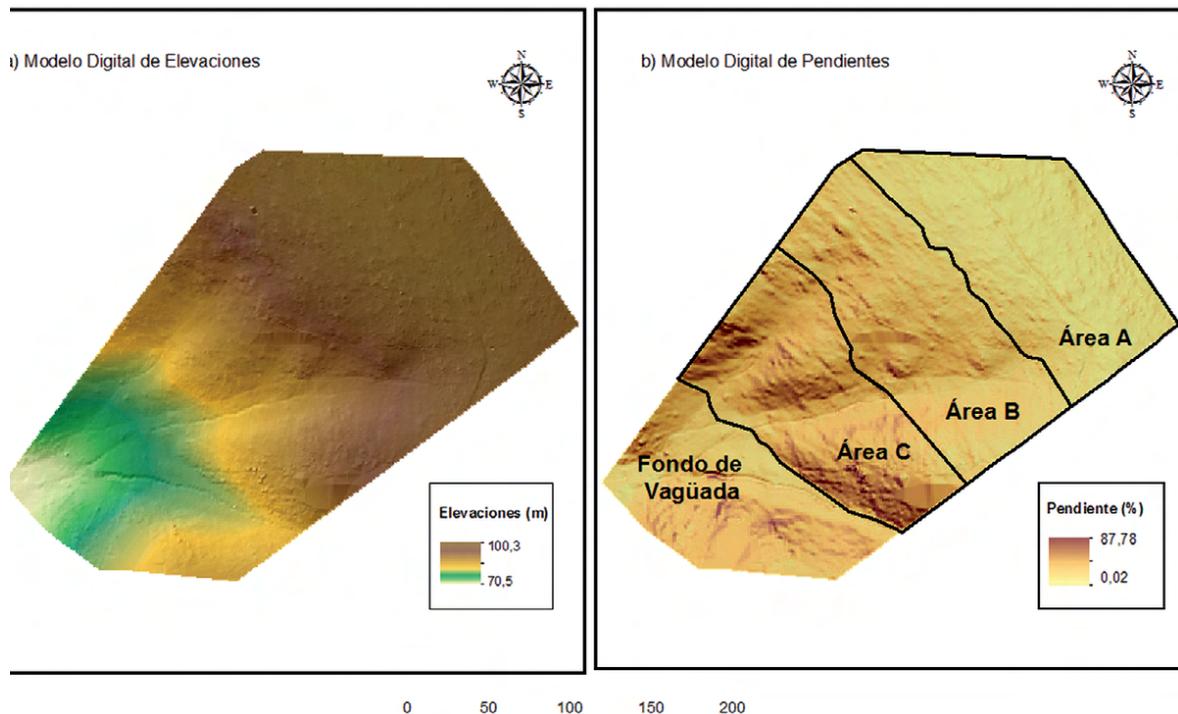


Figura 3: a) MDEs de la vertiente y b) MDPs de la vertiente. Sobre ambos modelos se aplicó una transparencia del 30% y se utilizó un modelo digital de sombras como base para mejorar la visualización del relieve.

Figure 3: a) Hillside Digital Elevation Model and b) hillside Digital Slope Model. A transparency of 30% was applied to these layers and a hillshade digital model was used as base in order to improve visualization of relief.

ñas diferencias (tabla 3). Del total de 169 árboles se descartaron 37 debido a problemas de ocultamiento en la nube de puntos o individuos inservibles por diversas causas (p.e. malformaciones del tronco), quedando 132 árboles para los posteriores análisis. Las edades de estos individuos oscilaron entre 49 y 336 años, siendo la edad media de 130 años, con una desviación estándar de ± 50 años (tabla 3). La figura 4 muestra un histograma de frecuencias de la edad del arbolado en función de las áreas de la vertiente previamente delimitadas. A partir de este gráfico se deducen varios intervalos de edades: árboles con menos de 50 años, árboles de entre 51 y 200 años y árboles con edades comprendidas entre 201 y 350 años. El primer intervalo de edad tan solo está representado por un árbol. El intervalo con edades comprendidas entre 51 y 200 años es el que tiene una mayor representatividad (90,2% del total), dentro del cual destacan los individuos con una

edad comprendida entre los 100 y 150 años (42,9%). Este intervalo se completa con un 30,3% de edades comprendidas entre 51 y 100 años y un 21,9% entre 151 y 200 años. El 9,1% restante son árboles con edades de 201 a 350 años. Los árboles que representan el primer intervalo de edades se considerarán como árboles jóvenes, a los del segundo como árboles adultos y a los del tercero como árboles viejos.

