



Dendrocronología: datación de materiales, formas y eventos a través de los anillos de los árboles

*Dendrochronology: dating materials, landforms
and events by means of tree rings*

Génova, M. ⁽¹⁾; Díez Herrero, A. ⁽²⁾

(1) Departamento de Sistemas y Recursos Naturales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y Medio Natural (ETSIMFMN), Universidad Politécnica de Madrid (UPM). José Antonio Novais 10, 28040, Madrid, España. mar.genova@upm.es

(2) Departamento de Riesgos Geológicos y Cambio Climático, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Ríos Rosas 23, 28003, Madrid, España. andres.diez@igme.es

Resumen

La dendrocronología es el estudio de los anillos de crecimiento en la madera de troncos, ramas y raíces, que permite la datación del periodo de vida del árbol o arbusto, y de los fenómenos naturales o antrópicos que afectaron al mismo durante su ciclo vital. Con ello se pueden datar y caracterizar procesos geodinámicos (internos y externos), formas del relieve y depósitos-formaciones superficiales del Cuaternario con los que se asocian los materiales leñosos. Incluso se han utilizado para el análisis y prevención de peligros naturales como movimientos de ladera, aludes de nieve, inundaciones, terremotos o erupciones volcánicas. Los estudios dendrocronológicos aplicados al Cuaternario se concentran sobre todo en Norteamérica y Europa; y dentro de nuestro país en el centro peninsular (Sistema Central y cuencas del Duero y Tajo) y en el Pirineo. La presencia de árboles y arbustos en ambientes de casi cualquier latitud y continente, la elevada resolución temporal de la técnica (precisión anual e incluso estacional), y su amplio rango de aplicación (desde unos pocos años a varios milenios), hacen de la dendrocronología una técnica de datación muy versátil y útil para los estudiosos del Cuaternario, tanto por sí sola como complementada con otras, como la datación radiocarbónica.

Palabras clave: datación dendrocronológica; anillos de crecimiento; madera; dendrogeomorfología; radiocarbono.

Abstract

Dendrochronology is the study of the age of trees which, through the analysis of the tree rings in the wood of trunks, branches and roots, allows the dating of the life span of the tree or shrub, and of the natural or



anthropic phenomena that affected it during its life cycle. This makes it possible to date and characterise geodynamic processes (internal and external), landforms and surface deposits-formations of the Quaternary with those associated with the woody materials. They have even been used for the analysis and prevention of natural hazards such as slope movements, snow avalanches, floods, earthquakes or volcanic eruptions. Dendrochronological studies applied to the Quaternary are mainly concentrated in North America and Europe, and in Spain in the centre of the Iberian Peninsula (Central System and the Duero and Tagus basins) and the Pyrenees. The presence of trees and shrubs in environments of almost any latitude and continent, the high temporal resolution of the technique (annual and even seasonal precision), and its wide range of application (from a few years to several millennia), make dendrochronology a very versatile and useful dating technique for Quaternary scholars, both on its own and complemented with others (radiocarbon dating).

Key words: dendrochronological dating; tree-ring; wood; dendrogeomorphology; radiocarbon.

1. Introducción

El término dendrocronología, desde el punto de vista etimológico, procede de la agregación de tres morfemas de origen griego: dendro- (*δένδρον*, *dendron*, árbol); -crono- (*χρόνος*, *crónos*, tiempo); -logía (*λόγος*, *logos*, estudio). Por lo tanto, el significado literal de dendrocronología sería el estudio de la edad o tiempo de los árboles, tradicionalmente interpretado como el conocimiento de la edad de las leñosas utilizando los anillos de crecimiento de formación anual.

Aunque existen precedentes en la Edad Antigua y Edad Media de estudios de la edad de los árboles y del significado de los anillos de crecimiento, parece haber un acuerdo en reconocer a Leonardo Da Vinci como el primer autor que relacionó los anillos de los árboles, su crecimiento anual y su grosor con la variabilidad de los parámetros ambientales. Otro salto temporal en los estudios dendrocronológicos nos traslada a principios del siglo XX, cuando se establecieron las bases científicas y los principios metodológicos de esta disciplina. Sin embargo, sus leyes y principios, a pesar de tener su origen en teorías del siglo XVIII, no se enuncian explícitamente hasta el último tercio del siglo XX: uniformitarismo, factores limitantes, amplitud ecológica, agregado de factores, selección del emplazamiento, replicación y datación cruzada.

En paralelo al desarrollo histórico de la dendrocronología como disciplina científica, pero con cierto desfase y retraso, se fueron desarrollando sus subdisciplinas o aplicaciones a otras ciencias y técnicas, como la climatología (dendroclimatología), geomorfología (dendrogeomorfología), arqueología (dendroarqueología), etc. En el caso particular de las aplicaciones relacionadas con el Cuaternario y la datación de procesos, materiales y formas, los estudios más antiguos datan de finales del siglo XIX, con un florecimiento a partir de mediados del siglo XX.

2. Metodología

Los principios biológicos en los que se basa la dendrocronología parten del engrosamiento periódico y concéntrico de troncos y ramas que se manifiesta en gran parte de los árboles, y en otras leñosas, que habitan mayoritariamente en áreas de clima estacional. Los tejidos producidos durante el engrosamiento se acumulan y, de esta manera, se conserva un registro temporal y de carácter variable expresado en una sucesión de anillos de crecimiento, que varía en función de los diferentes factores que afectan al crecimiento en grosor y de los distintos acontecimientos que han ido sucediendo en la historia vital de cada ejemplar. Este registro (junto a otras marcas o señales que quedan incluidas en la madera) constituye una valiosísima fuente de información para diversos estudios científicos. El

objetivo general de los estudios dendrocronológicos es, básicamente, asegurar la datación de una secuencia de valores procedente de la medición de determinadas características de los anillos de crecimiento, para obtener una cronología con resolución, como mínimo, de carácter anual.

2.1. Los anillos de crecimiento

En las plantas leñosas (todas las gimnospermas y, dentro de las angiospermas, muchas dicotiledóneas) que forman madera en sus troncos, ramas y sistema radical, el crecimiento en grosor se debe a la actividad de un tejido especializado (meristemático), vivo, a diferencia de la mayor parte de las células que forman el leño, que están muertas cuando realizan su función. Este tejido, denominado cambium vascular, se sitúa entre la corteza y la madera y se encarga de constituir nuevas células en cada periodo vegetativo, las cuales realizan las funciones de transporte y sostén, ambas imprescindibles en el metabolismo y crecimiento de los vegetales. Las células que conducen la savia elaborada (floemáticas), formadas en dirección centrífuga, duran poco tiempo y se reabsorben o desprenden, componiendo la corteza junto a otros tejidos. Sin embargo, las células que se encargan tanto de la conducción de la savia bruta como del sostén, denominadas células xilemáticas, se van acumulando con el tiempo en dirección centrípeta, constituyendo el tejido vegetal denominado xilema secundario o, coloquialmente, leño o madera. Esta acumulación de células xilemáticas se organiza en forma de anillos más o menos identificables, según las características de cada especie.

