

Estudios recientes (2000-2002) en
Geomorfología
Patrimonio, montaña y dinámica territorial

E. Serrano
A. García de Celis
J.C. Guerra
C.G. Morales
M.T. Ortega

(Editores)

Sociedad Española de Geomorfología
Departamento de Geografía-Universidad de Valladolid

Valladolid, 2002

**Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología. Patrimonio, montaña y
dinámica territorial.**

Referencia bibliográfica:

ISBN: 607-5465-0

I. E. Serrano, A. García de Celis, J.C. Guerra, C. Morales y T. Ortega (Editores). II. Sociedad Española de Geomorfología. VII Reunión Nacional. III. Departamento de Geografía. Universidad de Valladolid.

1. Geomorfología. 2, Península Ibérica, 3. Congresos.

©2002. Departamento de Geografía-Universidad de Valladolid. Sociedad española de Geomorfología

ISBN: 607-5465-0

Depósito Legal: VA-745-2002

Imprime: Mata Digital S.L. Plaza Universidad, 2. 47002 Valladolid.

DETERMINACIÓN DE TASAS DE EROSIÓN UTILIZANDO MÉTODOS DENDROCRONOLOGÍCOS EN RAÍCES EXPUESTAS. DOS EJEMPLOS EN LA VERTIENTE SEPTENTRIONAL DE LA SIERRA DE GUADARRAMA

BODOQUE, J.M.⁽¹⁾, DÍEZ A.⁽²⁾, MARTÍN-DUQUE, J.F.⁽¹⁾, GÓMEZ M.⁽¹⁾, GODFREY, A. ⁽³⁾, PEDRAZA, J.⁽¹⁾, CARRASCO, R.M.⁽²⁾, y SANZ, M.A. ⁽¹⁾

1. Dpto. Geodinámica, Universidad Complutense, 28040 Madrid. 2.Dpto. Ingeniería Geológica y Minera, Universidad de Castilla-La Mancha, 45071 Toledo.3. USDA Forest Service, Intermountain Region, 324 25th Street, Ogden, Utah 84401, United States.

RESUMEN: Este trabajo describe la determinación de tasas de erosión mediante la utilización de técnicas dendrocronológicas en raíces expuestas procedentes de dos localizaciones de la vertiente septentrional de la Sierra de Guadarrama, provincia de Segovia: Senda Schmidt (Valsaín), a partir de raíces de *Pinus sylvestris*; y encinares de Monterrubio, a partir de raíces de *Quercus ilex*. El grueso del análisis ha consistido en un tratamiento estadístico de los datos de tiempo de exposición y profundidad de la denudación, así como de la posible influencia de distintos factores ambientales en la variación de la velocidad del proceso erosivo. Con un nivel de significación del 95 %, las tasas de erosión medias obtenidas oscilan entre 1,7–2,6 mm/año (29–44 t/ha/año) en la Senda Schmidt, para los últimos 101 años, y 1,1– 1,8 mm/año (19–31 t/ha/año) en Monterrubio, para los últimos 42 años. Mediante análisis multifactor de la varianza se observó que la velocidad de erosión en la Senda Schmidt era función de la localización dentro del camino; mientras que en Monterrubio —salvo una relación inversa entre erosión y pendiente difícil de interpretar— no se obtuvieron correlaciones significativas entre el resto de variables ambientales consideradas.

Palabras clave: Tasas de erosión, erosión por arroyada, dendrocronología, dendrogeomorfología, Senda Schmidt, Valsaín, Monterrubio.

ABSTRACT: "Erosion rates determined by using dendrochronological examination of exposed tree roots. Two examples from the northern slope of the Guadarrama Mountains". This paper describes the determination of erosion rates by using dendrochronological methods in exposed tree roots. Two sites within the northern slope of the Guadarrama Mountains, Segovia Province, were studied: a popular trail in the Valsaín forest (Senda Schmidt), from *Pinus sylvestris* roots, and a holm oak open forest on granitic slopes (Monterrubio), from *Quercus ilex* roots. These sites were selected because they showed high denudation morphology; soil-erosion processes, accelerated by human influences (trampling by continuous trekking and overgrazing, respectively), frequently result in exposed roots. The main part of the study entailed a statistical analysis of exposure times and erosion depths. The influence of other environmental factors, affecting the variation of the velocity of the erosion processes, was also examined. With a significance level of 95 %, the mean erosion rates range from 1,7–2,6 mm/yr (29–44 t/ha/year) in the Senda Schmidt in the last 101 years, and 1,1–1,8 mm/yr (19–31 t/ha/year) in Monterrubio for the last 42 years. By analysis

multifactor of the variance, we observed a change in the erosion rates as a function of position within the path for the Senda Schmidt. In Monterrubio, however, we reached no significant conclusions, apart from an inverse relation between erosion and slope gradient that was difficult to interpret.

Keywords: erosion rates, rill-interrill erosion, dendrochronology, dendrogeomorphology, Senda Schmidt, Valsain, Monterrubio.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la degradación de los suelos es uno de los problemas medioambientales más importantes a escala global.

La combinación de varios factores de tipo geomorfológico, climático y geográfico, junto con la acción del hombre, pueden favorecer la acción de los agentes erosivos, aumentando considerablemente el riesgo de pérdidas de suelo.

En este contexto, se hace necesario avanzar en las técnicas que sirvan para evaluar, cuantificar y predecir la erosión, además de llevar a cabo estudios sobre restauración de los terrenos afectados, ya que la complejidad y multifactorialidad de los procesos que generan erosión hídrica suponen una seria dificultad para su estudio y evaluación.

Existen numerosos métodos para el estudio de la erosión hídrica, clásicamente subdivididos en cartográficos, indirectos y directos. Todos ellos presentan ciertas particularidades y una serie de prejuicios en su utilización. Dentro de los métodos directos, el análisis dendrocronológico de raíces expuestas permite aproximar, tanto desde un punto de vista espacial como temporal, las tasas de erosión existentes en el territorio así como sus variaciones. Para ello deben estudiarse las respuestas anatómicas que se producen en las raíces como consecuencia de la denudación del suelo donde están contenidas.