Respecto a la distribución espacial de los árboles en las áreas de la ladera, previamente definidas, se constató que en A existe un mayor porcentaje de árboles adultos respecto a B y C, mientras que en el área C los árboles son más viejos que en A y en B. Los resultados del análisis ANOVA fueron estadísticamente significativos ($F = 6,501$; grados de libertad = 131; p -valor = 0,02), siendo la edad media de A y B muy similares: $123,1 \pm 45,4$ y $122,6 \pm 50,4$, respectivamente (p -valor = 0,999). En

	Área A	Área B	Área C	Total/Media
Superficie (m ²)	15.123	15.361	13.695	44.179
Pendiente media (%)	3,40	10,80	16,70	10,70
Pendiente máxima (%)	17,60	35,30	87,90	87,90
Pendiente mínima (%)	0,03	0,70	2,50	0,03
Desviación estándar de la pendiente (%)	2,30	3,80	5,50	6,50
Mediana de la pendiente (%)	2,80	10,30	15,80	9,70
Percentil 10%	1,20	6,40	10,80	1,90
Percentil 90%	6,60	15,80	23,60	18,30

Tabla 2: Características de la ladera por áreas.
Table 2: Characteristics of the hillside areas.

Áreas	Nº de individuos	Densidad arbolado (pies·ha ⁻¹)	Nº de ind. estudiados	Edad ind. estudiados (años)	Des. est. ind. estudiados (años)
A	52	34,4	51	123,0	45,4
B	70	45,6	57	122,6	50,4
C	47	34,3	24	161,8	46,7
Total/Media	169	38,3	132	129,8	50,0

Tabla 3: Número y densidad de encinas en cada una de las áreas de ladera, y edades medias y desviación estándar de los árboles utilizados en el estudio.

Table 3: Tree number and density of each hillside area and mean ages and standard deviation of the trees used in this study.

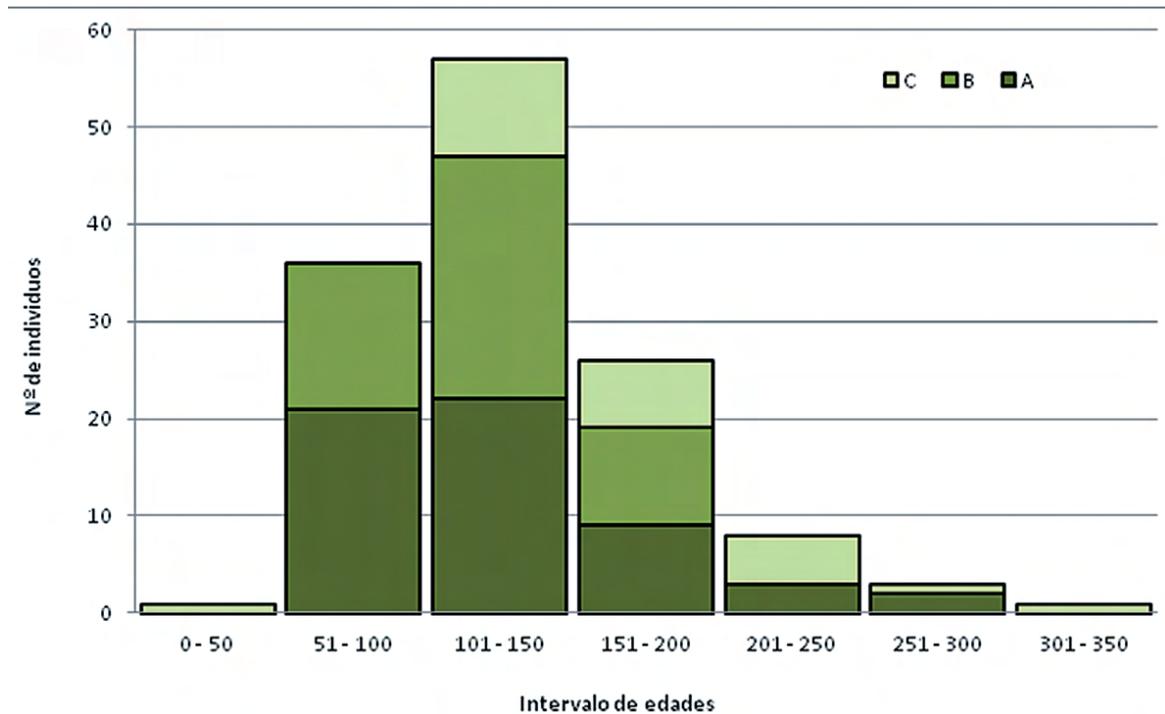


Figura 4: Distribución de frecuencia de edades del arbolado en las áreas de ladera A, B y C.
 Figure 4: Frequency distribution of tree ages in slope segments A, B and C.

cambio, las edades del área C son significativamente mayores que A y B (p -valor = 0,03 en ambos casos), con una media de $161,8 \pm 46,7$ años.

