



## Investigaciones dendrogeomorfológicas aplicadas a la gestión de los impactos por erosión hídrica acelerada de suelos en las sendas del parque nacional de Monfragüe (Cáceres)

**Autor:** Juan Antonio Ballesteros Cánovas

**Institución:** Instituto Geológico y Minero de España

**Otros autores:** J.M. Bodoque del Pozo (UCLM); A. Díez Herrero (IGME); V. Ruiz Villanueva (IGME); M.E. Nadal Romero (UZar); M. Génova Fúster (UPM); J.M. Rubiales Jiménez (UPM); E. Baeza Chico (IGME); M. Hernández Ruiz (IGME); I. Gutiérrez Pérez (Ferrovia-Agromán)

## Resumen

En muchos espacios naturales protegidos, el flujo peatonal de visitantes se concentra en determinados sectores del área de uso público, sobre todo en la proximidad de las principales vías de acceso (carreteras, núcleos de población...) y en un reducido número de sendas y caminos peatonales que comunican los elementos más visitados. Es el caso del camino hacia la Cola de Caballo en el parque nacional de Ordesa y Monte Perdido; el camino a la ermita de San Frutos en el parque natural de las Hoces del río Duratón; o la senda que comunica el Salto del Gitano con el castillo y la ermita en el parque nacional de Monfragüe, por citar algunos ejemplos. Esta concentración de actividades de senderismo produce en determinados tramos de estos caminos y sendas (zonas con suelos arenosos o limosos y altas pendientes) una erosión hídrica acelerada por el efecto físico del pisoteo, compactación y continua fricción. En ocasiones se llegan a formar regueros, pequeños barrancos y se pierden grandes cantidades de suelos fértiles, que además fosilizan y aterran aquellas zonas donde va a parar la escorrentía, produciendo importantes impactos en estos espacios singulares. Existen numerosos ejemplos de ingentes partidas económicas que los gestores de estos espacios protegidos tienen que destinar a la reparación y recuperación de estas sendas y su entorno.

Para ayudar a los gestores es básico disponer de metodologías y herramientas que cuantifiquen esta erosión hídrica (en mm/año) delimitando qué tramos de estas sendas y caminos tienen los mayores problemas erosivos, para así determinar cuáles deben ser prioritarios en su corrección, o qué acciones de restricción de paso o determinación de capacidad de acogida, son necesarias adoptar. Para esta cuantificación son muy útiles, desde hace décadas, las técnicas dendrogeomorfológicas aplicadas a las raíces de árboles que han quedado expuestas a la intemperie por la erosión acelerada en las sendas. En este trabajo se propone una nueva metodología de medición del suelo denudado en relación con la raíz, basado en el estudio microtopográfico de la superficie utilizando moldes y réplicas de alta resolución realizados en diferentes tipos de siliconas, latex y escayolas, y su posterior escaneo tridimensional. La zona piloto donde se ha ensayado esta metodología son los senderos y caminos del parque nacional de Monfragüe (Cáceres), que presentan raíces expuestas debido a la intensa erosión hídrica acelerada como consecuencia de la elevada concentración de visitantes. Los estudios son financiados por el proyecto de investigación IDEA-GesPPNN, del OAPN (MAGRAMA).

**Palabras claves:** dendrogeomorfología; erosión hídrica; raíces; Monfragüe; parque nacional

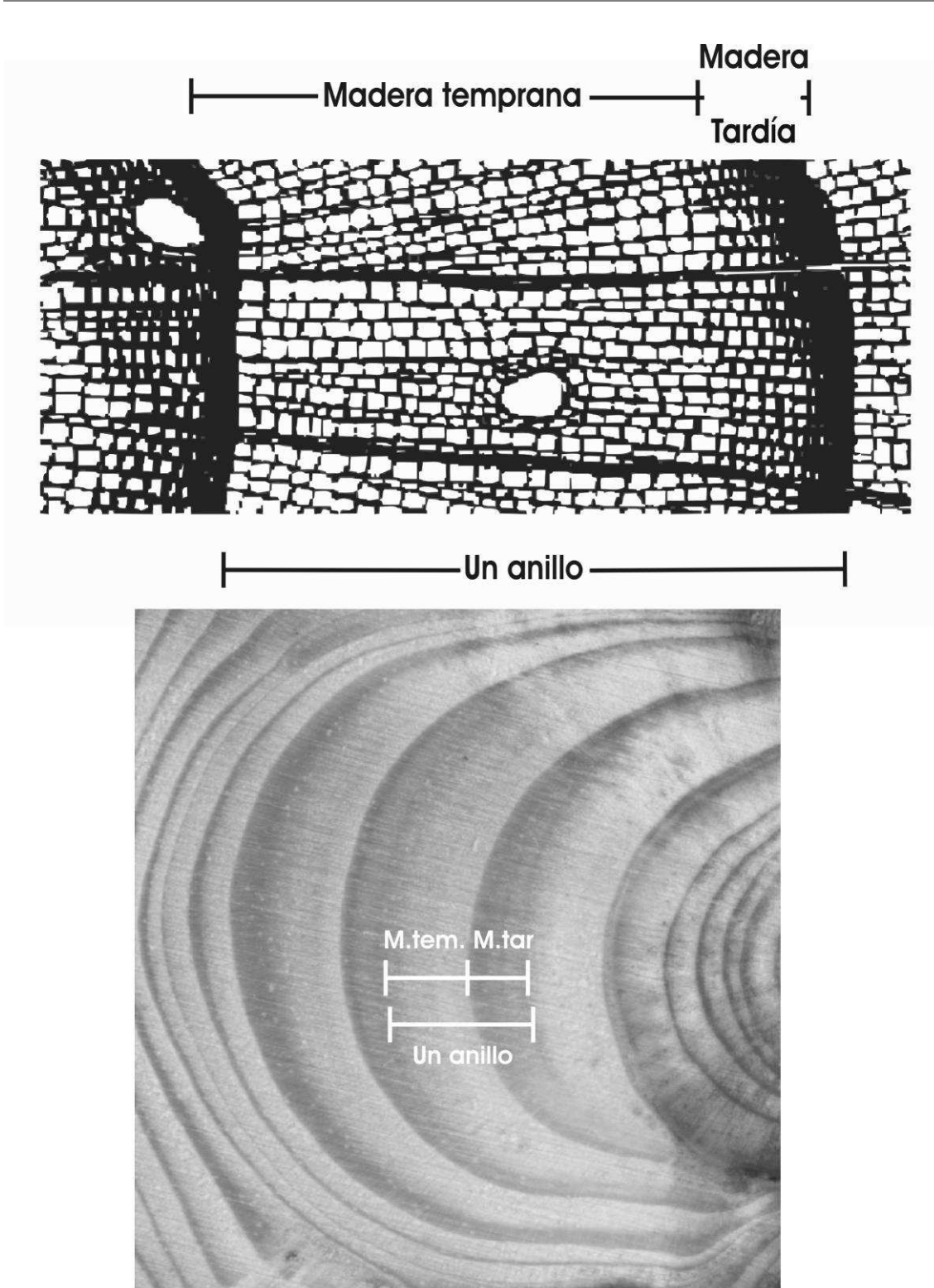
## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

La dendrocronología es la ciencia que data los anillos de crecimiento de los árboles, con el fin de caracterizar y sincronizar los cambios de índole ambiental que tienen lugar en el medio, o de datar restos arqueológicos. Etimológicamente, 'dendro' procede de la palabra griega *drendon*, que significa árbol; mientras que la palabra 'cronología' deriva de los vocablos griegos *chronos* y *logos*, que traducidos al español equivalen a tiempo y tratado o conocimiento, respectivamente. Leonardo da Vinci (1452-1519), fue la primera persona que se percató de la existencia de relación entre las variables climáticas (precipitación, temperatura) y las medidas de anchura de una serie de anillos de crecimiento. Sin embargo, es en los albores del siglo XX cuando se establecen los fundamentos teóricos de la dendrocronología (Douglass, 1909, 1914).