El artículo describe la utilización de esta técnica a modo experimental en dos localizaciones de la vertiente septentrional de la Sierra de Guadarrama (Fig. 1), provincia de Segovia: la Senda Schmidt, en los Montes de Valsain (Estación 1) y unos encinares situados sobre laderas vertientes al arroyo Chico, en el término municipal de Monterrubio (Estación 2).

En los dos casos se trata de lugares en los que se ha producido una erosión acelerada del suelo en los últimos años, como consecuencia de la actividad antrópica. Precisamente la denudación 'acelerada' en las dos localizaciones escogidas, ha dejado expuestas en superficie un gran número de raíces (Fig. 2), lo que ha permitido experimentar la técnica que se describe.

La Senda Schmidt es uno de los caminos más frecuentados para senderismo en toda la Sierra de Guadarrama, con un uso verdaderamente intensivo a partir de los años 70 del siglo XX. El encinar de Monterrubio constituye un monte adhesionado sobre una ladera que tradicionalmente ha sufrido un intenso sobrepastoreo, aspecto éste que ha dado lugar a la desaparición casi completa de la cubierta herbácea y al desarrollo efectivo de procesos continuos de denudación.

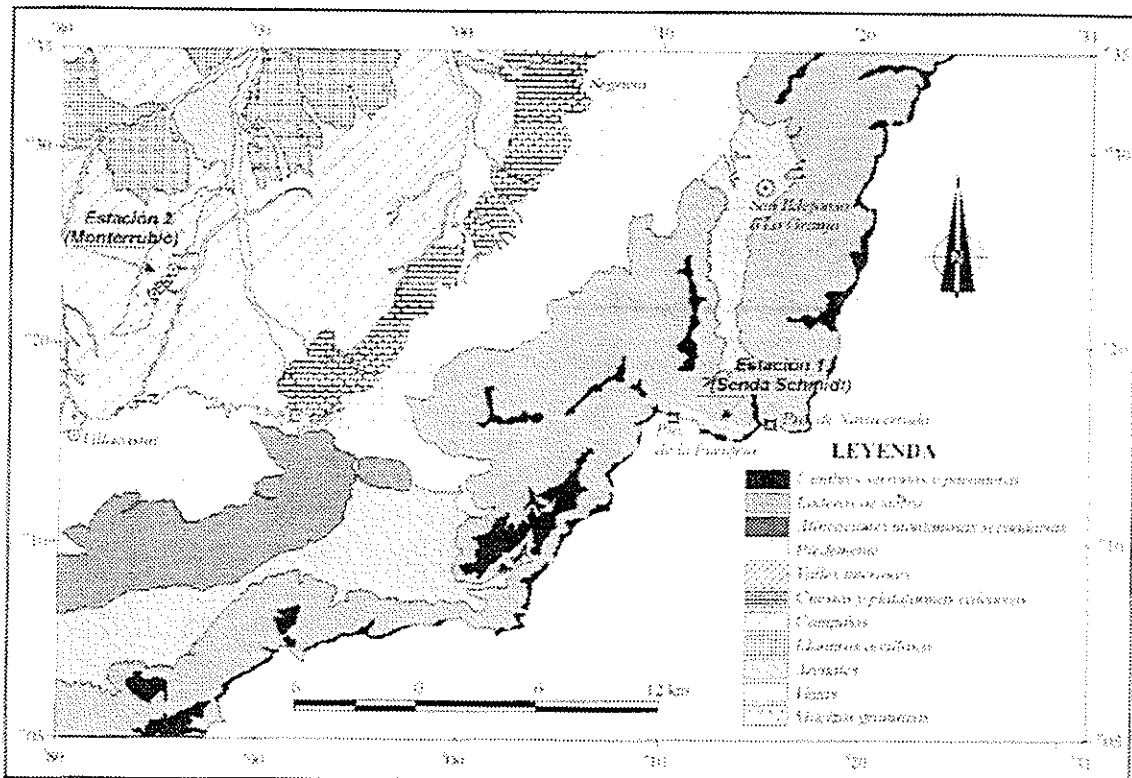


Figura 1. Localización de las dos estaciones estudiadas en el contexto geomorfológico de la vertiente septentrional de la Sierra de Guadarrama. Las coordenadas están referidas a la zona 30 UTM.

El grueso del análisis ha consistido en un tratamiento estadístico de los datos de tiempo de exposición y profundidad de la erosión. El hecho de que los dos lugares muestreados presenten unas características fisiográficas bien distintas ha permitido además analizar la influencia de otros factores que *a priori* intervienen en el proceso erosivo (pendiente, orientación, textura del suelo...), también mediante análisis estadísticos.

2. ÁREAS DE ESTUDIO

2.1 Senda Schmidt

El primer área de muestreo corresponde a un camino bien conocido dentro de la Sierra de Guadarrama: la Senda Schmidt, localizada dentro de los denominados 'Montes de Valsaín'. Más concretamente, se sitúa a media ladera de la falda norte de Siete Picos, uniendo los puertos de Navacerrada y de la Fuenfría (Fig. 1).

Desde un punto de vista geomorfológico, la Senda se sitúa en la unidad de 'laderas' (Pedraza *et al.* 1990). Dicha unidad se desarrolla mayoritariamente sobre sustratos de monzogranitos porfídicos de grano grueso, y sólo una pequeña parte próxima al puerto de la Fuenfría lo hace sobre gneises glandulares (ITGE 1990). En

determinados sectores del camino aparece un recubrimiento de formaciones superficiales coluvionares, desarrolladas sobre todo a expensas del sustrato monzogranítico. La senda discurre por un intervalo de altitud media sobre el nivel del mar entre 1780 m y 1870 m. La orientación general de la ladera sobre la que se sitúa es norte y su pendiente media es de 23°.