La escasez de arbolado joven se relaciona con la falta de regeneración, cuya principal causa suele ser el sobrepastoreo. Concretamente, durante las últimas décadas, la actividad ganadera en la finca se ha intensificado, pasando de $0,29 \text{ UGM}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 1945 a $1,57 \text{ UGM}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2012. Son numerosos los autores que han apuntado esta tendencia (Lavado Contador *et al.*, 2004; Plieninger, 2006; Plieninger y Harald, 2006), aunque en la regeneración del arbolado también han influido otros factores como el arado durante los años de posguerra. A día de hoy, la pérdida de calidad del suelo (Pulido y Picardo, 2010), y de forma específica, la erosión del mismo, unido a algunas prácticas agrícolas como la roza o descuaje, podrían estar influyendo de forma negativa al desarrollo y consolidación de nuevos árboles (Plieninger y Schaich, 2006).

4.3. Tasas de erosión hídrica

La erosión media en las áreas bajo copa se estimó en $19,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, lo que significaría un rebajamiento medio de la superficie de $1,47 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$. En los espacios abiertos, se obtuvo una tasa superior que ascendió a $21,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ($1,67 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$). Las tasas estimadas bajo copa presentaron una mayor variabilidad con valores máximos de $7,04 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$, si bien el 80% de la muestra presentó valores entre $0,36 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ y $2,83 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ (tabla 4). Los valores estimados para los puntos fuera de copa mostraron una menor variabilidad, con tasas mínima y máxima de $0,15$ y $6,35 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$, y con el 80% de los valores entre $0,53$ a $3,00 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$.

Atendiendo a la zonificación de la ladera realizada en base a la pendiente (tabla 2), A, B y C presentaron valores bajo copa de $19,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, $21,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ y $16,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente. De acuerdo con los resultados del análisis ANOVA, las

Periodo	Años	Mediana	Mínimo	Máximo	Per. 10%	Per. 90%	Desviación Estándar
<i>Bajo copa</i>							
I	1676-2012	0,69	0,00	1,50	0,14	1,17	0,42
II	1836-2012	1,31	0,03	3,07	0,36	2,37	0,75
III	1912-2012	2,11	0,00	7,04	0,58	3,3	1,29
Total muestra		1,30	0,00	7,04	0,36	2,83	1,02
<i>Espacios abiertos</i>							
I	1676-2012	0,93	0,22	3,11	0,60	1,83	0,66
II	1836-2012	1,42	0,15	3,72	0,43	2,85	0,87
III	1912-2012	2,26	0,25	6,35	0,59	3,84	1,37
Total muestra		1,43	0,15	6,35	0,53	3,00	1,08

Tabla 4: Datos estadísticos descriptivos de las tasas de erosión del suelo ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$) bajo copa y en espacios abiertos, agrupados por períodos.

Table 4: Descriptive statistical data of the of soil erosion rates ($\text{mm}\cdot\text{year}^{-1}$) below tree canopy and in the open spaces, grouped by periods.

diferencias entre las tasas de erosión de las distintas áreas no son estadísticamente significativas. No obstante, existen diferencias, siendo mayores entre C, con el valor medio más bajo, y las otras dos áreas. Aunque pueda sorprender que la parte de la ladera de mayor pendiente no ofrezca las mayores tasas de erosión, la explicación se fundamenta en la diferencia de la edad entre los árboles, siendo significativamente mayor en C que en el resto de la ladera. No obstante un estudio más detallado de la microtopografía podría ayudar a explicar éstas diferencias.

La tasa de erosión media para los espacios abiertos estimada aquí ($21,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$), resultó superior a los valores presentados para zonas adhesionadas por otros autores. Por ejemplo, Schnabel *et al.* (2010) aportaron una tasa de erosión laminar media en laderas de $1,3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en la cuenca experimental Guadalperalón. No obstante, esta área se caracterizaba por una mayor cobertura vegetal y una carga ganadera inferior, además de un período de medición distinto (7 años). Recordemos que las tasas estimadas aquí representan los valores medios para el período determinado por la edad del arbolado (49-336 años) y que se corresponde con condiciones de uso y explotación cambiantes.

Detrás de estas importantes diferencias también debemos resaltar que la finca en la que se desarrolla este trabajo ha sido previamente diagnosticada como zona crítica y sensible frente a los procesos de degradación (Lavado Contador *et al.*, 2010).

Existen diversos factores que pueden justificar las diferencias constatadas en las tasas de erosión bajo y fuera de copa. En primer lugar, la copa del árbol intercepta una importante cantidad de precipitación, en torno al 27% (Mateos y Schnabel, 2002), reduciendo por tanto la cantidad de precipitación incidente. De forma adicional, la hojarasca que produce el árbol ejerce cierta protección frente al impacto de las gotas de agua e incrementa el contenido de materia orgánica del suelo, favoreciendo la infiltración (Morgan, 1986). También debemos señalar que la protección que ejerce la copa frente a la insolación directa favorece la existencia de una cubierta de herbáceas durante más tiempo que en los espacios abiertos. Menores tasas de erosión en áreas bajo influencia de las copas de encinas también fueron reportadas por Schnabel (1997), siendo las diferencias incluso mayores.