Si la actividad del cambium es continua a lo largo del año (lo cual sólo sucede en ambientes climáticamente muy estables, como en determinadas áreas ecuatoriales), la madera constituida no presenta, en general, límites que permitan definir anillos. Si, por el contrario, el ambiente climático es estacional (con determinadas épocas secas y otras lluviosas, o frías y cálidas, como ocurre en la península

Ibérica), la actividad del cambium se restringe a la época favorable para el crecimiento (periodo vegetativo) y el resto del año permanece en estado de reposo o latencia. Estos ritmos de crecimiento se repiten año tras año de forma periódica y la madera presenta, habitualmente, anillos más o menos visibles que se corresponden con las diferentes variaciones estructurales que se producen durante las etapas de crecimiento. Nuevos anillos se van superponiendo sobre los ya existentes y, desde las áreas más internas del tronco, y por tanto más antiguas o constituidas hace más tiempo, hasta las más recientes, se pueden determinar cambios en el grosor u otras características de los anillos.

2.2. Material y métodos de muestreo

El análisis de los anillos de crecimiento se realiza sobre muestras procedentes de madera de muy distintos orígenes, desde árboles vivos o sus restos (tocones, material fósil o subfósil procedente de turberas, glaciares u otro tipo de yacimientos que hayan permitido la conservación de sus características estructurales), a vigas u otros elementos procedentes de la construcción de edificios históricos o yacimientos arqueológicos e, incluso, otros elementos elaborados con madera como muebles, instrumentos musicales, pinturas sobre paneles, retablos o esculturas, etc. En los restos más o menos fosilizados, maderas ya antiguas utilizadas en construcciones o en ebanistería o en determinados estudios que así lo requieran, la obtención de muestras se realiza mediante sierra para extraer una rodaja completa o, en su caso, cuñas incompletas; eso sí, preferiblemente en dirección transversal al plano de disposición de los anillos. Si los elementos son valiosos (paneles de pintura, instrumentos musicales, muebles antiguos, etc.), entonces se obtienen imágenes digitalizadas sobre las que se efectúan las mediciones.

En la extracción de muestras de árboles vivos, habitualmente se utiliza un tipo de sonda especialmente diseñada para este objetivo,

que se denomina barrena de Pressler (Fig. 1 A y B). Este instrumento, de uso frecuente en estudios e investigaciones de carácter forestal, permite extraer una pequeña muestra cilíndrica en dirección transversal y radial al tronco, que recoge una pequeña porción de cada uno de los anillos anuales formados, con un mínimo daño para los ejemplares muestreados, pues afecta casi exclusivamente al cambium vascular en una pequeñísima superficie.

2.3. Técnicas de análisis e interpretación

El objetivo principal que persiguen las técnicas dendrocronológicas es la datación precisa de secuencias de crecimiento, asegurando que cada secuencia comience y finalice en una fecha determinada y, por tanto, que cada valor se corresponda con el año en que fue formado el anillo. Para asegurar la correspondencia entre cada valor de la secuencia cronológica y el año en que fue constituido el anillo de crecimiento resulta necesario analizar previamente la sincronía entre distintas secuencias (replicación). La sincronización utiliza diferentes técnicas visuales, gráficas y estadísticas de comparación por solapamiento entre numerosas series de crecimiento, para identificar y corregir posibles irregularidades, tales como heridas o anillos múltiples, discontinuos o ausentes (Schweingruber, 2012).

La elaboración de cronologías con resolución anual se realiza a partir de datos que pueden obtenerse en la medición de diferentes características de los anillos de crecimiento. El grosor, anchura o incremento anual es la variable que más frecuentemente se utiliza, mientras que otras como las variaciones de densidad, el diámetro u otras características de los elementos conductores, o los porcentajes de isótopos, requieren una tecnología avanzada y cara. La medición de las características variables de los anillos se realiza y analiza de forma muy precisa, mediante equipos y programas informáticos específicos. Estos mismos programas permiten analizar los patrones y

tendencias del crecimiento de las secuencias temporales y, en su caso, las anomalías o perturbaciones que las modifican (Figs. 1 C y D). Las oscilaciones de las características de los anillos a lo largo del tiempo constituyen en la actualidad una de las principales fuentes de información indirecta de los eventos de carácter biótico, abiótico o antrópico y como indica Dean (1997), sus principales aplicaciones se centran en la datación de eventos pasados y la reconstrucción de las condiciones ambientales a lo largo del tiempo.

2.4. Datación dendrocronológica y datación radiocarbónica

La datación por métodos dendrocronológicos ha obtenido resultados realmente espectaculares, aunque quizás el más trascendente desde un punto de vista técnico ha sido la calibración de la datación mediante radiocarbono o carbono 14 (^{14}C), que se puede emplear para datar los últimos 40.000 años. Aunque se desarrollaron de forma independiente, ambos métodos comenzaron a entrelazarse en la década de 1950, cuando se proporcionaron muestras de madera datadas por dendrocronología para probar los métodos emergentes de ^{14}C . Así, comparando las dataciones estimadas por radiocarbono y las más precisas dendrocronológicas, se han podido modelizar las oscilaciones de la concentración de este isótopo en la atmósfera, que no es estable a lo largo del tiempo como se pensaba, sino que varía —entre otros muchos factores— a causa de la frecuencia e intensidad de las erupciones volcánicas, las oscilaciones de la actividad solar, las fluctuaciones en el momento geomagnético de la tierra, o las explosiones nucleares a cielo abierto y fugas radiactivas, en estos últimos casos como consecuencia de la actividad antrópica. De manera que actualmente son los anillos de los árboles fechados absolutamente la clave para la calibración de la datación radiocarbónica (Pearson *et al.*, 2021).