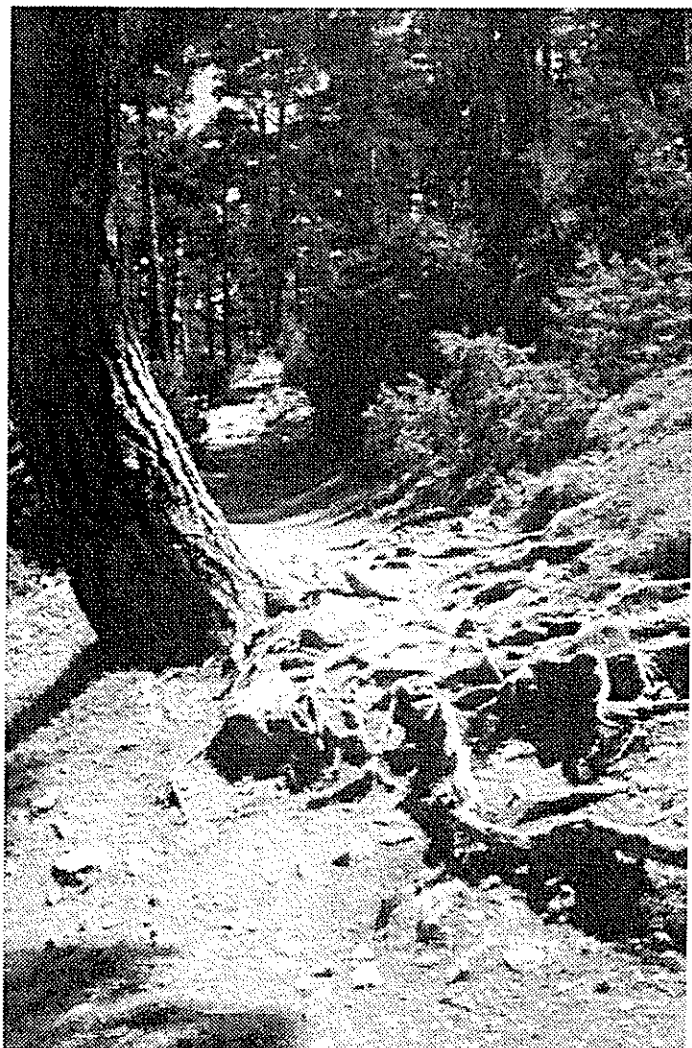


Figura 2. Raíces expuestas de *Pinus sylvestris* en la Senda Schmidt (Valsain, Segovia).

El clima es templado de latitudes medias, mesotérmico (Csbk'3j, de Köppen), de tipo mediterráneo continentalizado (por la distancia a la costa) y con influencia de montaña. La temperatura media es de 6° C, mientras que la precipitación media es de unos 1400 mm anuales, concentrados entre los meses de octubre y mayo.

El tipo de suelo es una asociación de leptosoles líticos, úmbricos y dístricos, de textura franco-arenosa. En lo que a la vegetación se refiere, la especie dominante en este entorno es *Pinus sylvestris*, con un sotobosque acompañante formado por enebro rastrero (*Juniperus communis* subsp. *alpina*), piorno serrano (*Cytisus balansae*) y cambrón o cambroño (*Adenocarpus hispanicus*). La Senda tiene un uso recreativo casi exclusivo, generalmente asociado a senderismo y ciclismo de montaña.

2.2 . Encinares de Monterrubio

El segundo área de muestreo se localiza en el término municipal de Monterrubio (Segovia). Concretamente sobre las laderas vertientes al arroyo Chico (afluente directo del río Moros), en el pequeño macizo granítico de Monterrubio-Lastras del Pozo (ITGE 1991) (Fig. 1).

Estas laderas presentan un perfil mayoritario rectilíneo, y su desarrollo medio oscila entre los 970 m y los 1040 m de altitud sobre el nivel del mar. Su orientación general es hacia el sureste, y su pendiente media de 14°. Esta configuración general sólo se encuentra modificada por el encajamiento de escasos pero profundos barrancos, afluentes del arroyo Chico. El sustrato de esas laderas está constituido por

monzogranitos biotíticos de grano medio y medio-grueso (ITGE 1991). Los suelos de esta localización son muy delgados (cambisoles dísticos) y con frecuencia inexistentes o escasamente desarrollados (leptosoles líticos), de textura franco-arcillo-arenosa.

El clima es igualmente templado de latitudes medias, mesotérmico (Csbk_{3j} de Köppen), de tipo mediterráneo continentalizado, con gran déficit hídrico en el periodo estival y frecuentes ciclos de helada en el periodo invernal (media de 53 días de helada al año). La precipitación media ronda los 450 mm anuales, mientras que la temperatura media anual se sitúa entre 11 y 12 °C.

La vegetación dominante, casi exclusiva, es un encinar de *Quercus ilex* muy abierto. La forma mayoritaria de la masa es la de monte bajo, debido a aprovechamientos históricos para obtención de combustible. Dicho encinar carece prácticamente de los estratos arbustivo y herbáceo (si exceptuamos la presencia esporádica de *Juniperus oxycedrus*, *Juniperus communis*, *Cistus laurifolius*, *Lavandula pedunculata* y *Thymus mastichina*), probablemente debido a una conjunción de causas naturales (altas pendientes en la proximidad del encajamiento fluvial del arroyo Chico) y antrópicas (sobrepastoreo y quemadas selectivas de aclarado).

3. METODOLOGÍA

3.1. Técnicas dendrocronológicas. Dendrogeomorfología

La dendrocronología es la ciencia que estudia las variaciones de las condiciones ambientales mediante el análisis de la secuencia anual de crecimiento de los anillos en los árboles.

En síntesis, el proceso de formación de anillos de crecimiento es el siguiente: cada año se añade una nueva capa de madera a la ya existente, la cual se dispone entre el último anillo formado y la corteza. En primavera, cuando la disponibilidad de agua es máxima —en condiciones normales—, comienza la formación de nuevas células, cuyo número y tamaño va disminuyendo progresivamente hasta la llegada del otoño. En este periodo el anillo finaliza su crecimiento, no comenzando la formación de otro nuevo hasta la primavera siguiente. En la primera fase de crecimiento se forma la madera denominada 'temprana' (*earlywood*), que se caracteriza por presentar tonos claros y por estar constituida por células delgadas y de mayor diámetro que las formadas en el siguiente estadio. En la etapa final de desarrollo se forma la madera definida como tardía (*latewood*), que presenta colores oscuros, siendo las células gruesas y pequeñas en diámetro.