Tal y como se mencionó con anterioridad, la escala temporal de este trabajo se encuen-

tra determinada por la edad máxima de los individuos analizados, en este caso 336 años, suponiendo un intervalo de estudio de 1676 a 2012. La estimación de la edad de los árboles permitió realizar un análisis gráfico de la evolución de las tasas de erosión para dicho período (figura 5). De este gráfico se desprende un incremento en las tasas de erosión. La dispersión es elevada, lo que indica una elevada variación espacial de la erosión hídrica en la ladera, debido probablemente a la microtopografía, diferencias en la morfología de las copas o también podría estar relacionada con errores de medición (edad del árbol).

La figura 5 muestra como se producen incrementos notables en las tasas medias de erosión en torno a 1836 y 1912, lo que permite diferenciar tres tasas distintas (tabla 4): la primera, de 1676 a 2012, con una tasa de $0,70 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$; la segunda, de 1837 a 2012 con una más elevada de $1,35 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$; y por úl-

timo, para los últimos 100 años (1913-2012) se estimó un valor de $2,11 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$, marcando un incremento significativo con respecto al anterior periodo y bastante más elevadas que la tasa media de erosión calculada para todo el periodo ($1,5 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$). Pero las tasas medias de erosión varían notablemente si solamente se consideran los valores de pérdidas de suelo durante los años comprendidos en cada periodo, es decir P1 (1676-1836), P2 (1836-1912) y P3 (1912-2012), ya que existe un factor acumulativo por el que en P1 se incluyen las pérdidas producidas durante P2 y P3, y en P2 se incluyen las de P3. Las tasas calculadas de esta forma presentan los siguientes valores: $P3=2,17 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$, $P2=0,44$ y $P1=0,00$. Estos resultados indican una tasa de erosión natural para los años anteriores a 1836, mientras que la erosión durante los últimos 100 años casi quintuplica la de los 76 anteriores, indicando un incremento importante de las mismas.

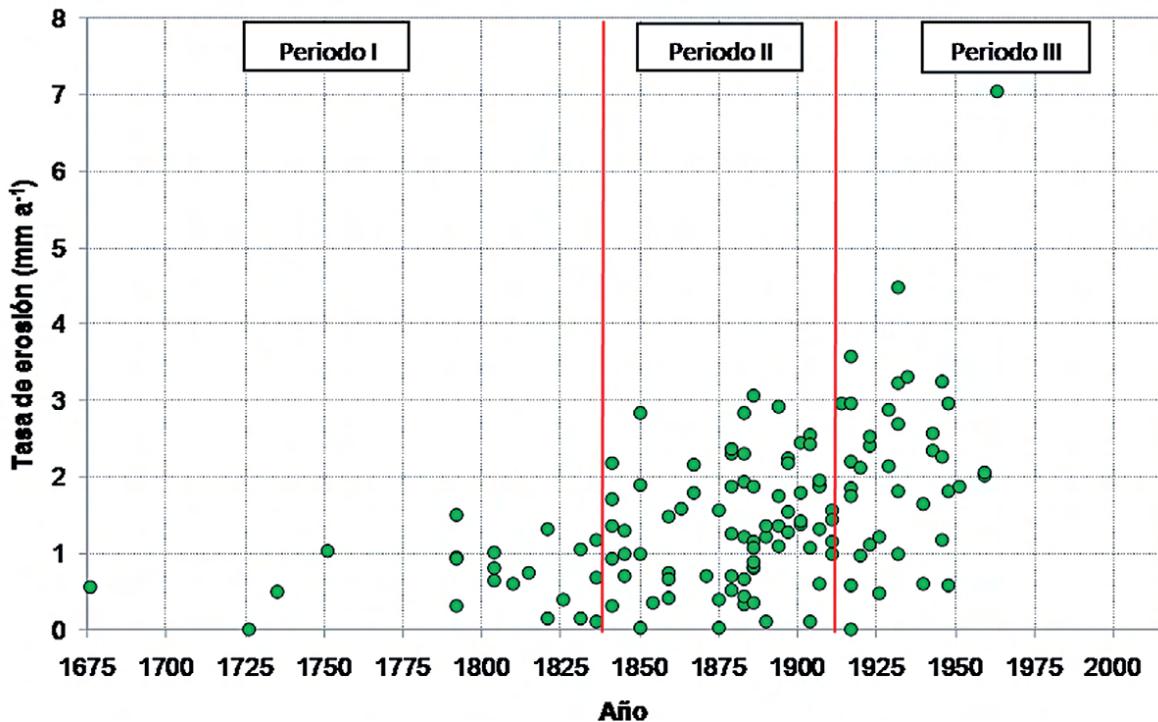


Figura 5: Relación entre tasas de erosión bajo copa y la edad estimada del arbolado. Las líneas rojas representan las tasas de erosión estimadas correspondientes a los periodos: P1(1675-1836), P2 (1836-1912) y P3 (1912-2012).