Los resultados de la datación por carbono se presentan como grupos de edad calculados

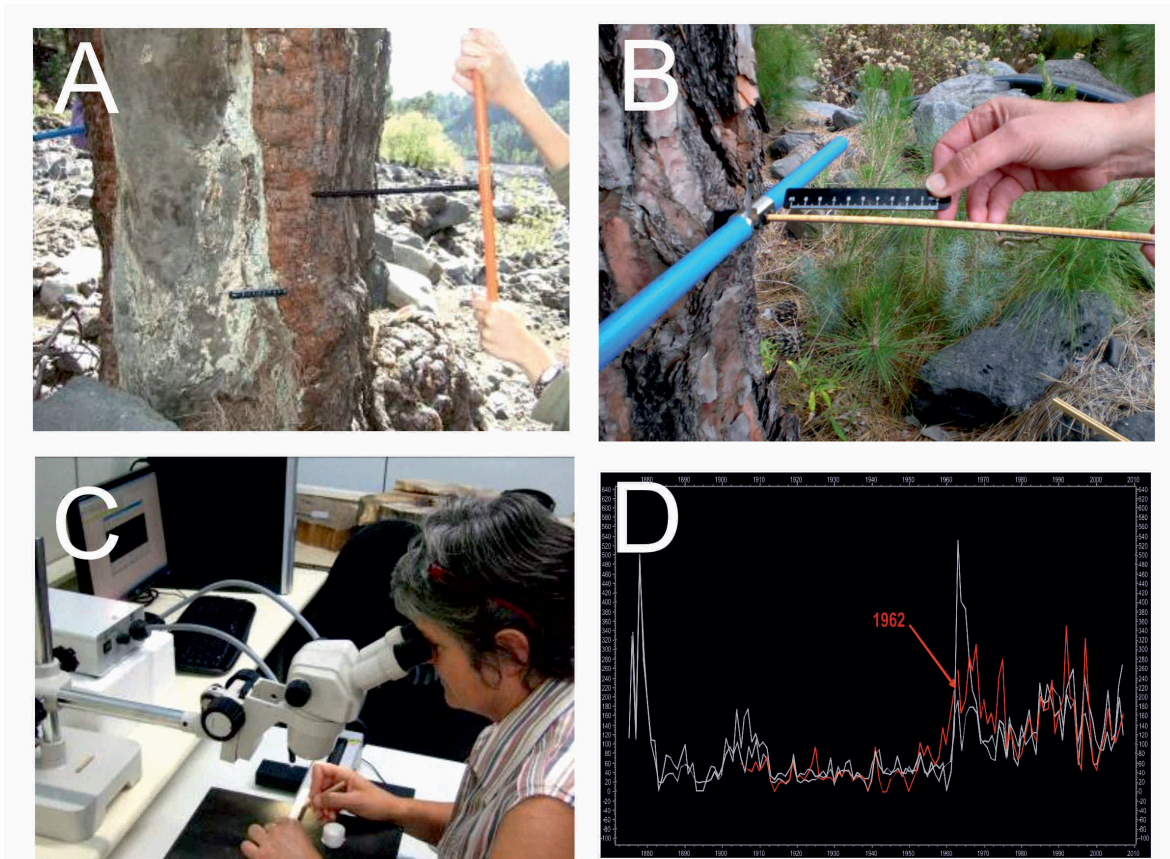


Figura 1. Etapas y tareas del estudio dendrocronológico: A) muestreo con barrena Pressler; B) extracción del testigo de madera con la barrena Pressler; C) conteo y medición de los anillos bajo lupa binocular y mesa de medición; D) secuencia de anchuras de los anillos, donde se aprecia un brusco aumento en el anillo correspondiente al año 1962.

Fuente: Díez-Herrero (2021), modificado.

Figure 1. Stages and tasks of the dendrochronological study: A) sampling with Pressler borer; B) extraction of the wood core with the Pressler borer; C) counting and measurement the rings under binocular magnifier and measuring table; D) ring width series showing a sharp increase in the ring corresponding to the year 1962. Source: Díez-Herrero (2021), modified.

por el método de intersección o el método de probabilidad, y deben incluir los resultados no calibrados, la curva de calibración utilizada, el método de calibración empleado y todas las correcciones hechas a los resultados originales antes de la calibración. El nivel de confianza correspondiente a los rangos de calibración también debe incluirse. A su vez, la datación radiocarbónica de muestras de madera de edad desconocida, y/o el uso de referencias históricas, ha servido para situar dichas muestras en un rango temporal aproximado. Dicha edad aproximada puede precisarse a través de la comparación de las

secuencias obtenidas con cronologías de anillos de crecimiento ya establecidas (cronologías maestras) y así se datan materiales antiguos que, a su vez, se utilizan para alargar las cronologías promedio (locales o regionales) hacia el pasado.

2.5. Aplicación a las dataciones de procesos y formas del Cuaternario: dendrogeomorfología

La dendrogeomorfología, como su propio nombre indica, es una rama científica que estudia las relaciones entre la dendrología

(conocimiento de los árboles) y la geomorfología (análisis de la génesis y distribución espacial de las formas del relieve terrestre). Puede considerarse que es una subdisciplina de la Dendrocronología, pues frecuentemente centra sus objetivos en la datación de las formas y procesos a través de los anillos de los árboles; o bien una especialidad dentro de la dendrocronología, pues estudia la relación de la variabilidad de dichos anillos con los factores ambientales.

Aunque existen numerosos trabajos dendrogeomorfológicos en la década de 1960, incluso publicaciones pioneras con anterioridad, no es hasta inicios de la década de 1970 cuando el geógrafo finlandés Jouko Alestalo (1971) acuña el término y establece sus principales aplicaciones. Los aspectos geomorfológicos que pueden ser analizados mediante fuentes de información y métodos dendrogeomorfológicos son casi tan diversos como ámbitos de estudio tiene la propia geomorfología, aunque podrían agruparse en tres grandes objetivos:

- Estudio de procesos geomorfológicos, tanto en lo referente a su área de actuación (extensión afectada o zona fuera de su ámbito de actividad), modalidad de actuación y de las acciones (erosión, transporte, sedimentación), magnitud o intensidad (profundidad, velocidad, energía, densidad...), como a su dimensión temporal (frecuencia y estacionalidad). En cualquier caso, el estudio de procesos geomorfológicos por medio de los árboles está basado en análisis de las perturbaciones que causan dichos procesos en el crecimiento y en la forma de los árboles, en especial de aquellas modificaciones que quedan registradas en los anillos, y que permiten la datación de los ritmos de los procesos con precisión anual o incluso estacional.
- Datación de formaciones superficiales y depósitos cuaternarios (aluviales, glaciares, lacustres, eólicos, coluviales...) que pueden contener los restos leñosos

datables por dendrocronología, estar depositados sobre ellos, o estar cubiertos por ellos; proporcionando edades exactas, mínimas o máximas de formación del depósito.

- Génesis y datación de formas del relieve, tanto erosivas (superficies erosivas y niveles de incisión) como deposicionales: terrazas fluviales, llanuras aluviales, morrenas glaciares, turberas y rellenos lacustres, dunas y mantos eólicos....

Además, la dendrogeomorfología se ha aplicado a prácticamente todos los procesos geomorfológicos: fluviales (arroyada, torrenciales o fluviales s.s.), gravitacionales (caídas de roca, deslizamientos, flujos, reptación y subsidencia), glaciares (glaciares rocosos, glaciares, neveros...), periglaciares (permafrost, ciclos hielo-deshielo, aludes de nieve), eólicos, lacustres, litorales y costeros, kársticos... Incluso se incluyen también dentro de los estudios dendrogeomorfológicos los procesos no estrictamente geomorfológicos (ligados por ejemplo a la geodinámica interna), pero con repercusión en la superficie terrestre, y que tienen su reflejo en la secuencia de anillos de los árboles, como: impactos meteoríticos, vulcanismo (efusivo, explosivo, lahares...), sismicidad y tsunamis, etc. También procesos geológicos inducidos por el hombre o impactos ambientales, como subsidencia por sobreexplotación de acuíferos o de yacimientos minerales (sales) en profundidad.