En síntesis, la dendrocronología se basa en el estudio de series de anillos de crecimiento. Como resultado de las variaciones climáticas estacionales existentes en las latitudes de clima templado, la formación de nuevos anillos en árboles está sujeta a dos fases de crecimiento, que dan lugar a la formación de la madera temprana y tardía, definiendo ambas un anillo (*Figura 1*) (Fritts, 1976). En determinadas especies (entre ellas *Pinus sylvestris*), estas estructuras generadas en el *cambium* vascular tienen (en condiciones ambientales normales) una periodicidad anual. Otras, sin embargo, (p.e. *Quercus ilex*) tienden a desarrollar falsos anillos (*false rings*), o incluso a no generarlos (*missing rings*). Asimismo, hay especies en las que los anillos no son reconocibles, al desarrollarse en regiones donde a lo largo del año la disponibilidad de agua y las temperaturas presentan una distribución uniforme. A este respecto, Grissino-Mayer (1993), realizó un inventario en el que considero más de 500 especies arbóreas y arbustivas, determinando para cada una de ellas su grado de idoneidad dendrocronológica. Este listado es consultable en la fuente URL: <http://web.utk.edu/~grissino/species.htm>.

Como cualquier otra ciencia, la dendrocronología también tiene un sistema específico de principios o 'reglas científicas'. Puede considerarse que los mismos tienen su origen a finales del siglo XVIII, con el principio de Uniformitarismo (Hutton, 1785). En contraposición, el principio del Crecimiento Agregado de los anillos es relativamente reciente. Asimismo, algunos de los principios son específicos de la dendrocronología, mientras que otros, como el principio de Réplica son comunes a otras disciplinas. A modo de síntesis, las leyes o principios que rigen en dendrocronología son: a) principio de Uniformitarismo; b) principio de los Factores Limitantes; c) principio de Amplitud Ecológica; d) principio de Crecimiento Agregado; e) principio de Selección del Área de Estudio; f) principio de Réplica; g) principio de Datación Cruzada (*crossdating*).



**Figura 1.** A) Representación grafica de los componentes de un anillo: madera temprana y madera tardía (fuente URL: <http://www.ltrr.arizona.edu/dendrochronology.html>). B) Visualización de madera temprana (M.tem) y tardía (M.tar) en una raíz de *Pinus sylvestris*.

El principio de datación cruzada es el más importante a la hora de llevar a cabo investigaciones dendrocronológicas. Según Stokes y Smiley (1996), cuatro son los axiomas que deben cumplirse para que distintas series de anillos de crecimiento sean sincronizables: (i) las especies utilizadas en aplicaciones dendrocronológicas deben tender a desarrollar un anillo de crecimiento por cada año; ii) debe existir un factor ambiental dominante sobre los demás, que actúe como limitante del crecimiento de los anillos; iii) la intensidad de actuación del factor limitante debe ser variable en el tiempo, para que de este modo quede registrada en el patrón anual de crecimiento de los anillos, y iv) los factores que limitan el crecimiento deben actuar uniformemente en un área significativa.

### **1.2. Problemática y objetivos**

El aumento sostenido de visitantes que en las últimas décadas han experimentado los espacios naturales, ha propiciado la aparición de distintos problemas de índole ambiental. Entre ellos, cabe destacar la aceleración de los procesos erosivos como consecuencia del trasiego continuado de senderistas. A este respecto, la dendrogeomorfología es una herramienta útil para hacer un diagnóstico de esta problemática, permitiendo estimar tasas de erosión en unidades de mm/año. Asimismo, puede ofrecer información en relación con cuáles son los tramos de las sendas en las que se concentra el proceso erosivo, así como acerca de cuál ha sido la variabilidad temporal de las tasas. Si se dispone de información, esta variabilidad se puede correlacionar con estadísticas de afluencia de visitantes, lo cual tiene connotaciones importantes en relación con la gestión de estos espacios.

Hasta la fecha, la mayoría de estudios dendrogeomorfológicos se han centrado en la caracterización del tronco; y sólo en menor medida se han utilizado raíces. Históricamente, el uso de raíces para estudios dendrocronológicos ha despertado escaso interés. Glock et al. (1937), concluyeron que la información ecológica que proporcionan es irrelevante, si se compara con la que se puede obtener de una serie de anillos de crecimiento extraída de un tronco.

La realización de estudios dendrocronológicos en raíces es problemática, debido a sus particularidades anatómicas y morfológicas (Krause y Eckstein, 1993). Así, la estructura anatómica de la raíz difiere de la existente en el tronco. Incluso, en árboles de una misma especie se pueden encontrar diferencias anatómicas entre raíces. Por otro lado, es habitual la existencia de anillos de desarrollo parcial, siendo también frecuente que los anillos no se identifiquen con claridad. Redundando en las particularidades morfológicas de las series anuales de crecimiento, se tiene que: a) para una misma raíz es común la existencia de cambios abruptos en las medidas de anchura, así como que se den estructuras de crecimiento irregular; b) en una misma raíz las medidas de anchura de los anillos suelen variar notablemente de año en año (Fayle, 1968); c) las series anuales de crecimiento derivadas de secciones de una misma raíz son variables, por tanto, parece obvio que series temporales de diferentes raíces presenten bajos coeficientes de correlación; d) son frecuentes los anillos ausentes.

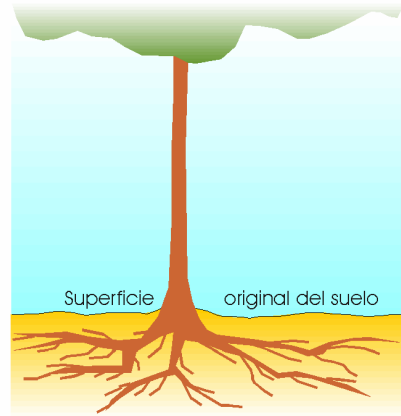
En general, el trabajo en raíces ha consistido en determinar la edad de raíces adventicias (*adventitious roots*), al objeto de datar eventos de deposición asociados a inundaciones

(Martens, 1993; Nakamura et al., 1995; Ruíz-Villanueva et al., 2010 Ballesteros et al., 2012), movimientos en masa (Strunk, 1989; 1991; 1997; Moya et al., 2010), etc. En Estados Unidos, autores como La Marche (1963, 1968), Eardley y Viavant (1967), Carrara y Carroll (1979), Danzer (1996) y Bodoque (2005, 2011), han utilizado raíces expuestas para determinar tasas de denudación en laderas de zonas montañosas. En España esta metodología ha sido utilizada para cuantificar la erosión en regueros (Vanderkerckhove et al., 2001).

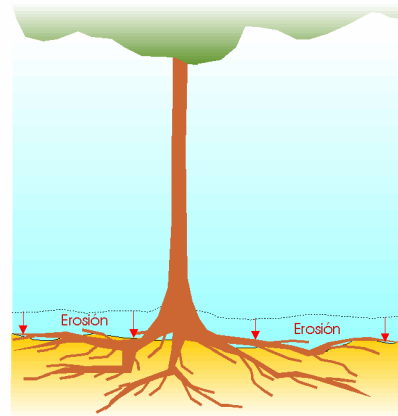
El procedimiento empleado para la estimación de tasas de erosión a partir de raíces expuestas se basa en el hecho siguiente (Carrara y Carroll, 1979): las raíces, en condiciones de desarrollo normal, aumentan de tamaño como consecuencia de la formación de un anillo cada año, el cual se dispone de manera concéntrica con respecto del eje inicial de desarrollo. Sin embargo, cuando desaparece el suelo existente sobre ellas, éstas quedan expuestas. Si una vez expuestas, y debido a distintas causas, quedan desprovistas de la corteza que les sirve de protección frente a los agentes externos, el tejido vegetal de la parte superior muere. Entonces, el patrón de crecimiento anual de los anillos deja de ser concéntrico para pasar a ser excéntrico, ya que la raíz únicamente se desarrolla donde el tejido está vivo. Si no se produce descortezado la raíz también experimenta cambios estructurales en respuesta a la exposición. Así, es común que los anillos que se forman tras la exposición tengan anchuras significativamente mayores, que las de aquéllos otros formados en condiciones normales de recubrimiento edáfico.