En general, muchas coníferas —entre ellas *Pinus sylvestris*—, se ajustan bien a este patrón de desarrollo, ya que tienen anillos regulares en los que se define claramente la madera temprana y la tardía (Baillie 1982; Schweingruber 1988). Sin embargo, la encina (*Quercus ilex*) es un claro ejemplo de especie con crecimientos angulares y poco claros (Ferrés 1985); igualmente, la existencia de falsos anillos y de radios medulares pluriseriados dificulta la interpretación de la edad y del patrón de crecimiento de esta especie (Loissant & Rapp 1971; Susmel *et al.* 1976; Ferrés 1985).

En Estados Unidos, autores como La Marche (1963, 1968), Eardley & Viavant (1967), Carrara & Carroll (1979) y Danzer (1996), 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 (Vadekerckhove *et al.* 2001).

El procedimiento empleado para la estimación de tasas de erosión a partir de raíces expuestas se basa en el hecho siguiente: 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 (Fig. 3).

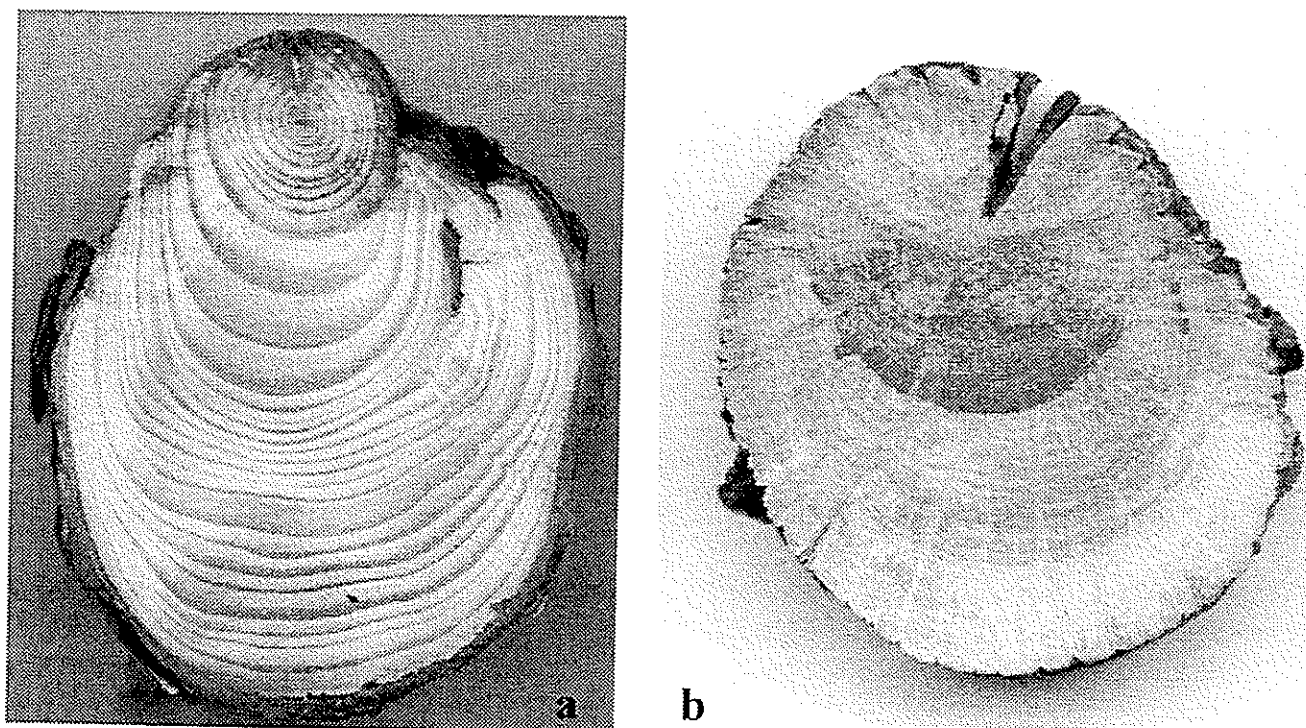


Figura 3. Secciones pulidas de raíces expuestas de: (a) *Pinus sylvestris*, procedente de la Senda Schmidt; (b) *Quercus ilex*, procedente de encinares de Monterrubio.

Para determinar la tasa de denudación existente en el entorno de la raíz expuesta, es necesario conocer la distancia que media entre la parte superior de la raíz y el suelo, al igual que el intervalo temporal que ha permanecido la misma expuesta. Si se dividen ambos factores, se obtiene una aproximación a la tasa de erosión en mm/año.

3.2. Muestreo de campo

La toma de muestras de raíces expuestas en ambas localizaciones se llevó a cabo durante el mes de agosto de 2001. Antes de proceder a la corta de cada sección se realizó una descripción detallada de las características del entorno de la raíz, almacenando dicha información en una ficha diseñada a tal efecto. La información recopilada fue la siguiente: localización geográfica (coordenadas UTM); cota; orientación en grados sexagesimales (tanto de la ladera como de la raíz); textura del suelo en el entorno de muestreo; distancia de la sección de raíz al árbol; pendiente de la ladera y pendiente de la localización específica de la raíz (ambas expresadas en grados). Finalmente se midió la profundidad de rebajamiento existente desde la parte superior de la raíz hasta la superficie actual al suelo, tomando medidas a ambos lados, al objeto de estudiar tasas máximas, mínimas y medias.

Las secciones se cortaron con un sierra de mano, obteniendo testigos cilíndricos de unos 15 cm de longitud. Aquellas raíces muertas, o en las que no se conservaba todo el patrón concéntrico, fueron desechadas. En la senda Schmidt se recolectaron 34 secciones útiles de raíces expuestas de *Pinus sylvestris*, y en Monterrubio 32 de *Quercus ilex*. De las muestras procedentes de Monterrubio, sólo 18 resultaron válidas para su posterior tratamiento estadístico, debido a las dificultades para el reconocimiento de los anillos.