Muchos de los procesos geomorfológicos presentan eventos de elevada intensidad y baja frecuencia (avenidas, aludes, movimientos de ladera, erosión de suelos, etc.) que tienen asociada alta peligrosidad natural, por lo que las técnicas dendrogeomorfológicas son susceptibles de ser utilizadas como fuentes de información de eventos pasados, su frecuencia y magnitud (intensidad y extensión), para integrarla en los análisis de riesgos naturales. La dendrogeomorfología puede servir de complemento a las fuentes de información clásicas (históricas, hidrológicas, meteorológicas,

gicas, geológicas...), incluso sustituyéndolas donde son escasas y no representativas. Además, permiten ver la respuesta de los procesos y eventos a lo largo de periodos temporales, en ocasiones, de varios siglos, y por consiguiente extraer conclusiones sobre la incidencia de los cambios climáticos en la frecuencia de fenómenos peligrosos, y sobre el carácter estacionario o no de las series temporales de datos obtenidos con mediciones instrumentales. Más información acerca de los aspectos generales de la dendrogeomorfología y sus aplicaciones para el estudio de procesos geomorfológicos y los peligros naturales asociados, puede encontrarse en: Ballesteros *et al.* (2010); Stoffel *et al.* (2010) y Díez-Herrero (2021).

3. Rango temporal de aplicación del método

El rango temporal de la datación mediante métodos dendrocronológicos queda establecido por la longitud y la posibilidad de sincronización de las secuencias de crecimiento elaboradas a partir de muestras de madera de diferentes elementos. Las limitaciones en cuanto a la extensión de las secuencias de crecimiento dependen, en primer lugar, de la longevidad de las especies y de los individuos. Los árboles vivos con cronologías más largas (cerca de 5000 años) son de la especie *Pinus longaeva* D.K.Bailey y proceden de Norteamérica. Asimismo, también depende de la edad de las maderas procedentes de diversidad de fuentes (edificios y otros elementos de origen antrópico, restos fósiles...) que, habitualmente, cuentan con una datación radiocarbónica que le aproxima a su rango temporal, y/o con secuencias que se contrastan hasta la sincronización con las de cronología conocida.

La cronología de anillos de crecimiento continua más larga que se conoce cubre los últimos 12.460 años y está elaborada en Centroeuropa a partir de la sincronización en cadena de numerosísimas secuencias de crecimiento de robles y pinos, procedentes de maderas subfósiles, de excavaciones arqueológicas, de

edificios históricos y de árboles vivos (Friedrich *et al.*, 2004). Por su parte, con los árboles vivos más longevos se ha elaborado una cronología de cerca de 9000 años, en este caso utilizando también secuencias de crecimiento procedentes de restos fósiles (Salzer *et al.*, 2019).

4. Ejemplos de aplicación práctica en nuestro territorio

Desde hace más de 25 años, varios científicos están llevando a cabo investigaciones sobre la aplicación de técnicas dendrocronológicas al estudio de los procesos geomorfológicos y la datación de materiales del Cuaternario en la península Ibérica (España y Andorra), Baleares y Canarias. Los ámbitos naturales estudiados abarcan una amplia gama de procesos, donde destacan los movimientos de ladera (caídas de rocas, corrientes de derrubios, deslizamientos...), la erosión hídrica de suelos (laminar y en cárcavas y barrancos), los aludes de nieve, y las avenidas torrenciales e inundaciones.

Las áreas de estudio están concentradas en dos sistemas montañosos y sus inmediaciones (Fig. 2): los Pirineos catalán, andorrano y aragonés (Ripollès, Berguedà, Pallars Sobirà, Pallars Jussà, Alta Ribagorça, Cuenca del Valira, Ribagorza, Sobrarbe, Alto Gállego, Jacetania y Andorra); el Sistema Central español y cuencas del Duero y Tajo (Segovia, senda Schmid, Monterrubio, Navalunga, Venero Claro, Galayos-Guisando, Arenas de San Pedro, San Martín de la Vega, Rivas Vaciamadrid, Arganda y comarca de Pedraza); y en la isla de La Palma (Parque Nacional de la Caldera de Taburiente). También se han datado mediante dendrocronología infinidad de materiales leñosos, tanto naturales en depósitos cuaternarios en campo (Sierras de Gredos y Guadarrama), como formando parte de construcciones que han sido afectadas por procesos activos, como inundaciones y terremotos.

A continuación, se exponen algunos ejemplos de las aplicaciones de la datación dendrocro-

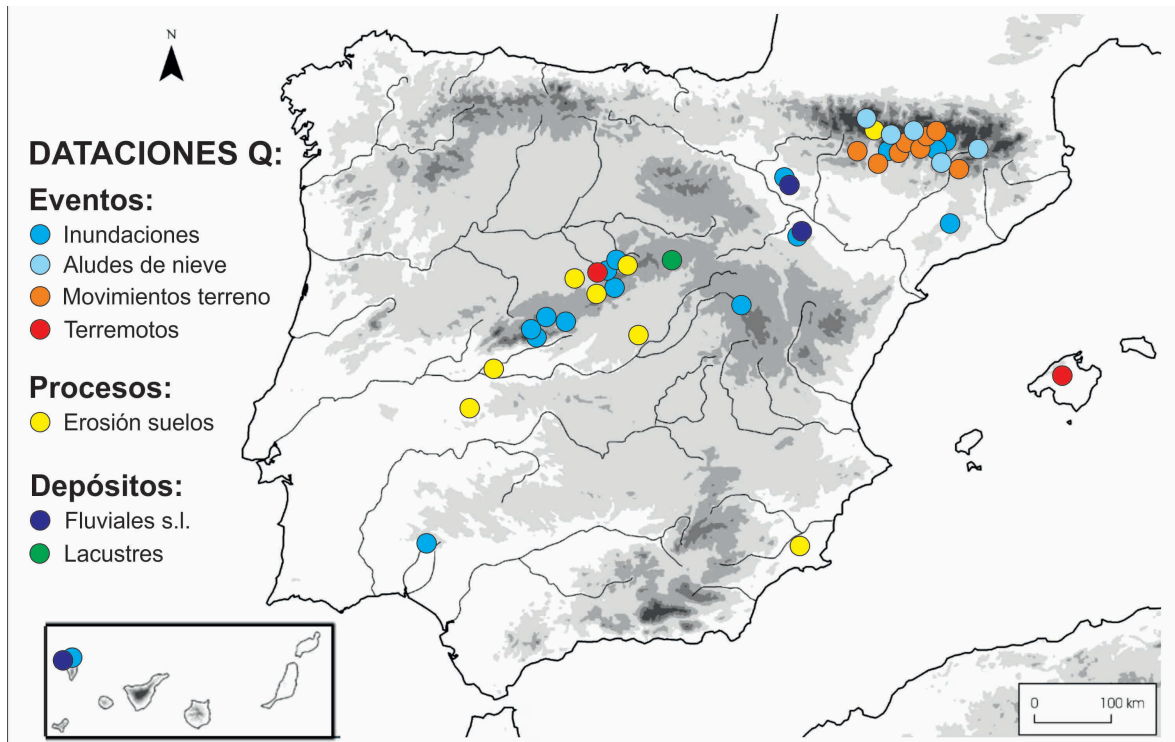


Figura 2: Mapas de situación de las localidades donde se han elaborado o se están realizando en la actualidad estudios de datación dendrocronológica aplicados al Cuaternario en la península Ibérica, para diferentes tipos de eventos (inundaciones, aludes de nieve, movimientos del terreno y terremotos), procesos (erosión de suelos) y depósitos (fluviales y lacustres).