La denudación existente en el entorno de la raíz expuesta se determina midiendo la distancia existente entre la parte superior de la raíz y el suelo ( $E_x$ ). El cociente entre esta medida y el intervalo temporal que ha permanecido la raíz expuesta, define una aproximación a la tasa de erosión en unidades de mm/año (*Figura 2*) (LaMarche, 1963, 1968; Eardley y Viavant, 1967; Bodoque et al., 2005). Cuando la raíz queda expuesta, además del cambio en el patrón de crecimiento de la raíz y de la aparición de procesos de reacción en madera, se modifica la estructura anatómica de la raíz (Fayle, 1968; Gärtner et al., 2001; Rubiales et al., 2008). Estos cambios se desencadenan básicamente por la acción de dos factores: (a) estrés mecánico; (b) exposición subaérea (incidencia de la luz, variaciones de temperatura, disponibilidad de agua,...) (*Tabla 1*). De hecho, la caracterización de los cambios en la estructura microscópica de la raíz (anchura del anillo de crecimiento, porcentaje de madera tardía, canales resiníferos, diámetro máximo de la luz de la traqueida de la madera temprana,...), permite determinar con exactitud el primer año de exposición (Gärtner et al., 2001). El conocimiento detallado de estos cambios constituye una poderosa herramienta, que puede ser utilizada para cuantificar tasas de erosión en áreas donde no se dispone de medidas *in situ* de este parámetro.

**A**



SISTEMA RADICULAR ENTERRADO  
(Cobertura edáfica normal)



SISTEMA RADICULAR EXPUESTO  
(Cobertura edáfica erosionada)

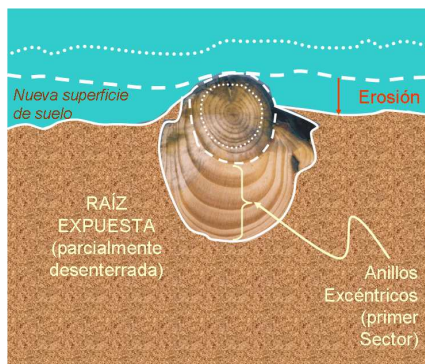
**B**



**C**

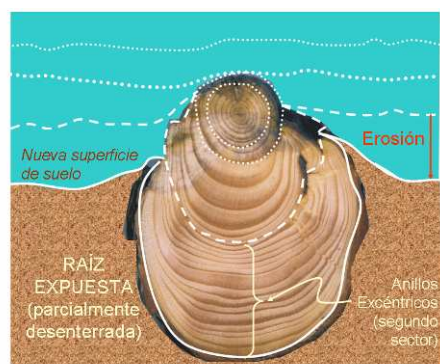


**D**



Tasa de erosión = 7 mm / 4 años = 1,75 mm/a

**E**



Tasa de erosión = 16 mm / 15 años = 1,06 mm/a

**Figura 2.** A) Desarrollo radicular en condiciones de cobertura edáfica normal, así como de exposición subaérea; B y C) patrón de crecimiento concéntrico en raíces no expuestas; D y E) patrón de crecimiento excéntrico en raíces expuestas. Los anillos que denotan exposición, junto con la altura de suelo desnudo, determinan la tasa de erosión resultante.

**Tabla 1.** Variaciones anatómicas en la estructura celular de raíces expuestas de '*Larix decidua*'. Los cambios están asociados a denudación continua de suelo y a eventos erosivos extremos, tipo corrientes de derrubios (Gärtner et al., 2001).

	Característica anatómica	Factor desencadenante
<b>Evento erosivo extremo</b>	Madera temprana: <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Aumento del número de células</li> <li>➤ Disminución del tamaño de las células</li> </ul>	Exposición subaérea repentina
	Madera tardía: <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Aumento del número de células</li> <li>➤ Aumento del espesor de la pared celular</li> <li>➤ Reducción del volumen celular interno</li> </ul> Límite madera temprana / tardía claramente visible La estructura de las células es similar a la del tronco	
<b>Denudación continua de suelo</b>	Incremento del número de células en la madera temprana	Denudación de suelo <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reducción en la presión</li> <li>▪ Incremento en la influencia de las variaciones de temperatura</li> </ul> — Exposición —
	Incremento ligero del número de células en la madera tardía	
	Incremento del espesor de la pared celular en la madera tardía Aumento del volumen celular interno en la madera tardía	
	Reducción del volumen interno celular en la madera tardía	
	Disminución del tamaño de las células de la madera temprana	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Acción de la atmósfera y de la luz</li> </ul>
	Incremento en el número de células de la madera temprana Disminución en torno al 60% del tamaño de las células de la madera temprana	

En relación con los párrafos previos, buena parte del esfuerzo investigador realizado hasta la fecha se ha centrado en la determinación precisa con criterios anatómicos del primer año de exposición. Asimismo, el análisis de esta respuesta anatómica también ha permitido establecer que los cambios en la estructura de la madera se producen poco antes de que la raíz quede expuesta (Corona et al., 2011). Como resultado, al parámetro



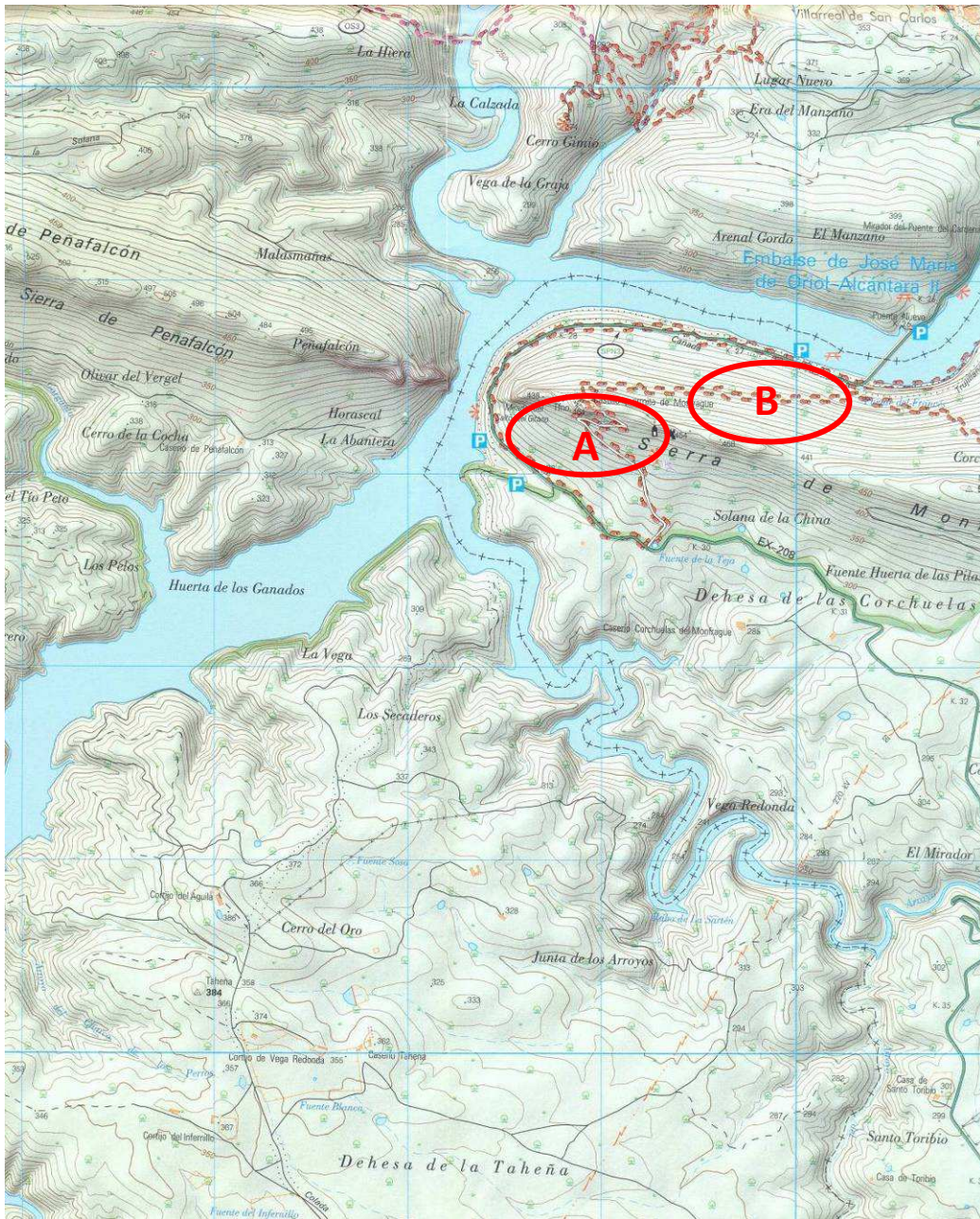
$E_x$  se le tiene que sumar la profundidad, en relación con la superficie del terreno, en la que se produce la respuesta anatómica. En esta investigación, se intenta demostrar que el parámetro  $E_x$  hasta la fecha se ha medido erróneamente, en tanto en cuanto para su determinación se han tomado como referencias el techo de la raíz expuesta y el nivel del suelo. A este respecto, la determinación rigurosa del parámetro  $E_x$  ha recibido poca atención por parte de la comunidad de dendrogeomorfológica. Así, se ha avanzado en la estimación del crecimiento secundario (Gartner, 2007), el cual define un factor corrector que debe ser aplicado a las tasas. Sin embargo, se ha obviado la variabilidad de la microtopografía del suelo a la hora de determinar  $E_x$ . Esta variabilidad es resultado de: i) la rugosidad del suelo, y ii) las presiones radiales ejercidas por la raíz durante su crecimiento. El primer factor determina la incertidumbre de la estimación. El segundo, condiciona que las medidas de  $E_x$  se tengan que realizar a una distancia de la raíz a partir de la cual las presiones radiales no tengan capacidad de deformar el suelo, y por tanto, de modificar su microtopografía.

