https://doi.org/10.5565/rev/tda.132 ISSN 2339-6490 (en línia), ISSN 1134-9263 (en paper)

El estudio de los incendios forestales como contribución al conocimiento de la arqueología del paisaje de montaña*

Marc Sánchez Morales[1], Sara Rodríguez Coteron[2], Ramon Pérez Obiol[1], Albert Pèlachs Mañosa[1], Jordi Nadal Tersa[1], Juan Carlos García Codron[2], Raquel Cunill Artigas[1], Virginia Carracedo Martín[2], Salvador Beato Bergua[3], Anna Badia Perpinyà[1]

© de los autores

Recibido: 03/12/2021
Aceptado: 29/05/2023

Resumen

El estudio de los incendios forestales del pasado ha permitido poner de relieve la importancia del fuego en la configuración de los paisajes de las zonas de montaña desde el inicio del Holoceno. Las formaciones vegetales asociadas a las quemas regulares y las perturbaciones provocadas en el paisaje han evolucionado a la vez que las actividades humanas se transformaban y se adaptaban a los cambios ambientales. En los últimos años, distintas técnicas paleobotánicas enmarcadas en la geohistoria ambiental han resaltado la importancia de los trabajos pluridisciplinarios. Concretamente, se ha visto la necesidad de complementar y contrastar los indicadores relativos a las plantas leñosas, tales como el polen y los palinomorfos no polínicos. Por ejemplo, las condiciones sedimentarias de los lagos y las turberas han permitido el estudio de macrocarbones (>150 µm) y microcarbones sedimentarios (<150 µm) interpretados a escala de cada valle. En los suelos, la pedoantracología (>400 µm) ha aportado información espacial local y relativa a la composición de especies leñosas. Asimismo, las marcas de fuego en los anillos de crecimiento de los árboles son una opción para ajustar algunas cronologías. Este trabajo tiene como objetivo valorar qué aportaciones se pueden realizar desde la geografía histórica ambiental que sean útiles para la arqueología del paisaje de montaña. Para ello se han revisado las princi-

* Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de los proyectos coordinados del Ministerio de Economía y Competitividad (MEC) de España: *Estudio biogeográfico histórico comparado (Montaña Cantábrica, Sistema Central y Pirineos): 18000 años de cambios climáticos y antrópicos sobre especies forestales indicadoras* (CSO2015-65216-C2-1-P) y *Calibración de indicadores de influencia humana y climática para la (re)interpretación de la expansión postglacial y de las dinámicas de los bosques en los últimos 18.000 años* (PID2019-108282GB-I00/AEI/10.13039/501100011033), del Departamento de Geografía de la Universitat Autònoma de Barcelona. Además de la financiación de la Generalitat de Catalunya, Grup de Geografia Aplicada (AGAUR, Generalitat de Catalunya, 2017 SGR-00343 y 2021 SGR-00522).

1. Universitat Autònoma de Barcelona. Grup de Recerca en Àrees de Muntanya i Paisatge (GRAMP). marc.sanchez.morales@uab.cat; ramon.perez@uab.cat; albert.pelachs@uab.cat; jordi.nadal@uab.cat; raquel.cunill@uab.cat; anna.badia@uab.cat
2. Universidad de Cantabria. Grupo de Estudio y Gestión del Medio Natural (GIMENA). sara.rodriguez@unican.es; juan.garciacodron@unican.es; virginia.carracedo@unican.es
3. Universidad de Oviedo. Departamento de Geografía. beatosalvador@uniovi.es

pales técnicas paleobotánicas para el estudio de los incendios del pasado en las zonas de montaña, se debate acerca de la precisión espacial y temporal de los carbones según su tamaño y la técnica de muestreo empleada y se discute cómo distinguir las señales climáticas y humanas en los incendios forestales. Los principales resultados apuntan a que los incendios naturales han quemado todo tipo de paisajes con independencia de la formación vegetal. La cantidad de biomasa disponible en cada momento se ha demostrado que ha sido un factor determinante de la intensidad de los incendios. Finalmente, la combinación de carbones sedimentarios e indicadores polínicos sugieren que han existido fuegos provocados por la acción humana desde el inicio del Neolítico, mientras que aún no queda claro si los incendios que hubo en tiempos pretéritos tuvieron influencia antrópica o no.