Figure 2: Location maps of the localities where dendrochronological dating studies applied to the Quaternary in the Iberian Peninsula have been carried out or are currently being carried out, for different types of events (floods, snow avalanches, mass movements and earthquakes), processes (soil erosion) and deposits (fluvial and lacustrine).

nológica durante el Cuaternario con estas técnicas (datación de depósitos sedimentarios, inundaciones y efectos de fuegos y terremotos) con distintos elementos de madera (restos fósiles, procedentes de la restauración de edificios históricos y árboles vivos) en zonas de estudio españolas y con muy diferentes rangos temporales.

4.1. Datación dendrocronológica de macrorestos fósiles en depósitos cuaternarios y evolución geomorfológica en Campisábalos (Guadalajara)

Se han estudiado con metodología dendrocronológica troncos y tocones fósiles de *Pinus* cf. *sylvestris* enterrados en el sedimento a

diferentes profundidades, o superficiales, procedentes de dos yacimientos situados en valles muy próximos (Valdojos y Sandria), en el término municipal de Campisábalos (Guadalajara), con el objetivo de precisar su edad apoyándose en previas dataciones radiocarbónicas. En total se examinaron 34 muestras de troncos, ramas y tocones y en 24 de ellas se analizó su edad radiocarbónica (Génova *et al.* 2016, Postigo-Mijarra *et al.* 2017, García-Antón *et al.* 2021). Se midió la anchura de los anillos en diferentes radios de cada muestra y se sincronizaron las secuencias temporales obtenidas para promediarlas en una secuencia representativa de cada resto fósil. En cada una de las muestras datadas por radiocarbono, se aplicó la fecha calibrada obtenida al dato final de la secuencia de crecimiento

individual, fechando sucesivamente los valores restantes. Posteriormente, se estudiaron las correlaciones entre las edades radiocarbónicas más próximas, para ajustar las dataciones según las cronologías seleccionadas como referencia para cada período y obtener la edad dendrocronológica. Después, se analizaron las cronologías individuales de anillos que no habían sido datadas por radiocarbono, estudiando el posible rango de fechas de cada una, considerando la proximidad en profundidad de los restos a los que ya estaban datados y, cuando fue posible, se elaboraron cronologías compuestas.

Las cronologías del yacimiento de Valdojos son más antiguas (en su mayoría desde 8156 hasta 5371 años cal BP) y son complementarias a las de Sandria (desde 4443 hasta 292 años cal BP), abarcando en conjunto, aunque de forma discontinua, una secuencia temporal de anillos de crecimiento que cubre gran parte del Holoceno, casi 8000 años (Fig. 3). Los crecimientos medios en Valdojos muestran que los pinos (en general de elevada edad) se desarrollaron en un ambiente extremo, en condiciones ecológicas desfavorables, mientras que en Sandria los pinos (más jóvenes) presentaban crecimientos más elevados. En el caso del valle de Sandria el trabajo se complementó, además, con un detallado estudio

geomorfológico (incluyendo análisis estratigráfico y tomografía eléctrica) que permitió establecer diferentes fases de la evolución del valle y su relación con los fósiles en los últimos 5000 años (Postigo-Mijarra *et al.* 2017). En este valle irregularmente inundado a lo largo del tiempo, un nivel freático no muy elevado pudo haber promovido muy probablemente el crecimiento de los pinos (García-Antón *et al.* 2021).

4.2. Datación de eventos geológicos extremos en los materiales de construcción de edificios históricos en Segovia

La datación de eventos catastróficos a partir de las maderas instaladas posteriormente en las reconstrucciones o reparaciones de los edificios constituye un enfoque muy original, que proporciona interesantes datos acerca del tipo y efectos de los desastres sucedidos. Para la datación dendrocronológica de estas maderas es posible analizar secciones transversales, dado que muchas veces se trabaja con materiales desechados en las restauraciones recientes de los edificios. A la hora de datar cada elemento se debe tener en cuenta su uso constructivo y función estructural, que pueden afectar o no a la presencia de corteza y a la ausencia de los anillos más externos y, asimismo, a su estado de conservación, pues las

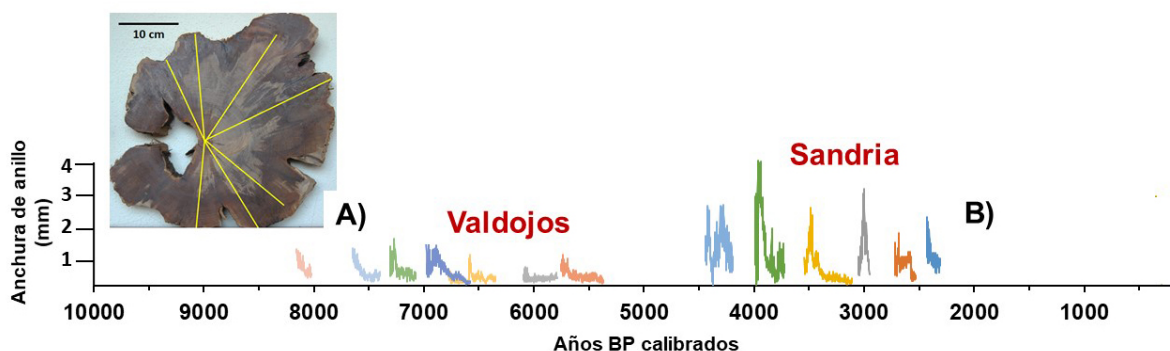


Figura 3: A) Una de las muestras fósiles analizadas donde se señalan los radios medidos y B) cronologías compuestas de anchura de anillo en macrorrestos fósiles procedentes de los yacimientos de Valdojos y Sandria. Fuente: García-Antón *et al.* (2021), modificado.