Este trabajo tiene por finalidad determinar cuál es el error cometido en la estimación de tasas de erosión, cuando no se tiene en cuenta el efecto que tienen las presiones radiales ejercidas por la raíz en la microtopografía. Asimismo, tiene como objetivo adicional determinar la incertidumbre en  $E_x$  derivada del peso que tiene la rugosidad del suelo en la variabilidad microtopográfica del suelo. Para ello, se han realizado réplicas de escayola de las raíces expuestas y su entorno, que a posteriori fueron escaneadas utilizando laser de mano 3D

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de los límites del Parque Nacional de Monfragüe (superficie: 17862 ha), provincia de Cáceres. Concretamente en las sendas que dan acceso al Castillo y Ermita de Monfragüe en la sierra de Monfragüe por su vertiente sur, y por su vertiente norte ( $X_{UTM}$ : 752197;  $Y_{UTM}$ : 4412922; *Figura 3*). Desde el punto de vista geológico, el P.N. de Monfragüe esta constituido por el sinclinal paleozoico de Monfragüe y por sedimentos cenozoicos. La litología en la zona de estudio se caracteriza por la presencia de pizarras y cuarcitas, de gran dureza y resistencia a la erosión. Dicha característica es especialmente interesante desde el punto de vista de los procesos erosivos ya que en diversas zonas, donde la litología puede aflorar, los procesos erosivos podría estar limitados a dicho nivel; y por lo tanto, existir un control litológico sobre el nivel máximo de erosión que se pudiera alcanzar.

Desde el punto de vista climatológico, la zona de estudio esta dominada por el clima mediterráneo con influencia atlántica. Se caracteriza por amplios periodos de sequía estival con veranos muy calurosos (temperatura media anual 18°C con máximas de 45°C en verano) y otoños-inviernos en los que se concentran la mayor cantidad de pluviosidad (~650 mm anuales con temperaturas mínimas de 6°C). Esto hace que desde el punto de vista bioclimático la zona de estudio se enmarca en el piso mesomediterráneo, con ombroclima de seco (precipitaciones entre 350 y 600 mm) a subhúmedo (precipitaciones entre 600 y 1.000 mm). Ambos condicionantes (litológico y climatológico) posibilitan la existencia de un bosque esclerófilo mediterráneo caracterizado por las especies *Pinus pinaster*, *Quercus rotundifolia*; *Olea sylvestris*; *Quercus suber*, *Quercus faginea* variedad *broteroi*; *Arbutus unedo*; *Phyllirea angustifolia*, *Pistacea lentiscus*, *Viburnum tinus*; *Cistus ladanifer*, entre otras.



**Figura 3.** Ubicación de la zona de estudio dentro del P.N. de Monfragüe. La Zona A ubicada en la vertiente sur y la Zona B ubicada en la vertiente norte de la Sierra de Monfragüe. Mapa topográfico a escala 1:25.000 del IGN; tamaño de la cuadrícula de la malla, 1 x 1 km.

En las citadas sendas, el tráfico concentrado de senderistas y visitantes, ha producido importantes procesos de erosión acelerada, que se manifiestan en la presencia de raíces expuestas y reguerización (*Figuras 4 y 5*). Las obras de reparación de caminos suponen costes elevados y continuos proyectos de reposición del firme (*Figura 5*).



**Figura 4.** Vistas de los caminos y sendas de acceso y circunvalación al castillo y ermita de Monfragüe, donde se pueden reconocer diferentes conjuntos de raíces expuestas como consecuencia de la erosión e incisión del suelo por el tránsito concentrado de los visitantes.



**Figura 5.** Grupos de visitantes que recorren los senderos de acceso al Castillo y Ermita; y cartel anunciante de las obras de consolidación y acondicionamiento de exteriores del Castillo, incluyendo la reparación de caminos, por importe de 896.088 euros.

### 3. METODOLOGÍA

Como se ha indicado en la Introducción, la principal innovación metodológica de este estudio respecto a trabajos previos de estimación de tasas erosivas con raíces expuestas (La Marche, 1963, 1968... Gärtner et al., 2001; Bodoque et al., 2005; Corona et al., 2011), ha sido la mejora en la estimación del espesor de suelo erosionado (*Ex*) mediante estudios microtopográficos de precisión empleando réplicas y escaneos *ex situ* de las raíces.