Figure 5: Relationship between erosion rates in tree covered areas and the estimated age of the trees. The red line represents the estimated erosion rate corresponding to the periods: P1(1675-1836), P2 (1836-1912) and P3 (1912-2012).

Los sistemas adeshados del SO peninsular presentan una larga historia de usos y aprovechamientos del suelo en la que pueden documentarse hechos y procesos que probablemente tienen una relación directa con la evolución de las tasas de erosión estimadas en este trabajo. Así, el incremento en las tasas de erosión en los años siguientes a 1836 y 1912, que se desprende de los datos estimados y del análisis de la figura 5, podría responder a un aumento de deforestaciones y roturas para expandir la superficie de cultivo en las explotaciones adeshadas (Llopis y Zapata, 2001; Linares y Zapata, 2001; García y Sánchez, 1984).

Hay que resaltar aquí que la tasa media de erosión estimada para el último período (1913-2012) se basa en mediciones realizadas en árboles con edades ≥ 49 años, debido a que en el área de estudio no existen árboles con edades inferiores. Esta tasa refleja la media de erosión durante los últimos 100 años, pero desconocemos la tendencia para los últimos 50 años.

El tercer periodo se caracteriza por altas tasas de erosión, pero la escasez de árboles jóvenes impide corroborar las causas para todo el periodo. No obstante, diversos autores han comprobado, a partir de estudios para fechas más recientes (Gómez-Gutiérrez *et al.*, 2009; Schnabel *et al.*, 2010), que la intensificación del uso del suelo en ambientes adeshados a partir de la posguerra se reflejó en la rotura de las vaguadas y vertientes con menor pendiente. Aunque, durante los años siguientes, la mayor parte de las explotaciones dejaron de cultivarse debido a la baja productividad de las dehesas y a la crisis de la agricultura tradicional, como ocurre en nuestra área de estudio a partir de 1960. El abandono de la actividad agrícola no supuso un descenso de las tasas de erosión, sino al contrario, puesto que la actividad ganadera se intensificó. En el área de estudio la carga ganadera aumentó de $0,29 \text{ UGM}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 1956 a $1,57 \text{ UGM}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2012. Dicho incremento se produjo especialmente a partir de los años 90 del siglo XX, tras la entrada de España en la UE, década en la

que la carga ganadera subió de $0,39 \text{ UGM}\cdot\text{ha}^{-1}$ a $1,57 \text{ UGM}\cdot\text{ha}^{-1}$. Todos estos hechos, apuntan a que la tendencia de las tasas de erosión, a partir del último año datado (1963), es un aumento paulatino que quedaría ratificado con las causas expuestas previamente.

5. Conclusiones

La combinación metodológica de raíces expuestas y escáner láser terrestre propuesta en este trabajo permitió estimar tasas históricas de erosión, además de estudiar la vertiente en su totalidad (44.179 m^2) y trabajar con un alto porcentaje de los individuos localizados en ella (78%) de manera más rápida que con el método tradicional de raíces expuestas.

Las tasas de erosión son mayores en espacios abiertos que en espacios cubiertos por las copas de los árboles, aunque ambos valores representan tasas elevadas. Aunque existe una alta variabilidad espacial de las tasas de erosión, no se ha detectado la influencia de la pendiente, pudiendo tener más peso la microtopografía o variaciones en la cobertura herbácea del suelo. Por el contrario, la edad del arbolado sí presenta una alta variabilidad en su distribución, aunque al agruparlas en las diferentes áreas se obtiene una homogeneización de los datos y no siguen ningún patrón. No obstante, se refleja una diferencia entre el área C y el resto de la ladera al haber una mayor representatividad de árboles viejos.

Se ha constatado un incremento de las tasas de erosión desde la segunda mitad del siglo XVII hasta la actualidad, identificándose dos fechas que marcan diferentes periodos de intensificación de la actividad agraria y ganadera a lo largo de la historia del área de estudio (1836 y 1912). No obstante se desconoce la tendencia de las tasas de los últimos 50 años al carecer de árboles con menos de 50 años.