En todos los casos se tomaron muestras de raíces orientadas según la dirección de máxima pendiente de la ladera. Es en éstas donde mejor se reflejan los valores de denudación, ya que de lo contrario la raíz tiende a actuar como un pequeño 'dique', reteniendo sedimentos por un lado y quedando descalzada por el otro. Además, únicamente se obtuvieron secciones de aquellas raíces expuestas que estaban a una distancia del tronco superior a un metro y medio, pues a distancias inferiores la exposición puede estar relacionada con el crecimiento del árbol (Carrara & Carroll 1979). Finalmente, se tomaron muestras de los suelos del entorno, con objeto de determinar su textura y densidad, siendo este último un dato esencial para transformar las tasas de erosión de mm/año a t/ha/año, y permitir por tanto su comparación con otros datos de la bibliografía.

3.3. Preparación y análisis dendrocronológico de las muestras

Las secciones de las raíces muestreadas se dejaron secar al aire libre durante dos meses. Pasado este tiempo se obtuvieron dos láminas a partir de la sección inicial, esta vez de aproximadamente 1,5 cm de espesor. Este proceso se aprovechó para mejorar la perpendicularidad en el corte. Posteriormente fueron pulidas. El resultado obtenido fue óptimo en las muestras de *Pinus sylvestris*, ya que los anillos se visualizaban directamente con claridad, pero no así en las muestras de *Quercus ilex*, las cuales tuvieron que ser teñidas con azul de metilo al 10 % para poder realizar su análisis dendrocronológico (Fig. 3b).

A continuación, se escaneó una de las láminas de cada muestra a una resolución de 1200 ppp, para proceder al estudio del patrón de crecimiento anual de

los anillos. Así, se contabilizaron el número de anillos que presentan un modelo de crecimiento excéntrico, el cual sirve de bioindicador para determinar el tiempo desde el que la raíz ha perdido la parte superior de la corteza, y por tanto como una aproximación bastante válida para conocer la edad del inicio de la erosión en la posición en la que la parte superior de la superficie del terreno enrasaba con la de la raíz.

Sin embargo, en las muestras de *Quercus ilex* esta interpretación presenta un cierto grado de incertidumbre, ya que en zonas con climas de tendencia semiárida, al cual se aproxima la localización de Monterrubio, la encina tiende a formar falsos anillos cuando se producen precipitaciones intensas después de un prolongado periodo sin apenas lluvia.

Por su parte, *Pinus sylvestris* puede llegar a presentar anillos con un crecimiento anual discontinuo. Esta anomalía puede deberse: a un retraso, o a una deficiencia de hormonas de crecimiento, durante la fase temprana (*earlywood*) de desarrollo del anillo (Panshin & deZeeuw 1970); a la falta de humedad en el suelo; a la competencia por la luz y los nutrientes; a la reducción progresiva de la anchura de los anillos a medida que se incrementa la edad del árbol (Fritts 1976), etc., lo que también podría estar introduciendo una cierta variación en el análisis con pino silvestre. No obstante, se han considerado todos los anillos de las raíces muestreadas, ya que se ha trabajado con secciones completas de las mismas.

4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

A las medidas de tasas de denudación de ambos emplazamientos se les aplicó un análisis estadístico descriptivo, en el que se calcularon las medidas de centralización, dispersión y forma. Asimismo, se realizó un análisis del grado de correlación existente entre las variables, para determinar la existencia de correlación lineal significativa entre los factores ambientales caracterizados en el muestreo y la variable tasa de erosión media. Dicho análisis se complementó con un análisis multifactor de la varianza (ADEVA), con el fin de determinar qué factores de los estudiados tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la variable dependiente. Finalmente, en función de los resultados obtenidos en los análisis previos, se construyeron funciones de ajuste con las variables que mejor modelizan las tasas de erosión existentes.

4.1. Estadística descriptiva

Para la Senda Schmidt, a partir del análisis estadístico preliminar realizado, se estableció como primera aproximación que la población de la que procede la muestra no se ajusta a una distribución normal, ya que los valores de asimetría y curtosis estándar están fuera del intervalo (-2,2) (Tabla 1). Igualmente, a un nivel de confianza del 90%, corrobora esta hipótesis el p-valor que se obtiene al aplicar el estadístico de Kolmogorov-Smirnov, que es inferior a 0,10.

Medidas estadísticas	Tasa de erosión máxima	Tasa de erosión mínima	Tasa de erosión media
Media	2,9	2,0	2,6
Mediana	2,2	1,6	2,1
Media geométrica	2,3	1,6	2,1
Valor máximo	11,3	6,6	8,9
Valor mínimo	0,7	0,5	0,6
Rango	10,6	6,1	8,3
Varianza	6,0	2,3	4,1
Desviación típica	2,5	1,5	2,0
Asimetría estándar	4,8	4,2	4,5
Curtosis estándar	4,6	3,3	3,9

Tabla 1. Valores de los parámetros estadísticos aplicados sobre las muestras de datos máximos, mínimos y medios obtenidos en la senda Schmidt.

Para conseguir que el conjunto de medidas de la variable 'tasa de denudación media' ajustara a una distribución normal se realizó una transformación logarítmica de los datos. De este modo la distribución pasa a ser de tipo normal.

La estimación del valor medio de la variable normal mediante inferencia estadística permitió, a un nivel de confianza del 95%, obtener el valor medio de la tasa de erosión existente en la senda Schmidt durante el periodo de exposición de las raíces muestreadas (101 años), que se encuentra dentro del intervalo 1,7- 2,6 mm/año.

En el caso de Monterrubio, del análisis estadístico descriptivo realizado para la variable 'tasa de erosión media' se puede deducir que la población de la que procede la muestra sigue una distribución normal. Así lo demuestran los valores de curtosis y asimetría estándar, que se encuentran dentro del intervalo (-2,2) (Tabla 2), así como el p-valor que se obtiene al aplicar el estadístico de Kolmogorov-Smirnov, que es superior a 0,10. En consecuencia, a un nivel de confianza del 90%, no se puede rechazar la hipótesis de que la muestra procede de una distribución normal.

Sin embargo, con el objetivo de hacer más centrada la muestra, también en este caso se realizó una transformación logarítmica de las medidas, para de este modo conferir mayor exactitud a las conclusiones derivadas de los análisis estadísticos realizados.