#### 3.1. Obtención de las réplicas

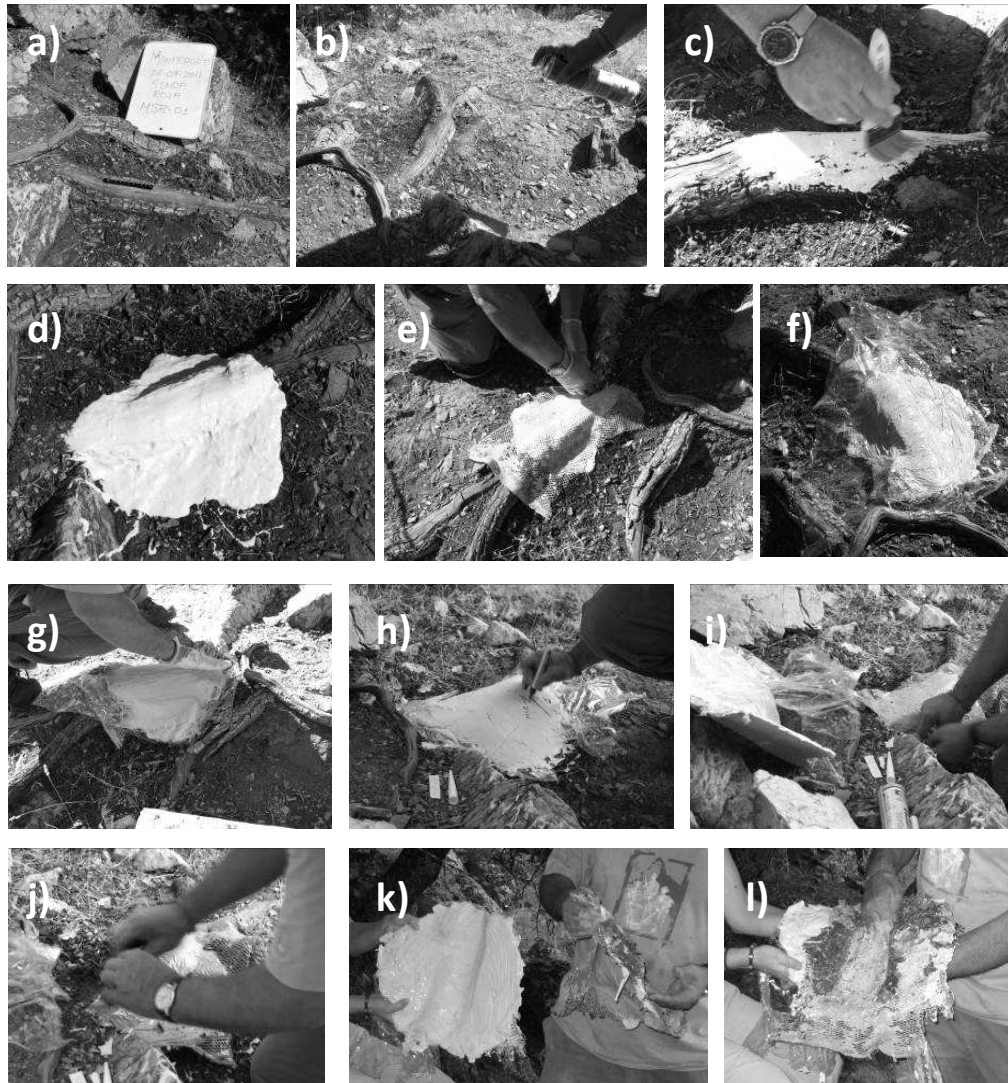
El proceso de obtención de réplicas de raíces expuestas consta de dos etapas: i) proceso de moldeo en campo; y ii) un proceso de vaciado o replicado posterior en laboratorio. En relación con la primera etapa, la elección de la silicona como material de moldeo estuvo condicionada por el tamaño de los elementos a replicar. Partiendo de esta premisa, se eligió un elastómero RTV (*room temperature vulcanizing*), y más concretamente una silicona RTV-2, de condensación (formada por un aceite de silicona y un catalizador) Silastic 3481 de *Dow Corning*. La elección de esta silicona vino dada por sus excelentes propiedades, a saber: i) buena elasticidad; ii) facilidad de desmoldeo; iii) ausencia de calor en la reticulación; iv) baja tensión superficial. Además, presenta la posibilidad de tixotroparla, así como de variar los tiempos de preparación, utilizando para ello diferentes catalizadores. Por lo demás, las características físicas de dureza (*Shore A* =21), resistencia a la tracción (4,4 Mpa), contracción lineal (2%), alargamiento a la rotura (560 %) y resistencia al desgarro (23 kN/m) son las adecuadas para obtener réplicas de raíces y de su entorno próximo.

En general, las siliconas de moldeo tienen una baja tensión superficial, lo que permite extenderlas en casi cualquier superficie. Por otro lado, son fuertemente apolares lo cual determina que sean poco adherentes a la mayor parte de superficies. Asimismo, se utilizó nylon para la confección del molde. Con ello se trataba de compensar la retracción de la

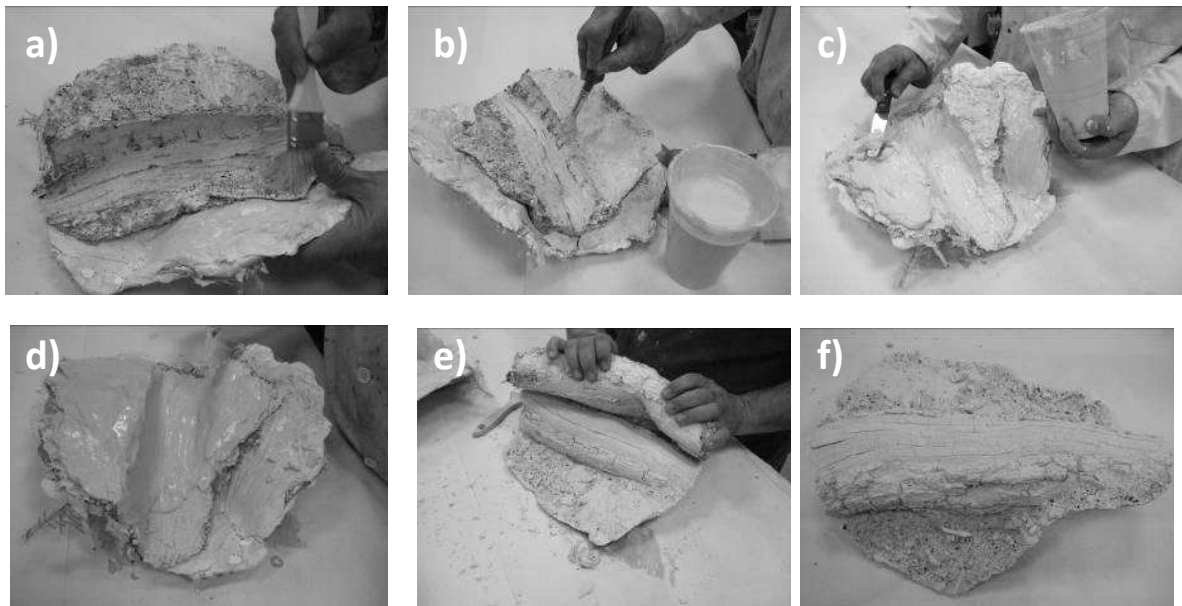
silicona (en torno a un 0,2%) con la expansión de la escayola modificada (aproximadamente un 0,1%), de manera que la variación no fuera significativa. La silicona utilizada en este trabajo alcanza resoluciones de entre 1 a 20 micras, de manera que en la práctica se obtuvo una precisión más que suficiente para abordar el objetivo planteado.

El proceso de obtención de los moldes (*Figura 6*) comenzó con la limpieza de la raíces expuestas con brocha y cepillo. Seguidamente, se consolidó el entorno de la raíz vaporizando con la resina Fluoline A, previamente diluída en acetona (1:2). Una vez curada la resina, se aplicó desmoldeante Molykote, tanto a la raíz como al suelo. El molde se realizó aplicando diversas capas de silicona RTV-2, silastic 3481, catalizador rápido silastic 81 F en la primera capa y catalizador muy rápido 81-VF en las siguientes. También se utilizaron agente tixotrópico y pigmentos, así como red de nylon de 4 mm de luz. La primera capa de silicona, se extendió sobre la raíz con brocha y catalizada al 8% para acelerar aún más los tiempos de curado. La segunda capa se aplicó tixotropada, con catalizador muy rápido y sobre ésta, una vez curada, se colocó la red de nylon para evitar desgarros posteriores. Por último, se aplicó una última capa de silicona blanca tixotrópica, todas ellas catalizadas al 8%. Sobre el molde de silicona ya curado, se extendió una lámina de polietileno para aislar la carcasa. Dicha carcasa se elaboró con escayola álamo-70 de dureza media (450 kg/cm<sup>2</sup> de dureza brinell), habiéndose armado con arpillera. Una vez la carcasa fraguó y secó, se sigló y fotografió. Finalmente se separaron y guardaron carcasa y molde.

Para la obtención de las réplicas en laboratorio (*Figura 7*), los moldes se cubrieron con silicona ácida transparente. Seguidamente, los moldes se limpiaron de tierra y otros elementos, aplicándoseles después con brocha una capa de escayola exaduro dental (dureza brinell 2.500-3.000 kg/cm<sup>2</sup>) con una relación escayola agua 3:1. Una vez fraguada, se humectó y se aplicó una segunda capa más gruesa de exaduro en agua en una relación 3.5-4:1. Tras una hora de fraguado se retiró la réplica y se dejó que perdiera el exceso de humedad, al objeto de que alcanzara la dureza final (3.000 Kg/cm<sup>2</sup>). El proceso se repitió para obtener las réplicas, que una vez secas, fueron sigladas y embaladas, quedando listas para su estudio y escaneo.