Figure 3: A) One of the fossil samples analysed showing the measured radii and B) composite ring-width chronologies in macrofossils from the Valdojos and Sandria sites. Source: García-Antón *et al.* (2021), modified.

porciones más externas se pueden encontrar más o menos afectadas por diferentes grados de pudrición. En la datación de las secuencias de anchuras de anillos de crecimiento obtenidas se suelen utilizar como referencias las dataciones radiocarbónicas de algunas muestras representativas y también, si es posible, cronologías regionales elaboradas a partir de árboles vivos. Diferentes eventos se han estudiado así, tras la elaboración de cronologías en elementos constructivos de la Real Casa de Moneda y la Catedral en Segovia.

En 2009, durante las labores de investigación arqueológica para la rehabilitación como museo de la Real Casa de Moneda, se descubrió el entarimado y los soportes de un antiguo canal realizado en madera siguiendo las indicaciones de Juan de Herrera (entre 1583-1585) y que fueron datados con técnicas dendrocronológicas. Tanto la datación radiocarbónica calibrada de la parte más antigua de una de las piezas (entre 1463 y 1643), como el conjunto de las dataciones dendrocronológicas (1552-1716), coinciden con la información histórica, “e indican que estas piezas se instalaron en su mayoría durante el siglo XVII” o por “e indican que las piezas más recientes se instalaron a principios del siglo XVIII.” Además, se ha comprobado una cierta correlación entre diferentes dataciones indicadoras de la fecha de la corta de los árboles, no estrictamente coincidentes, y las fechas en las que hay constancia de reparaciones en el canal. Estas fechas también se correlacionan con los años documentados por los graves desperfectos originados por inundaciones en el edificio (Fig. 4), antes de la construcción de otra estructura de mampostería y sillería diseñada por Francisco Sabatini (ca. 1770-1771), en vista de que el canal de madera precisaba de continuas y costosas reparaciones (Izaga y Soler, 2012). Todo ello ha permitido detectar y corroborar las fechas de al menos 2 catastróficos eventos de inundación (1695 y 1733) que afectaron al edificio (Génova *et al.*, 2011 y 2018).

Por otra parte, las obras de rehabilitación y reforma de la cubierta de la catedral de Segovia, realizadas en el año 2014, tuvieron como

consecuencia la sustitución de diversas piezas de madera por encontrarse en mal estado de conservación. Además, se aplomaron las cerchas que estaban inclinadas y se eliminaron los jabalcones que las soportaban. Todas las maderas de la antigua cubierta de la catedral analizadas mostraron ser sincrónicas, de manera que se pudo establecer una secuencia común de anchura de anillos de crecimiento. La datación radiocarbónica calibrada de las partes más antiguas de algunas piezas oscila entre 1440 y 1620 y la cronología más probable de la secuencia dendrocronológica común, al contrastarla con la cronología regional de referencia, se determinó en 1496-1651 (Génova *et al.*, 2018). En 1614, no sólo el campanario, sino también las armaduras originales de las naves, fueron pasto de las llamas provocadas por un rayo, de manera que se ha comprobado que no fue hasta mediado el siglo XVII que se abordó la construcción de una nueva cubierta. Pasaron varias décadas entre el incendio de 1614 y la instalación de esta nueva y definitiva cubierta. La documentación histórica no ha aportado datos precisos, pero indica que hasta 1686 no se completó la construcción de la nueva cúpula (Cortón, 1997) y también destaca las penurias económicas existentes en la ciudad de Segovia en la primera mitad del siglo XVII, que retrasaron la finalización de la construcción de la Catedral. Por otra parte, las dataciones dendrocronológicas y radiocarbónicas de los jabalcones que sustentaban las inclinadas cerchas (de cuya instalación no se conoce documentación histórica y que son todos coetáneos) no son demasiado precisas en este caso, pero sí que determinan que éstos fueron instalados entre el último cuarto del siglo XIX y el primero del XX (Génova *et al.*, 2018), en fechas muy alejadas de la finalización de la construcción de la Catedral. Todo apunta a que la instalación de los jabalcones se produjo como consecuencia de los efectos en la cubierta que produjo el terremoto de 1755 (Rodríguez-Pascua *et al.*, 2015) y que el daño no fue conocido hasta mucho más tarde, o que la inclinación de las cerchas fue progresiva a lo largo del tiempo, hasta que se decidió buscar una solución.

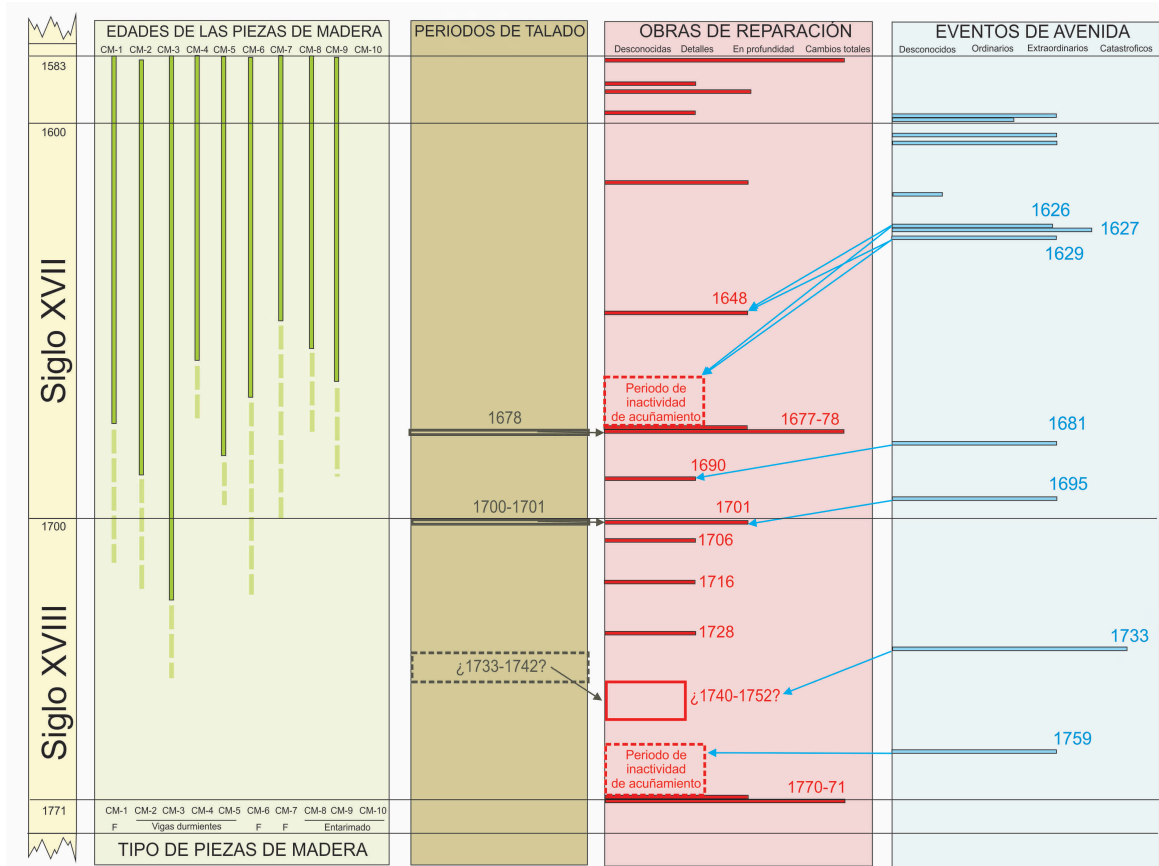


Figura 4: Relaciones cronológicas entre las maderas datadas y las fechas de corta estimadas, los trabajos de reparación en la Casa de la Moneda de Segovia y las inundaciones históricas entre 1583 y 1771. Fuente: Génova *et al.* (2011), traducido.