Por último, la corrección del punto de inflexión ha disminuido el error provocado por el crecimiento secundario del árbol. En próxi-

mos estudios se aplicará esta metodología en otras áreas para obtener tasas de erosión en fincas con uso y manejos distintos y para ampliar el número de muestras e indagar en la influencia de factores topográficos sobre el proceso de erosión hídrica. Además, se abarcarán árboles con una mayor variabilidad de edades y así evitar lagunas de datos. También se mejorará la corrección del punto de inflexión, analizando la estructura de tocones de encinas y se determinará la edad de una muestra de árboles para comprobar la bondad de la estimación de edades realizadas.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias a un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (CGL2011-23361) y una beca FPI del Gobierno de Extremadura (PD 12051) financiada con por el Fondo Social Europeo.

Referencias Bibliográficas

- Ballesteros-Cánovas, J.A.; Bodoque, J.M.; Lucía, A.; Martín-Duque, J.F.; Díez Herrero, A.; Ruiz-Villanueva, V.; Rubiales, J.M.; Génova, M. (2013). Dendrogeomorphology in badlands: Methods, case studies and prospects, *Catena*, 106, 113-122.
- Bodoque, J.M.; Díez-Herrero, A.; Martín-Duque, J.F.; Rubiales, J.M.; Godfrey, A.; Pedraza, J.; Carrasco, R.M.; Sanz, M.A. (2005). Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: Two examples from Central Spain. *Catena*, 64 (1), 81-102.
- Bodoque, J.M.; Lucía, A.; Ballesteros, J.A.; Martín-Duque, J.F.; Rubiales, J.M.; Génova, M. (2011). Measuring medium-term sheet erosion in gullies from trees: A case study using dendrogeomorphological analysis of exposed pine roots in central Iberia. *Geomorphology*, 134 (3-4), 417-425.
- Bodoque del Pozo, J.M.; Ballesteros Cánovas, J.A.; Díez Herreo, A.; Ruiz Villanueva, V.; Nadal Romero, M.E.; Génova Fúster, M.; Rubiales Jiménez, J.M.; Baeza Chico, E.; Jernández Ruiz, M. (2012). Nueva propuesta para la mejora de la estimación de tasas de erosión hídrica mediante técnicas dendrogeomorfológicas. En: *Avances de la geomorfología en España 2010-2012* (González Díez, A., coord.) Ediciones de la Universidad de Cantabria, Santander, 207-210.
- Carrara, P.E.; Carroll, T.R. (1979). The determination of erosion rates from exposed tree roots in the Piceance Basin, Colorado. *Earth Surface Processes and Landforms*, 4, 307-317.
- Casalí, J.; Giménez, R.; De Santisteban, L.; Álvarez-Mozos, J.; Mena, J.; Del Valle de Lersundi, J. (2009). Determination of long-term erosion rates in vineyards of Navarre (Spain) using botanical benchmarks. *Catena*, 78(1), 12-19.
- Chartier, M.P.; Rostagno, C.M.; Roig, F.A. (2009). Soil erosion rates in rangelands of northeastern Patagonia: A dendrogeomorphological analysis using exposed shrub roots. *Geomorphology*, 106, 344-351.
- Coile, T.S. (1936). Soil samplers. *Soil Science*, 42, 139-142.
- Corona, C.; Lopez Saez, J.; Rovéra, G.; Stoffel, M.; Astrade, L.; Berger, F. (2011). High resolution, quantitative reconstruction of erosion rates based on anatomical changes in exposed roots at Draix, Alpes de Haute-Provence- critical review of existing approaches and independent quality control of results. *Geomorphology*, 125 (3), 433-444.
- Donázar, J.A., Naveso, M.E., Tella, J.L., Campión, D. (1997). Extensive grazing and raptors in Spain. En: *Farming and Birds in Europe* (Pain, D.J.; Pienkowski, M.W.). Academic Press, San Diego, 117-149.
- Dunne, T.; Dietrich, W.E.; Brunengo, J. (1978). Recent and past erosion rates in semi-arid Kenya. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Supplementband*, 29, 130-140.
- Eardley, A.J.; Viavant, W. (1967). Rates of Denudation as measured by Bristlecone Pines, Cedar Breaks. *Utah Geological and Mineralogical Survey, Special Studies*, 21.
- Elena, M.; López, J.A.; Casas, M.; Sánchez, A. (1987). *El carbón de encina y la dehesa*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, MAPA, Madrid, 113 pp.
- Gärtner, H.; Schweingruber, F.H.; Dikau, R. (2001). Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia*, 19 (1), 81-91.
- Gärtner, H. (2007). Tree Roots. Methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes. *Geomorphology*, 86, 243-251.