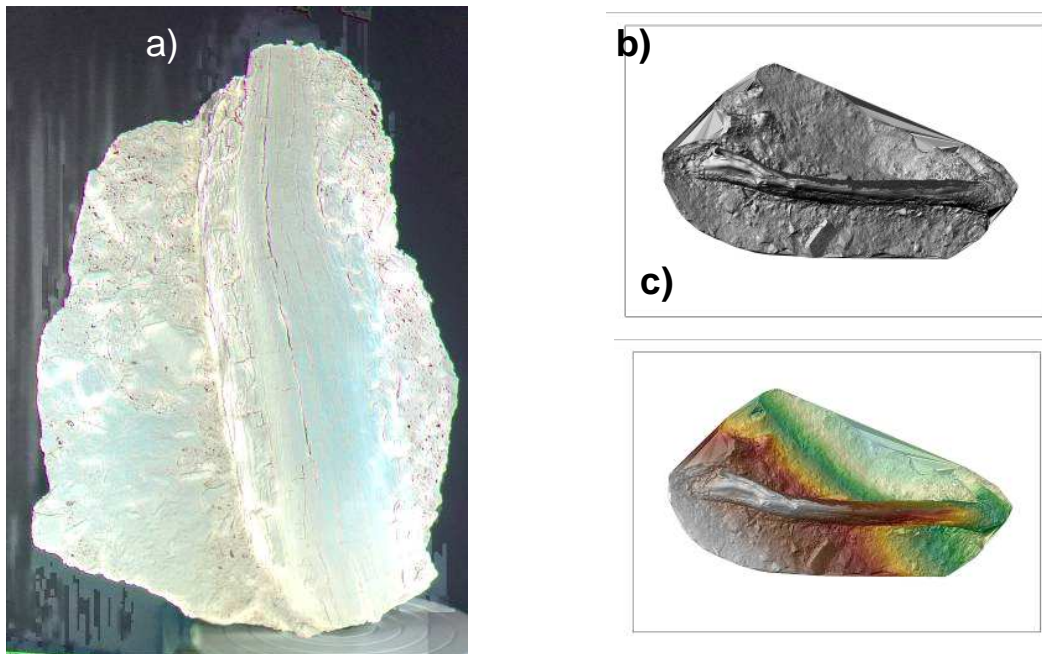
**Figura 6.** Procedimiento para la obtención de los moldes en campo: a) limpieza de la raíz con brocha y cepillo. También se limpia el entorno de la raíz, eliminando aquellos restos de vegetales y piedras que entorpezcan el proceso de moldeo; b) aplicación con spray de desmoldeante Molykote tanto a la raíz como al suelo; c) aplicación de silicona RTV-2, silastic 3481, catalizador rápido silastic 81 F en la primera capa; d) utilización de catalizador muy rápido 81-VF en las siguientes capas de silicona. Utilización de agente tixotrópico y pigmentos; e) y f) extensión de una lámina de polietileno para aislar la carcasa; g) aplicación de la escayola álamo 70 de dureza media; h) siglado del molde; i), j), k) y l) retirada y almacenamiento de carcasas y moldes.



**Figura 7.** Procedimiento para la obtención de las replicas en laboratorio: a) y b) aplicación sobre el molde de una capa de escayola exaduro dental con una relación escayola-agua 3:1; c) y d) aplicación con espátula de una segunda capa de escayola más gruesa con una relación escayola-agua 3.5-4:1; e) retirada de la replica; f) siglado y embalado.

### **3.2. Escaneado de las replicas**

El escaneo de las replicas se realizó con un escáner laser 3D de mano de alta resolución (modelo *NextEngine*) en los laboratorios del CNIEH (Burgos). Se trata de un dispositivo de mano que puede capturar millones de puntos y, en consecuencia, representar tridimensionalmente cualquier objeto. Las replicas fueron escaneadas con resolución milimétrica y desde distintas perspectivas para evitar la presencia de huecos generados en la zona de sombra (*Figura 8*). En cada replica se realizaron al menos diez escaneos individuales, al objeto de poder garantizar un escaneo completo. Los diferentes escaneos fueron unificados y corregidos para poder eliminar defectos asociados al proceso de escaneo. Los datos obtenidos fueron convertidos a formato xyz para de este modo poder realizar el análisis espacial de la información en herramientas SIG.

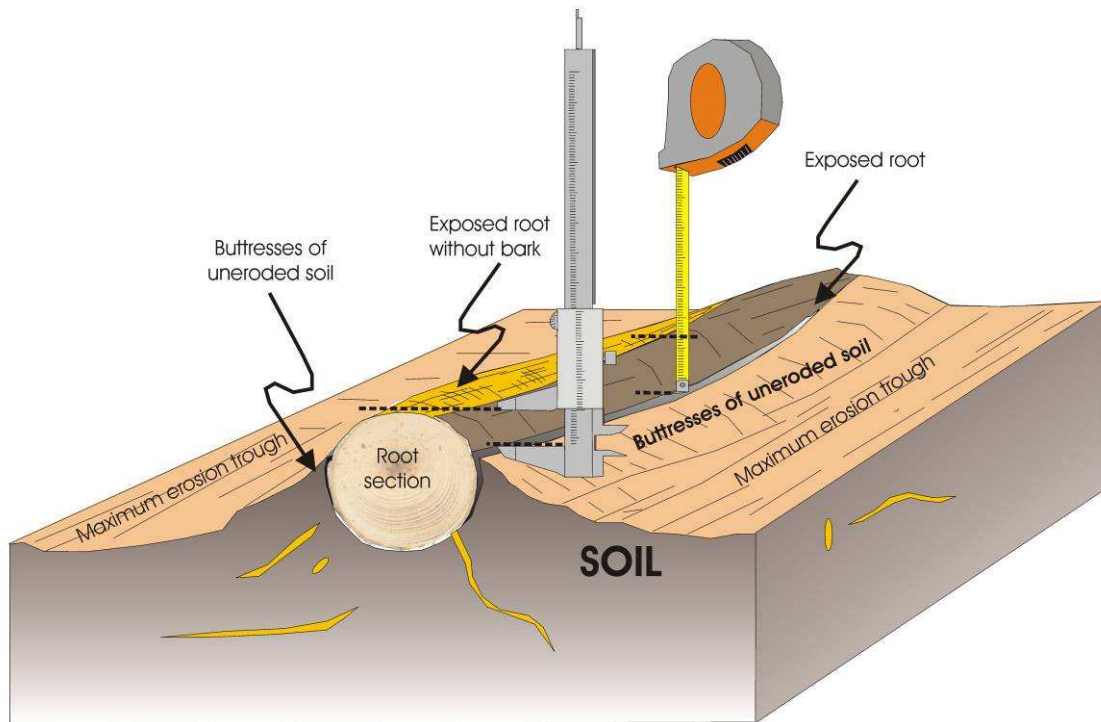


**Figura 8.** a) ejemplo de una de las raíces escaneadas; b) modelo digital de sombreados obtenido tras el escaneado; c) modelo digital de elevaciones derivado del escaneado.

#### 4. RESULTADOS

El objetivo de esta investigación, tal y como se ha indicado con anterioridad, es demostrar que el método dendrogeomorfológico utilizado hasta la fecha para estimar tasas de erosión laminar podría ser parcialmente erróneo. Principalmente, esto es debido a que no se han tenido en cuenta la rugosidad del suelo y la deformación del terreno resultado de las presiones radiales que ejercen las raíces durante su crecimiento. Como resultado, la microtopografía del suelo es altamente variable, lo cual obliga a que la estimación del parámetro  $E_x$  se haga considerando la totalidad de la superficie en la que actúa el proceso de erosión laminar. No obstante, en los estudios dendrogeomorfológicos hasta ahora publicados, la medida de  $E_x$  se hacía tomando con flexómetro o calibrador una o varias medidas donde la raíz y suelo convergen (*Figura 9*). Como resultado, estas medidas no son representativas de las tasas de erosión reales, ya que la variabilidad de la microtopografía se ha obviado. Por lo tanto, las tasas de erosión estimadas hasta el momento carecen de la precisión necesaria, ya que  $E_x$  no ha sido adecuadamente caracterizado.