Así, con un nivel de significación del 95%, el valor medio de la variable 'tasa de erosión' se encuentra dentro del intervalo 1,1-1,8 mm/año, para un periodo de exposición de 42 años.

Medidas estadísticas	Tasa de erosión máxima	Tasa de erosión mínima	Tasa de erosión media
Media	1,8	1,3	1,6
Mediana	1,7	1,2	1,4
Media geométrica	1,6	1,3	1,4
Valor máximo	3,8	3,5	3,6
Valor mínimo	0,6	0,2	0,5
Rango	3,2	3,3	3,1
Varianza	0,6	0,6	0,6
Desviación típica	0,8	0,8	0,8
Asimetría estándar	1,6	2,2	2,0
Curtosis estándar	1,5	2,0	1,5

Tabla 2. Valores de los parámetros estadísticos aplicados sobre las muestras de datos máximos, mínimos y medios obtenidos en Monterrubio.

4.2. Análisis del grado de correlación existente entre las variables utilizadas en el estudio

Con el fin de determinar el grado de correlación existente entre cada una de las variables tenidas en cuenta en este estudio y la variable tasa de denudación media, se realizó una matriz de correlación aplicando el coeficiente lineal de Pearson, que varía entre -1 y +1.

Asimismo, se definió si la relación lineal entre cada par de variables era o no significativa. Para ello se realizó un contraste de hipótesis, en el que la hipótesis nula es que no hay relación entre las variables, es decir $\rho = 0$.

En el caso de la Senda de Schmidt, a un nivel de confianza del 95%, no hay evidencias de que exista correlación estadísticamente significativa entre las variables.

Sin embargo, debido a que el significado estadístico de los valores de orientación (en las variables 'orientación en ladera' y 'orientación local') no se corresponde con el significado físico de los mismos, se volvió a cuantificar el grado de relación existente entre los datos de tasa de erosión medidos y las correspondientes orientaciones de cada punto de muestreo, utilizando para ello el coeficiente de correlación clasificado de Spearman. De este modo, tras realizar el contraste de hipótesis anteriormente explicado se determinó, a un nivel de confianza del 95%, que no existía correlación estadísticamente significativa entre dichas variables.

Por otro lado, también en Monterrubio se llevó a cabo un análisis de la correlación existente entre las variables, obteniéndose a un nivel de significación del 95%, la existencia de correlación lineal significativa entre las variables log ('tasa de erosión media') y 'pendiente de la ladera'. También en este caso se determinó, mediante el coeficiente de Spearman, la presencia o no de correlación lineal significativa entre 'orientación de ladera' y 'orientación de raíz', frente al log ('tasa de erosión media'). Con todo, a un nivel de confianza del 95%, no se obtuvieron datos positivos al respecto.

4.3. Análisis Multifactor de la Varianza (ADEVA)

El análisis multifactor de la varianza (ADEVA) permitió determinar aquellos factores que influyen de modo significativo en la variable logaritmo de la tasa de erosión media.

A la vista de los valores de probabilidad obtenidos en la Senda Schmidt, a un nivel de confianza del 95%, únicamente la variable 'situación dentro del camino', contribuye de modo significativo a explicar la variabilidad que presentan las medidas de la variable respuesta.

Asimismo, se realizó un análisis de comparación múltiple entre los niveles definidos en el factor 'situación dentro del camino', el cual permitió comparar las medias de los niveles dos a dos en dicho factor.

Si se considera como punto de inicio del muestreo el más próximo al puerto de Navacerrada, existen diferencias significativas entre las tasas de erosión medidas en los primeros ochocientos metros de Senda muestreada y el resto (Tabla 3).

Metodo: 95.0 por ciento MDS

<i>Situación (X-UTM)</i>	<i>Nº muestras</i>	<i>Media</i>	<i>Desviación típica</i>	<i>Grupos homogéneos</i>
2 (413094-413868)		1,93156	1,22261	X
1 (411332-413094)	7	2,33446	1,17845	X
3 (413868-414680)		3,58791	1,22204	X
	5			
	2			
<i>Contraste</i>			<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
1 - 2			* 1,20859	
1 - 3			*-1,53693	0,418003
2 - 3			*-1,85751	0,519477

Tabla 3. Análisis de comparación múltiple para el logaritmo de las 'tasas de erosión media' frente al factor 'localización dentro de la senda'.

4.4. Desarrollo de modelos de ajuste entre aquellas variables que presentan correlación significativa en Monterrubio

Para Monterrubio se midió la relación existente entre el logaritmo de las tasas de erosión media estimadas y la variable 'pendiente de la ladera'. Como resultado, la

función matemática que mejor se ajusta a los valores de la variable bidimensional es una recta cuyos parámetros son los que aparecen reflejados en la Figura 4.

En este caso, el coeficiente de determinación (R^2) es igual al 22 %, siendo el coeficiente de correlación igual a $-0,47$. Asimismo, el error estándar de los residuos es igual a $0,446468$, mientras que su valor medio absoluto es $0,326935$.

Figura 4

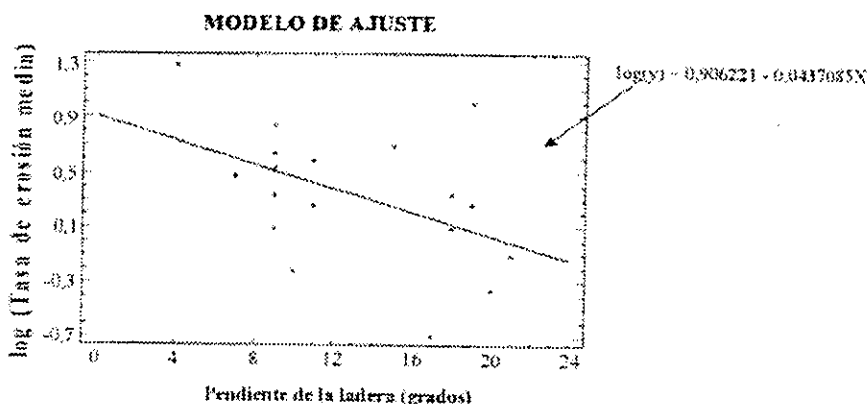


Figura 4. Modelo de ajuste que relaciona la variable pendiente de la ladera con el logaritmo de la tasa de erosión existente en Monterrubio.