Figure 4: Chronological relationships between the dated timbers and the estimated felling dates, the repair works at the Segovia Mint and the historical floods between 1583 and 1771. Source: Genova *et al.* (2011) translated.

4.3. Datación dendrocronológica de la frecuencia de procesos geomorfológicos: avenidas torrenciales en el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente (La Palma, Islas Canarias)

La Caldera de Taburiente ocupa 4690 ha del sector centro-septentrional de la isla de la Palma (Islas Canarias), y fue declarada Parque Nacional en el año 1954. Se trata de una llanura aluvial formada por grandes barras de bloques y gravas entre las que discurren uno o varios hilos de corriente, con una terraza baja separada por un escarpe de banco de orilla de unos 2,3 m de altura media. Las barras estabilizadas y las terrazas presentan

vegetación arbórea de pino canario (*Pinus canariensis* Chr. Sm. ex DC.) y sauce canario (*Salix canariensis* C. Sm. ex Link). En esta zona convergen buena parte de los senderos más transitados y se encuentra la única zona de acampada autorizada, estimándose una población expuesta anual media en tránsito por el sistema de barrancos en unas 67.000 personas (A. Palomares, com. pers.). Aquí son frecuentes e intensas las avenidas súbitas, las cuales han producido incluso víctimas mortales entre practicantes de senderismo (3 fallecidos en noviembre de 2001); varias intervenciones de protección civil al quedar grupos numerosos de visitantes incomunicados por la inundación (la última el 22 de

octubre de 2011); e importantes pérdidas económicas al interferir las avenidas con los proyectos de repoblación de las riberas con especies autóctonas y endemismos (superiores a los 700.000 euros en los últimos años), e infraestructuras (puentes, conducciones de agua, sistemas hidroeléctricos) y las sendas más transitadas. Ante la imposibilidad de realizar análisis de peligrosidad con métodos hidrológico-hidráulicos convencionales, por no existir estaciones de aforo representativas ni datos pluviométricos con series largas y discriminación espacial y temporal adecuada, se recurrió a los métodos dendrogeomorfológicos para elaborar un registro de eventos de avenidas.

En total se muestrearon 73 ejemplares de *Pinus canariensis* mediante barrena de Pressler (tanto en la propia llanura aluvial del río Taburiente como en sus tributarios, Fig. 5 A) y, además, se obtuvieron varias cuñas y secciones discoidales en ejemplares muertos. Al menos se extrajeron, en los árboles afectados (con heridas producidas por la carga sólida transportada durante las riadas y/o con otros daños como desenraizamiento, pérdida de la guía principal, etc.), dos muestras completas

por árbol (desde la corteza hasta la médula). Otras muestras se extrajeron cerca de las heridas, de manera que el contraste entre las diversas secuencias de crecimiento permitiera identificar el año en que se produjo el daño. También se extrajeron muestras de 16 árboles no dañados para elaborar una cronología de referencia (Génova *et al.*, 2015). A partir del análisis de las secuencias de crecimiento en grosor de los árboles afectados (agrupados en 2 cohortes distintas según su edad media) y, muy concretamente, del porcentaje de árboles con liberaciones, se pudo reconstruir el registro reciente (últimos 50 años) de los eventos de avenidas torrenciales sucedidos, siendo especialmente relevantes los de 1962 y 1997 (Fig. 5 B), pues se repiten sistemáticamente en muchos de los ejemplares muestreados. Las liberaciones son el resultado de una gran cantidad de formación de tejido de reacción, detectado sobre todo en árboles viejos después del daño. De este modo, la información aportada por los datos dendrogeomorfológicos supone una importante mejora para el desarrollo de los análisis de peligrosidad por inundaciones en la zona, aportando información acerca de su frecuencia y de los períodos de recurrencia.

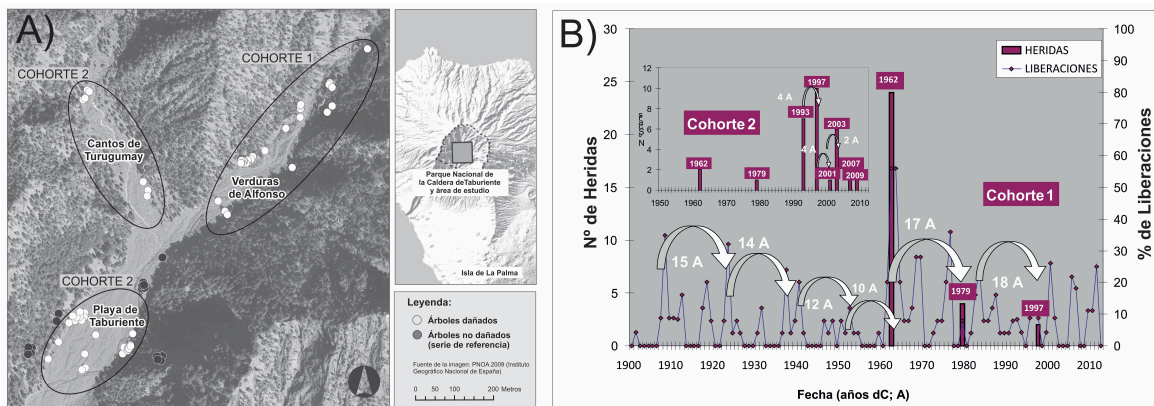


Figura 5: A) Zona de estudio detallada, en la confluencia de los barrancos de Cantos de Turugumay y Verduras de Alfonso que forman el río Taburiente. B) Datación de heridas y otros daños producidos en los pinos canarios e intervalos de tiempo entre los años con mayor número de evidencias. La Cohorte 1 agrupa los árboles más longevos y la Cohorte 2 los más jóvenes. Fuente: Génova *et al.* (2015), modificado.

Figure 5: A) Detailed study area, within the confluence of the Cantos de Turugumay and Verduras de Alfonso gorges forming the Taburiente River. B) Dating of wounds and other damages to Canary pine and time intervals between the years with the highest number of evidences. Cohort 1 groups the longest-lived trees and Cohort 2 the youngest. Source: Génova *et al.* (2015), modified.