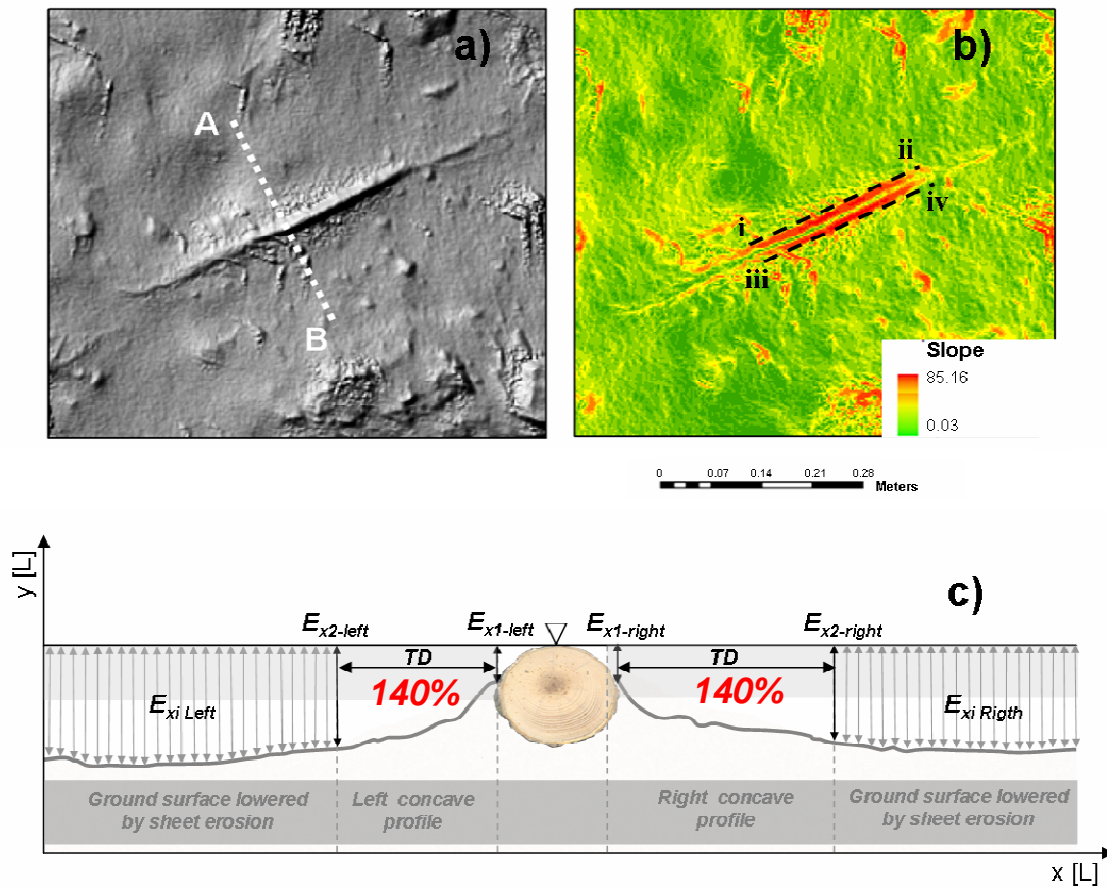




**Figura 9.** Esquema gráfico en el que se representa cómo se caracteriza, de forma clásica y hasta el momento, el parámetro  $E_x$  en dendrogeomorfología, utilizando flexómetro y/o calibrador.

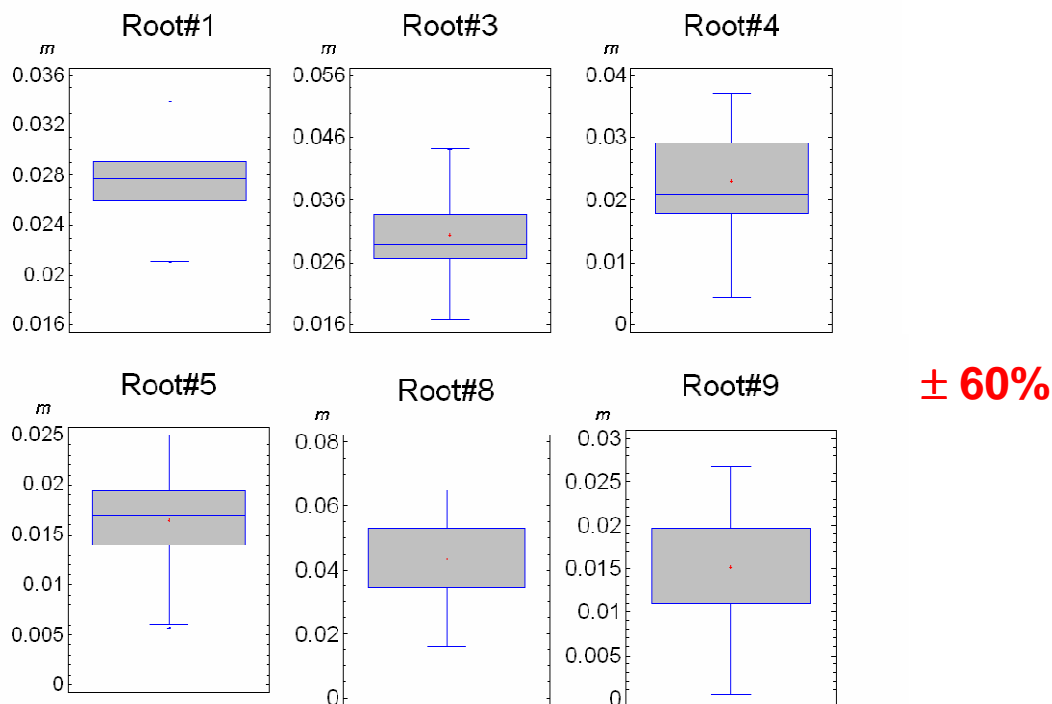
El escaneo de las replicas de escayola, permitió obtener a escala de partícula la microtopografía de la superficie del suelo en la que aparecen las raíces expuestas. Como consecuencia, se puede reducir la incertidumbre que se deriva de la utilización del método dendrogeomorfológico estándar, pues la caracterización de  $E_x$  se puede realizar en toda la superficie. De este modo, es posible obtener tasas más representativas ya que la incertidumbre derivada de la microtopografía del suelo queda de este modo caracterizada.

Los modelos digitales de elevación derivados del escaneo de las replicas muestran en todos los casos perfiles cóncavos, de acuerdo con la transversal de la raíz expuesta. Esto se debe a la deformación del suelo debido a las presiones radiales ejercidas por la raíz durante su crecimiento. A partir de una distancia dada el perfil se estabiliza, representando la superficie de rebajamiento como resultado de la erosión laminar (Figura 10). Esta distancia umbral determina el ámbito en el que el parámetro  $E_x$  debe medirse. La aproximación dendrogeomorfológica tradicional no ha tenido en cuenta esta circunstancia, lo cual tiene importantes implicaciones en lo que a las tasas de erosión laminar se refiere. Así estas tasas estarían infravaloradas, ya que el parámetro  $E_x$  debería haberse medido tomando como referencias los puntos a partir de los cuales las presiones radiales ejercidas por las raíces no tienen capacidad para deformar el suelo.



**Figura 10.** Determinación de la ubicación en la que el parámetro  $E_x$  debe medirse: a) modelo digital de una de las imágenes escaneadas. La línea discontinua A-B representa la localización del perfil transversal; b) mapa de pendientes. Las líneas discontinuas i-ii y iii-iv marcan el límite a partir del cual el parámetro  $E_x$  debe medirse; c) vista esquemática de una raíz expuesta en la que se muestra un ejemplo de perfil cóncavo.  $E_{x1}$  representa la localización en la que el parámetro  $E_x$  se mide en el método dendrogeomorfológico estándar;  $TD$  es la distancia umbral;  $E_{x2}$  representa la localización a partir de la cual el parámetro  $E_x$  debe medirse;  $E_{xi}$  representa la variabilidad en el parámetro  $E_x$  debido a la rugosidad del suelo.