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El tratamiento estadístico de los datos 'tiempo de exposición' y 'profundidad de rebajamiento' ha permitido obtener, a un nivel de confianza del 95%, unos intervalos de erosión media para las dos estaciones estudiadas: 1,7- 2,6 mm/año, en la Senda Schmidt (para un periodo de 101 años de exposición), y 1,1- 1,8 mm/año en Monterrubio (para un periodo de 42 años de exposición).

La transformación de los datos medios de erosión de mm/año a t/ha/año, mediante la consideración de la densidad media de los suelos erosionados ($1,7 \text{ t/m}^3$ en ambos casos), ha determinado para la Senda Schmidt unas tasas de erosión media muy superiores a las estimadas por el Mapa de Estados Erosivos de la Cuenca del Duero (López *et al.* 1987): 29 - 44 t/ha/año para la Senda Schmidt, frente a 0-5 t/ha/año para el pinar de Valsaín (donde se sitúa la Senda). Aún más, para los últimos diez años de exposición, a un nivel de significación del 95%, las tasas se sitúan en un rango que va desde 102 t/ha/año a 170 t/ha/año. La explicación del incremento tan elevado de dichos valores se atribuye al uso recreativo intensivo en un espacio reducido. La compactación que produce el pisoteo disminuye la infiltración,

aumentando el poder erosivo del impacto de las gotas de lluvia así como de la escorrentía superficial.

Por otro lado, para Monterrubio la tasa de erosión media estimada, a un nivel de confianza del 95%, se sitúan en un intervalo que va de 19 t/ha/año a 31 t/ha/año, frente a los 25-50 t/ha/año de su entorno (López *et al.* 1987).

La influencia de distintos factores ambientales en la variable erosión ha constituido el segundo conjunto de análisis y resultados.

En la Senda Schmidt, el análisis de la varianza (ADEVA) realizado sobre la variable log (tasa de erosión media), indica que el factor 'localización dentro de la senda' es el único que tiene influencia estadísticamente significativa sobre la variable dependiente. El análisis de comparación múltiple realizado indica que las tasas de erosión son significativamente superiores en los primeros ochocientos metros del camino, los más próximos al puerto de Navacerrada, lo que parece indicar que un porcentaje importante de los visitantes de la Senda realizan trayectos parciales a lo largo de la misma a partir de ese punto (Fig. 4).

La sexta revisión forestal del pinar de Valsaín (TRAGSATEC 2000) ofrece los siguientes datos de visitantes para la Senda Schmidt (Tabla 4). Dichos datos son superiores a la capacidad normal anual medida obtenida por el método propuesto en la 'quinta revisión', presentando un déficit teórico que es diez veces inferior a la capacidad real.

	Número de visitantes
Máxima presencia en día de máxima afluencia(<i>dma</i>) $a=m \cdot (c/v) / a=m \cdot (2 \cdot d/v)$	393
Afluencia total estival en <i>dma</i> , (12,00h - 17,00h) $atdma=40 \cdot dma$	15.720
Afluencia total estival. (12,00h -17,00h) $ate=(40+5) \cdot dma$	17.685
Afluencia total anual, (12,00h -17,00h) $ata=(40+5+5) \cdot dma$	19.650
Afluencia total estival en <i>dma</i> , todo el día $ate=atdma / 0,8$	19.650
Afluencia total estival, todo el día $ate=ate / 0,8$	22.106
Afluencia total anual, todo el día $ata=ata / 0,8$	24.563

Tabla 4. Datos de afluencia de visitantes al camino Schmidt: *dma*, día de máxima afluencia; *c*, vehículos contados en aparcamiento; *v*, vehículos utilizados por grupos; *m*, número de personas en grupos; *d*, personas que pasan.

Por el contrario, las conclusiones que se derivan del análisis dendrocronológico realizado en las muestras de *Quercus ilex* de Monterrubio llevan asociadas una serie de incertidumbres, debido a su tendencia a formar falsos anillos. Sin embargo, el intento de tratar de calibrar su utilización como bioindicador para determinar tasas de erosión

se justifica por el hecho de que la encina ocupa, tanto formando masas puras como mixtas (donde se mezcla con otras especies como el *Pinus halepensis*), una parte muy importante de la superficie forestal de la Península Ibérica (ICONA 1974, 1980).

En todo caso, para el encinar de Monterrubio se determinó la existencia de correlación lineal inversa, estadísticamente significativa, entre las variables log ('tasa de erosión media') y la 'pendiente de la ladera'. Con todo, el resultado anterior no permite establecer conclusiones al respecto, debido a los siguientes factores: el coeficiente de correlación es $-0,47$; la variable dependiente únicamente explica el 22% de las tasas de erosión existentes; sólo dieciocho de las 32 muestras tomadas en campo resultaron ser útiles para su análisis estadístico; la tendencia de las encinas a formar falsos anillos.

En relación con la metodología utilizada, es preciso destacar que la muerte del tejido de la parte superior de la raíz se debe básicamente al pisoteo y a la acción del ganado, y no al hecho de la exposición en sí. El dato de la primera exposición es esencial para obtener tasas exactas de rebajamiento. De esta manera, sólo si el tiempo en el que se produce la destrucción de la corteza de la parte superior de la raíz es muy próximo a su exposición, las conclusiones obtenidas en este trabajo son válidas. Este planteamiento podría valer para el caso de Valsaín, dado que la afluencia masiva y continuada de visitantes hace pensar que no transcurre mucho tiempo entre la primera exposición y la desaparición de la corteza. Pero desconocemos el retraso existente entre la primera exposición y la muerte del tejido en el caso de Monterrubio, por lo que en este caso las conclusiones deben tomarse con muchas más reservas.

Precisamente la continuación del trabajo que ahora hemos iniciado pretende resolver las incertidumbres anteriormente planteadas. Para ello se procederá a:

(a) realizar una sincronización de los anillos de crecimiento entre distintas muestras, utilizando técnicas estandarizadas en dendrocronología, con el doble objetivo de calibrar los patrones de crecimiento de las raíces y sincronizar la evolución temporal de las tasas de erosión.