- Gärtner, H.; B. Wagner; I. Heinrich; C. Denier (2009). 3D-laser scanning: A new method to analyze coarse tree root systems. *Forest Snow and Landscape Research*, 82 (1), 95-106.
- García, J.; Sánchez, F. (1984). Extremadura a fines del siglo XVIII y comienzos del XIX: conflictos campesinos, crisis agrarias y crisis de subsistencias y agobios fiscales. *Norba. Revista de Historia*, 5, 213-234.
- Gea-Izquierdo, G.; Cañellas, I.; Montero, G. (2006). Acorn production in Spanish holm oak woodlands. *Investig. Agrar. Sist. Recur. F.* 15, 339-354.
- Gómez Amelia, D. (1982). *La penillanura Cacereña: Estudio geomorfológico*. Universidad de Extremadura, Cáceres, 32 pp.
- Gómez-Gutiérrez, Á.; Schnabel, S.; Lavado Contador, F. (2009). Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain. *Land Degradation and Development*, 20, 535-550.
- González-Hidalgo, J.C.; PeñaMonné, J.L.; De Luis, M. (2007). A review of daily soil erosion in Western Mediterranean areas. *Catena*, 71, 193-199.
- Grimm, M.; Jones, R.; Montanarella, L. (2002). *Soil Erosion Risk in Europe*. EUR 19939 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 440 pp.
- Horn, B.K.P. (1981). Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, 69 (1), 17-47.
- Joffre, R.; Vacher, J.; de los Llanos C.; Long, G. (1988). The dehesa: an agrosilvopastoral system of the Mediterranean region with special reference to the Sierra Morena area of Spain. *Agroforestry Systems*, 6, 71-96.
- Kosmas, C.; Danalatos, N.; Cammeraat, L.H.; Chabart, M.; Diamantopoulos, J.; Farand, R.; Gutierrez, L.; Jacob, A.; Marques, H.; Martinez-Fernandez, J.; Mizara, A.; Moustakas, N.; Nicolau, J.M.; Oliveros, C.; Pinna, G.; Puddu, R.; Puigdefabregas, J.; Roxo, M.; Simao, A.; Stamou, G.; Tomasi, N.; Usai, D.; Vacca, A. (1997). The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena* 29, 45-59.
- Lal, R. (1990). Soil erosion and land degradation: The global risks. En: *Soil Degradation, Advances in Soil Science* (Lal, R.; Stewart, B.A.) Springer-Verlag, New York, 11, 129-172.
- LaMarche, V.C. Jr. (1968). Rates of slope degradation as determined from botanical evidence, White Mountains, California. *USGS Professional Paper*, 352 (1), 341-377.
- Lavado Contador, J.F.; Schnabel, S.; Trenado Ordoñez, R. (2004). Comparison of recent land use and land cover changes in two Dehesa agrosilvopastoral land use systems, SW Spain. En: *Agrosilvopastoral Systems. Dehesas and Montados. Advances in GeoEcology* (Schnabel, S. y Ferreira, A.). Catena Verlag, Reiskirchen, Alemania, 37, 55-69.
- Lavado Contador, J.F.; Schnabel, S.; Gómez Gutiérrez, Á.; Pulido Fernández, M. (2010). Sensibilidad ambiental a la degradación en Extremadura. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 53, 147-164.
- Linares, A.M.; Zapata, S. (2001). Una visión panorámica de ocho siglos de la Dehesa. En: *Seminario Beneficios Comerciales y Ambientales de la Repoblación y la Regeneración del Arbolado del Monte Mediterráneo* (Campos, P.; Montero, G., coord.). Ministerio de Ciencia y Tecnología, Madrid, 1, 126-142.
- Llopis, E.; Zapata, S. (2001). El "Sur del Sur". Extremadura en la era de la industrialización. En: *Historia económica regional de España. S.XIX y XX* (Germán, L.; Llopis, E.; de Montes, J.M.; Zapata, S., eds.). Editorial Crítica, Barcelona, 271-298.
- López Saez, J.; Corona, C.; Stoffel, M.; Rovéra, G.; Astrade, L.; Berger, F. (2011). Mapping of erosion rates in marly badlands based on a coupling of anatomical changes in exposed roots with slope maps derived from LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1162-1171.
- MAPA, 2008. *Diagnóstico de las Dehesas Ibéricas Mediterráneas*. Tragsatec, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España, 1.
- Mateos Rodríguez, A.B.; Schnabel, S. (2002). Rainfall interception by holm oaks in Mediterranean open woodland. En: *Environmental Change and Water Sustainability* (García Ruiz, J.M.; Jones, J.A.A.; Arnáez, J., eds.) Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza, 31-42.
- McAuliffe, J.R.; Scuderi, L.A.; McFadden, L.D. (2006). Tree-ring record of hillslope erosion and valley floor dynamics: landscape responses to climate variation during the last 400 yr in the Colorado Plateau, northeastern Arizona. *Global and Planetary Change*, 50, 184-201.
- Montero, M.J.; Moreno, G.; Bertomeu, M. (2008). Light distribution in scattered-trees open woodlands in Western Spain. *Agroforestry Systems*, 73 (3), 233-244.
- Monteserín, V.; Pérez, A. (1988). Mapa geológico de España escala 1:50.000, 2ª Serie (MAGNA).