El análisis SIG y posterior tratamiento estadístico realizados, han permitido concluir que se produce una infravaloración en las tasas de un 140% cuando la estimación de  $E_x$  se realiza donde convergen suelo y raíz. Este error se evitaría, si las medidas de  $E_x$  se tomarán más allá de la distancia umbral que marca el ámbito de actuación de las presiones radiales. Por otro lado, la incertidumbre o variabilidad de las estimaciones debida a la rugosidad del terreno se ha estimado en un 60% (Figura 11). Estos resultados demuestran que las medidas de  $E_x$  no deben tomarse puntualmente. En su lugar, se debe considerar la superficie representativa del rebajamiento por erosión laminar, de modo que se puedan obtener estimaciones fiables en las que la incertidumbre quede caracterizada.



**Figura 11.** Gráficos de cajas y bigotes mostrando la variabilidad en  $E_x$  debido a la rugosidad del suelo.

## 5. CONCLUSIONES

La estimación mediante dendrogeomorfología de tasas fiables de erosión laminar es posible, si se considera la variabilidad microtopográfica del suelo. En este trabajo, se han utilizado replicas de escayola escaneadas a alta resolución para caracterizar dicha variabilidad. De este modo, se ha determinado cuál es el peso que la microtopografía tiene en la incertidumbre del parámetro  $E_x$ , así como el error que se comete en la determinación de  $E_x$  cuando este parámetro se mide donde convergen suelo y raíz expuesta. Por otro lado, los resultados obtenidos demuestran que la obtención de tasas de erosión basadas en pocas medidas de  $E_x$  (hasta ahora ésta ha sido la aproximación metodológica utilizada) es insuficiente para caracterizar la incertidumbre debida a la variabilidad en la microtopografía del suelo. A este respecto, las presiones radiales ejercidas por la raíz durante su crecimiento tienen un impacto superior al que se deriva de la rugosidad. Debido a estas presiones radiales, los perfiles transversales trazados desde la raíz expuesta muestran una morfología cóncava. Como resultado, para obtener tasas de erosión fiables las medidas de  $E_x$  deben realizarse donde este perfil deje de ser cóncavo. Estos resultados no ponen en duda a la dendrogeomorfología como herramienta para obtener tasas de erosión laminar. Por el contrario, justifican que se realice una rigurosa caracterización del parámetro  $E_x$ , especialmente una vez el primer año de exposición se ha logrado caracterizar con precisión. Por último, la aproximación metodológica presentada en este trabajo puede ser aplicada con fiabilidad, independientemente de cuál sea el contexto geográfico en el que se aplique.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación IDEA-GesPPNN, del Organismo Autónomo de Parques Nacionales (OAPN 163/2010; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). Asimismo, quisiéramos agradecer al Director del Parque Nacional de Monfragüe (Ángel Rodríguez), el responsable de uso público y la guardería del parque, el apoyo que en todo momento han prestado a este proyecto. Igualmente a Alfonso Benito, Alfredo Pérez-González y Theodoros Karampaglidis (CENIEH), por facilitar el proceso de escaneo 3D de las réplicas, gracias al convenio de colaboración con el IGME.

## Referencias

Ballesteros JA, Bodoque JM, Díez A, Sánchez M, Stoffel M., 2012. Calibration of floodplain roughness and estimation of palaeoflooddischarge based on tree - ring evidence and hydraulic modeling. *Journal of Hydrology*, 403 (1-2), 103-115

Bodoque, J. M., A. Díez-Herrero, J. F. Martín-Duque, J. M. Rubiales, A. Godfrey, J. Pedraza, R. M. Carrasco, y 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., A. Lucía, J. A. Ballesteros, J. F. Martín-Duque, J. M. Rubiales, y Genova, 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.

Carrara, P.E., Carroll, T.R., 1979. The determination of erosion rates from exposed tree roots in the Piceance Basin, Colorado. *Earth Surface Processes*, 4: 307-317.

Corona, C., J. L. Saez, G. Rovera, M. Stoffel, L. Astrade, y 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.

Danzer, S.R. 1996. Rates of slope erosion determined from exposed roots of ponderosa pine at Rose Canyon Lake, Arizona. In: Dean, J., Meko, D.M., Sewtnam, T.W., eds. *Tree Rings, Environment, and Humanity. Radiocarbon 1996, Proceedings of the international conference, Tucson, Arizona, 17-21 May 1994*. Department of Geosciences, The University of Arizona, Tucson, Arizona: 671-678.

Douglass, A.E. 1909. Weather cycles in the growth of big trees. *Monthly Weather Review*, 37(5): 225-237.

- Douglass, A.E. 1914. A method for estimating rainfall by the growth of trees. In: E. Huntington, *The Climatic Factor as Illustrated in Arid America*. Publication 192. Carnegie Institute of Washington, Washington, D.C.: 101-121.
- Eardley, A.J., Viavant, W. 1967. Rates of denudation as measured by Bristlecone Pines. Cedar Breaks, Utah. Utah Geological and Mineralogical Survey, Special Studies, 21.
- Fayle, D.F.C. 1968. Radial Growth in Tree Roots. Distribution, Timing, Anatomy, Faculty of Forestry, University of Toronto, Technical Report No. 9, Toronto.
- Fritts, H.C., 1976. *Tree rings and climate*. New York, NY: Academic Press.
- Gärtner, H., Fritz, H., Schweingruber, F.H., Dikau, R. 2001. Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia*, 19: 1-11.
- Gärtner, H., 2007. Tree roots - Methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes, *Geomorphology*, 86(3-4), 243-251.
- Glock, W.S., Douglass, A.E., Person, G.A., 1937. Principles and methods of tree-ring 737 analysis. Carnegie Institute Publications, Washington, DC.
- Grissino-Mayer, H.D. 1993. An updated list of species used in tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin*, 53: 17-43.
- Hutton, J. 1785. *System of the Earth*, and 1788, *Theory of the Earth*. In *Contributions to the History of Geology*, Vol. 5 (1973), edited by G.W. White.
- Krause, C., Eckstein, D. 1993. Dendrochronology of roots. *Dendrochronologia*, 11: 9-23.
- La Marche, V.C., Jr. 1963. Origin and geologic significance of buttress roots of bristlecone pines, White Mountains, California, U.S. Geological Survey Professional Paper, 475-C: C149-C150.
- La Marche, V.C., Jr. 1968. Rates of slope degradation as determined from botanical evidence, White Mountains, California, U.S. Geological Survey Professional Paper, 32-I: 341-377.
- Martens, D.M. 1993. Hydrologic inferences from tree-ring studies on the Hawksbury River, Sydney, Australia. *Geomorphology*, 8: 147-164.
- Moya J, Corominas J, Pérez Arcas J, Baeza C. 2010. Tree-ring based assessment of rockfall frequency on talus slopes at Solà d'Andorra, Eastern Pyrenees. *Geomorphology* 118: 393-408.
- Nakamura, F., Maita, H., Araya, T. 1995. Sediment routing analysis based on chronological changes in hillslope and riverbed morphologies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20: 333-346.

Rubiales, J. M., J. M. Bodoque, J. A. Ballesteros, y Díez-Herrero, A., 2008. Response of *Pinus sylvestris* roots to sheet-erosion exposure: an anatomical approach, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8(2), 223-231.

Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., Bollschweiler, M., Bodoque, J.M., Ballesteros, J.A., 2010. Dendrogeomorphic analysis of flash floods in a small ungauged mountain catchment (Central Spain). *Geomorphology* 118 (3–4), 383–392.

Stokes, M.A., Smiley, T.H. 1996. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona.

Strunk, H. 1989. Dendrogeomorphology of debris flows. *Dendrochronologia*, 7: 15-25.

Strunk, H. 1991. Frequency distribution of debris flows in the Alps since the “Little Ice Age.” *Zeitschrift fuer Geomorphologie, Supplement-Band*, 83: 71-81.

Strunk, H. 1997. Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods. *Catena*, 31 (1-2): 137-151.

Vanderkerckhove, L., Muys, B., Poesen, J., de Weerd, B., Coppé, N. 2001. A method for dendrochronological assessment of medium-term gully erosion rates. *Catena*, 45: 123-161.