(b) analizar los cambios anatómicos —sufridos como consecuencia de la exposición— en la estructura de las células de la madera temprana (*earlywood*), a partir de secciones delgadas, como único criterio preciso que permite determinar el primer año de exposición (H. Gärtner, com. pers.).

6. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo indican que la utilización de raíces expuestas como indicadores geomorfológicos para cuantificar la erosión existente en un territorio se muestra como un método con grandes posibilidades de aplicación. Esta técnica puede ser especialmente útil, bien para caracterizar la influencia antrópica en los procesos de erosión hídrica, como en el caso aquí desarrollado, bien para interpretar variaciones climáticas en zonas donde la influencia antrópica sea mínima.

En este contexto, no todas las especies presentan igual aptitud para realizar análisis dendrocronológicos. Así, mientras las coníferas muestran anillos de crecimiento fácilmente observables, no ocurre lo mismo con las frondosas. *Quercus*

illex, por ejemplo, desarrolla anillos poco nítidos y con crecimientos irregulares. Además, la existencia de anillos falsos y radios medulares pluriseriados incrementa la dificultad para su interpretación, haciendo precisas técnicas de tinción y aplicación de lavados en alcohol.

Las estimaciones realizadas tienen un cierto grado de incertidumbre. Éste se refiere sobre todo al hecho de que la corteza puede mantenerse con posterioridad a la exposición de la raíz, y por tanto los anillos pueden seguir creciendo. En este sentido, sin el análisis de cambios en la estructura de las células (a partir de la realización de láminas delgadas) no sería posible determinar con exactitud el primer año de exposición. Este proceso permitiría obtener tasas muy precisas, y constituirá el siguiente paso de la investigación ahora iniciada. Sin embargo, las estimaciones realizadas en este trabajo pueden considerarse válidas como una primera aproximación. Mucho más en el caso de Valsaín, dado que la presencia continuada de senderistas hace poco probable el mantenimiento de la corteza durante largos periodos de tiempo con posterioridad a su primera exposición.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las facilidades prestadas por Javier Donés y por la guardería forestal del Centro Montes de Valsaín para la toma de muestras en la Senda Schmidt, y por el Servicio Territorial de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León para la toma de muestras en Monterrubio. Mar Génova, Ángel Fernández, José María Postigo, Alberto Rincón, Ricardo García y Holger Gärtner proporcionaron comentarios útiles durante la realización del trabajo. Finalmente, queremos reconocer la ayuda prestada por Alberto Díez y Rodolfo Masegosa en la toma de muestras de campo, y por Miguel Ángel Moreno y Mariano Carabias en el cortado y pulido de secciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Baillie, M.G.L. (1982). *Tree-ring dating and archaeology*. Croom Helm, London.
- 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.
- Danzer S.R. (1996). Rates of slope erosion determined from exposed roots of ponderosa pine at Rose Canyon Lake, Arizona. En, *Tree Rings, Environment, and Humanity. Radiocarbon 1996, Proceedings of the international conference, Tucson, Arizona, 17-21 May 1994*. (J. Dean,; D.M. Meko & T.W. Sewtnam, eds.). Department of Geosciences, The University of Arizona, Tucson, Arizona, 671-678.
- Eardley, A.J. & Viavant, W. (1967). Rates of denudations as measured by Bristlecone Pines. Cedar Breaks, Utah. *Utah Geological and Mineralogical Survey, Special Studies*, 21, 13 pp.
- Ferrés, L. (1985). Creixement radial i producció primària neta aèria a l'alzinar de la Castanya (Montseny, Barcelona). *Orsis*, 1. 71 - 79.
- Fritts, H.C. (1976). *Tree rings and climate*. Academic Press, London.
- ICONA. (1974). *Inventario Forestal Nacional. Región Nordeste*. Ministerio de Agricultura, Madrid.
- ICONA. (1980). *Las frondosas en el primer Inventario Nacional Forestal*. Ministerio de Agricultura, Madrid.

- ITGE (1990). *Mapa Geológico de España, Escala 1:50.000, Cercedilla (508)*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid.
- ITGE (1991). *Mapa Geológico de España, Escala 1: 50.000, Valverde del Majano (482)*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
- 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.
- Loissant, P. & Rapp, M. (1971). Répartition de la matière organique, productivité et cycles des éléments minéraux dans des écosystèmes de climat méditerranéen. En *Productivité des Écosystèmes Forestiers*. (P. Duvigneaud, ed.) UNESCO, Paris, 597 – 611.
- López, F.; Pérez-Soba, A.; Aguiló, J.; Rabade, J.M.; Montalvo, J.; Carles, S.; Cocero, A.; Hernández, L. & Ortega, M. (1987). *Mapa de Estados Erosivos. Cuenca Hidrográfica del Duero*. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid.
- Panshin, A.J. & deZeeuw, C. (1970). *Testbook of wood technology, Volume 1: Structure, identification, uses and properties of the commercial woods of the United States and Canada*, New York, McGraw-Hill Book Co., 705 pp.
- Pedraza, J.; Villasante, R.; Centeno, J.D. & Fernández, P. (1990). Geomorfología. En *Mapa Geológico de España, Escala 1:50.000, Cercedilla (508)*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid.
- Schweingruber, F.H. (1988). *Tree rings: basics and applications of dendrochronology*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Susmel, L.; Viola, F. & Bassato, F. (1976). Ecologia della lecceta del Supramonte di Orgosolo (Sardegna Centro-orientale). *Annali del centro di Economia Montana delle Venezie*, 10. 260 pp.
- TRAGSATEC S.A. (2000). *Proyecto de sexta revisión de la ordenación del Monte N° 2 del C.U.P. de Segovia "Pinar de Valsain"* TRAGSATEC S.A., Madrid (inédito).
- Vanderkerckhove, L.; Muys, B.; Poesen, J.; De Weerd, B.; & Coppé N. (2001). A method for dendrochronological assesment of medium-term gully erosion rates. *Catena*, 45. 123-161.