- Hoja de Serradilla (651). IGME. Serv. Pub. Ministerio Industria, Madrid.
- Morgan, R.P.C. (1986). *Soil erosion and conservation*. Longman Group, Essex, 198 pp.
- Oldeman, L.R.; Hakkeling, R.T.A.; Sombroek, W.G. (1991). *World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation, with Explanatory Note*. 2nd Ed. ISRIC, Wageningen, 41 pp.
- Papanastasis, V.P., Mansat, P. (1996). Grasslands and related forage resources in Mediterranean areas. En: *Grassland Science in Europe* (Parente, G.; Frame, J.; Orsi, S.). European Grassland Federation, Zürich, 1, 47-57.
- Pimentel, D. (2006). Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8, 119-137.
- Pinto-Correia, T. (1993). Threatened landscape in Alentejo, Portugal: the Montado and other agro-silvo-pastoral systems. *Landscape and Urban Planning* 24, 43-48.
- Plieninger, T. (2006). Las dehesas de la península cacereña: origen y evolución de un paisaje cultural. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Extremadura, Cáceres, 191 pp.
- Plieninger, T.; Harald, S. (2006). Elementos estructurales del paisaje adehesado tradicional en Monroy y Torrejón el Rubio (Cáceres y su importancia para la conservación de la naturaleza y el desarrollo rural. *Revista de estudios extremeños*, 51(1), 441-483.
- Plieninger, T.; Schaich, H. (2006). Elementos estructurales del paisaje adehesado tradicional en Monroy y Torrejón el Rubio (Cáceres) y su importancia para la conservación de la naturaleza y el desarrollo rural. *Revista de estudios extremeños*, 62, 441-484.
- Pulido, F.; Picardo, A. (2010): *Libro Verde de la Dehesa*. 48. En línea: http://www.uco.es/integraldehesa/images/stories/doc/Jornadas/libro_verde_dehesa.pdf
- Schnabel, S. (1994). Using Botanical Evidence for the Determination of Erosion Rates in Semi-arid Tropical Areas. *Advances in GeoEcology*, 27, 34-45.
- Schnabel, S. (1997). *Soil erosion and runoff production in a small watershed under silvo-pastoral landuse (Dehesas) in Extremadura, Spain*. Geoformas Ediciones S.L., Logroño, 167 pp.
- Schnabel, S.; Lavado Contador, J.F.; Gómez Gutiérrez, A.; Lagar Timón, D. (2006). La degradación del suelo en las dehesas de Extremadura. En: *Gestión ambiental y económica del ecosistema dehesa en la Península Ibérica* (Espejo Díaz, M.; Martín Bellido, M.; Matos, C., Mesías Díaz eds.). Junta de Extremadura, Mérida, 63-71.
- Schnabel, S.; Ceballos Barbancho, A.; Gómez Gutiérrez, Á. (2010). Erosión hídrica en la dehesa extremeña. En: *Aportaciones a la geografía física de Extremadura con especial referencia a las Dehesas* (Schnabel, S.; Lavado Contador, J.F.; Gómez Gutiérrez, Á.; García Marín, R. eds.). Fundicotex, Cáceres, 153-185.
- Schnabel, S., Dahlgren, R.A., Moreno, G. (2013). Soil and water dynamics. En: *Mediterranean Oak Woodland Working Landscapes. Dehesas of Spain and Rangelands of California* (Campos P.; Huntsinger L.; Oviedo J.L.; Starrs P.F.; Díaz M.; Standiford R.; Montero G. (eds.). Springer-Verlag, New York, 91-121.
- Shroder, J.F. (1980). Dendrogeomorphology: review and new techniques of tree ring dating. *Progress in Physical Geography*, 4 (2), 161-188.
- Solé Benet, A. (2006). Spain. En: *Soil Erosion in Europe* (Boardman, J.; Poesen, J.). John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 311-346.
- Stoffel, M.; Corona, C.; Ballesteros-Cánovas, A. y Bodoque, J.M. (2013). Dating and quantification of erosion processes based on exposed roots. *Earth-Science Reviews*, 123, 18-34.
- Vanwalleghem, T.; Infante Amate, J.; González de Molina, M.; Soto Fernández, D.; Alfonso Gómez, J. (2011). Quantifying the effect of historical soil management on soil erosion rates in Mediterranean olive orchards. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 142, 341-351.
- Wainwright, J. y Thornes, J.B. (2004). *Environmental Issues in the Mediterranean*. Routledge, London.