5. Conclusiones

La datación dendrocrológica se ha mostrado como una técnica muy versátil y útil para los estudios del Cuaternario, especialmente si se combina con otras, como la datación radiocarbónica y la documentación histórica. En España, el estudio de los anillos de los árboles para datar y caracterizar procesos geodinámicos y otros fenómenos como inundaciones, incendios o terremotos, tiene hoy en día un amplio abanico espacial y temporal. La datación dendrocronológica se ha extendido desde los inicios del Holoceno, analizando materiales fósiles y subfósiles, hasta la actualidad, analizando muestras de árboles vivos, y también en épocas históricas, estudiando por ejemplo maderas procedentes de la restauración de edificios. Así pues, las oscilaciones de las características de los anillos de crecimiento de las leñosas a lo largo del tiempo constituyen en la actualidad una de las principales fuentes de información indirecta de eventos de carácter abiótico, biótico o antrópico y permiten la reconstrucción de las condiciones ambientales a lo largo del tiempo.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la aportación de información y los estudios realizados por infinidad de autores sobre la dendrocronología y sus aplicaciones al estudio de los procesos, materiales y formas del Cuaternario en España, y especialmente a los coautores de los trabajos citados. Estos trabajos han sido financiados por multitud de proyectos de investigación, entre los que quisiéramos destacar: GeoRiada, Dendro-Avenidas, IDEA-GesPPNN, MAS Dendro-Avenidas, MARCoNI, CHARMA, DIPAVE, DRAINAGE y proyectos autonómicos de Castilla-La Mancha. Finalmente deseamos agradecer a los editores invitados de este número especial de Cuaternario y Geomorfología, Pablo G. Silva y Joaquín Rodríguez Vidal, la invitación a participar con esta aportación.

Bibliografía

- Alestalo, J. (1971). Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia*, 105, 1–140.
- Ballesteros, J. A., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Génova, M., Gutiérrez, E., Moya, J., Muntán, E., Oller, P., Rubiales, J.M., Ruiz-Villanueva, V., Saz, M.A. (2010). Dendrogeomorfología. Los árboles, fuente de conocimiento de los procesos y desastres naturales. *Cuadernos de Arboricultura*, 5, 119 pp.
- Cortón, M. T. (1997). *La Construcción de La Catedral de Segovia (1525-1607)*. Caja de Ahorros y Monte de Piedad de Segovia, Segovia, 296 pp.
- Dean, J. S. (1997). Dendrochronology. En: *Chronometric dating in archaeology. Advances in archaeological and museum science*. vol. 2. (R. E. Taylor; M. J. Aitken, ed.). Springer, Boston, 396 pp. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9694-0_2
- Díez-Herrero, A. (2021). La dendrogeomorfología como fuente de datos de la frecuencia y magnitud de caudales históricos. En: *Paleocrecidas y avenidas históricas y su aplicación a la seguridad hidrológica de las presas* (A. Jiménez, ed.). Monografías CEDEX, Cap. III, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas Madrid, 61-92.
- Friedrich, M., Remmele, S., Kromer, B., Hofmann, J., Spurk, M., Kaiser, K. F., Orsel, C., Küppers, M. (2004). The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from central Europe—A unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions. *Radiocarbon*, 46 (3), 1111-1122. <https://doi.org/10.1017/S003382220003304X>
- García-Antón, M., Génova, M., Postigo-Mijarra, J. M., García-Álvarez, S., Morla, C., García-Amorena, I. (2021). Holocene woodland history of the Sierra de Ayllón (central Spain). *Veg Hist Archaeobot.*, 30(3), 331-346. <https://doi.org/10.1007/s00334-020-00787-x>
- Génova, M., Ballesteros-Cánovas, J. A., Díez-Herrero, A., Martínez-Callejo, B. (2011). Historical floods and dendrochronological dating of a wooden deck in the Old Mint of Segovia, Spain. *Geoarchaeology*, 26(5), 786-808. <https://doi.org/10.1002/geo.20369>
- Génova, M., Gómez-Manzanque, F., Martínez-García, F., Postigo-Mijarra, J.M. (2016). Early Holocene vegetation in the Ayllón Massif (Central System Range, Spain) based on macroremains: a paleoecological approach. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 441, 811-822. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.10.027>
- Génova, M., Máyer, P., Ballesteros-Cánovas, J., Rubiales, J. M., Saz, M. A., Díez-Herrero, A. (2015). Multi-disciplinary study of flash floods in the Caldera de Taburiente National Park (Canary Islands, Spain). *Catena*, 131, 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.007>
- Génova, M., Díez-Herrero, A., Moreno-Asenjo, M. A., Rodríguez-Pascua, M. A. (2018). Natural disasters

- written in historical woods: Floods, a thunderbolt fire and an earthquake. *J Cult Herit.*, 32, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.12.011>
- Izaga, J. M., Soler, J. M. (2012). Ingenios de laminar y acuñar. Recuperación de las estructuras hidráulicas. En: *Real Casa de Moneda de Segovia. Un paseo por la Historia del Real Ingenio* (A. Martín; C. Caballero; S. Fernández, coord.). Empresa Municipal de Turismo, Segovia, 51-59 y 106-114.
- Pearson, C. L., Leavitt, S. W., Kromer, B., Solanki, S. K., Usoskin, I. (2021). Dendrochronology and Radiocarbon Dating. *Radiocarbon*, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.03.001>
- Postigo-Mijarra, J.M., Génova, M., Gómez-Manzanaque, F., Martínez-García, F., Morla, C., Vegas, J., Perucha, M.A. (2017). Occurrence of continuous Holocene pinewoods (*Pinus sylvestris* L.) in the Eastern Central System (Spain) inferred from macroremains. New data from the Sandria site. *Rev. Palaeobot. Palynol.*, 246, 70-84. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2017.06.009>
- Rodríguez-Pascua, M. A., Perucha, M. A., Silva, P. G., Giner Robles, J. L. Pérez-López, R., Díez-Herrero, A. (2015). Efectos arqueosismológicos del terremoto de Lisboa (1755) en el patrimonio histórico de la ciudad de Segovia (España). *Actas XIV Reunión Nacional de Cuaternario*, Granada (España), 4 pp.
- Salzer, M. W., Pearson, C. L., Baisan, C. H. (2019). Dating the Methuselah Walk bristlecone pine floating chronologies. *Tree-Ring Research*, 75(1), 61-66. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-75.1.61>
- Schweingruber, F. H. (2012). *Tree rings: basics and applications of dendrochronology*. Springer Science & Business Media, Dordrecht (Holland), 275 pp.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D. R., Luckman, B. H. (eds.) (2010). *Tree rings and natural hazards: a state-of-art*, Vol. 41, Springer Science & Business Media, Dordrecht (Holland), 506 pp. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8736-2>

Recibido el 1 de marzo de 2022

Aceptado el 31 de agosto de 2022