Palabras clave: carbones sedimentarios; pedoantracología; incendios; geohistoria ambiental; paisaje vegetal; Holoceno

Abstract. *The study of forest fires as a contribution to the knowledge of the archaeology of the mountain landscape*

The study of historical forest fires has highlighted the importance of fire in shaping the landscapes of mountain areas since the beginning of the Holocene. Plant formations associated with regular burning and landscape disturbance have evolved at the same time as human activities have transformed and adapted to environmental changes. In recent years, different palaeobotanical techniques within the framework of environmental geohistory have highlighted the importance of multidisciplinary work. In particular, there is a need to complement and contrast woody plant indicators such as pollen and non-pollen palynomorphs. For example, the sedimentary conditions of lakes and peatlands have allowed the study of sedimentary macrocharcoals (>150 μm) and microcharcoals (<150 μm), interpreted at the scale of each valley. In soils, pedoanthracology (>400 μm) has provided local spatial information and information on woody species composition. Likewise, fire marks on tree growth rings are a way of adjusting some timelines. The aim of this work is to assess what contributions can be made from historical environmental geography that are useful for mountain landscape archaeology. To this end, we reviewed the main palaeobotanical techniques for the study of historical fires in mountain areas, discussed the spatial and temporal precision of the charcoals according to their size and the sampling techniques used, and examined how to distinguish climatic and human signals in forest fires. The main results suggest that natural fires have burned all types of landscapes, regardless of plant formation. The amount of biomass available at any given time was shown to be a determinant of fire intensity. Finally, the combination of sedimentary charcoals and pollen indicators suggests that human-induced fires have existed since the beginning of the Neolithic, while it is still unclear whether fires in earlier times were anthropogenic or not.

Keywords: sedimentary charcoals; pedoanthracology; fires; environmental geohistory; vegetal landscape; Holocene

Sánchez Morales, Marc et al. (2023). «El estudio de los incendios forestales como contribución al conocimiento de la arqueología del paisaje de montaña». *Treballs d'Arqueologia*, 26, 111-126. DOI: 10.5565/rev/tda.132

1. Los incendios forestales como indicador paisajístico para la arqueología del paisaje

El estudio de los paleoincendios, según el marco establecido por PAGES (Past Global Changes), debe integrar clima, ambiente y actividades humanas a escalas variables y a largo plazo. En relación con lo anterior, el estudio de los incendios forestales debe ser visto como un buen indicador para la arqueología del paisaje, porque integra en una misma variable informaciones que le son propias, pero también una oportunidad para trabajar con indicadores de influencia humana y ambiental que permitan entender mejor el funcionamiento del sistema global (Reasoner et al., 2001). En la actualidad, los incendios en las zonas de montaña constituyen un problema que demanda soluciones que pasan por cambios importantes en la gestión forestal (Cuadrat et al., 2000; Lasanta et al., 2011), ya que el abandono de las actividades tradicionales y los cambios de las características socioeconómicas del entorno han generado zonas vulnerables a los incendios forestales (Pyne, 2019; Castellnou et al., 2019). Si se analizan con detalle los cambios en los usos y las cubiertas del suelo a lo largo del último siglo, se observa que los fuegos se comportan de manera distinta a cómo lo venían haciendo, como mínimo, desde la Edad Media. Y es que el abandono de los terrenos de cultivo y de pastos en las zonas de montaña se ha traducido en un incremento de la superficie forestal que no se veía desde entonces, con el añadido de que actualmente muchas zonas arboladas se convierten en masas continuas de combustible sin gestionar (Vélez, 2000; Lasanta et al., 2005 y 2006; Badia et al., 2014).

Por todo ello, se precisa una descripción detallada y una tipificación de la evolución de los paisajes vegetales en el tiempo a partir del uso de distintas técnicas paleobotánicas complementarias (Battarbee et al., 2005). Además, también sería adecuado contar con una buena calibración de la señal de los incendios forestales en la montaña para interpretar correctamente su intensidad y su importancia en las perturbaciones ecológicas del pasado (Smol et al., 2003). La investigación en geografía histórica ambiental del GRAMP (Grup de Recerca en Àrees de Muntanya i Paisatge) y de GIMENA (Grupo de Investigación, Estudio y Gestión del Medio Natural) son la base de este artículo, ya que ha permitido analizar, entre otras cosas, las dinámicas del paisaje vegetal y el papel del fuego en la configuración de los paisajes de montaña en los Pirineos y en la cordillera cantábrica desde el Tardiglacial. Basándonos en los resultados obtenidos, el objetivo principal de este artículo es realizar una investigación que permita valorar qué aportaciones se pueden hacer desde la geografía histórica ambiental que sean útiles para la arqueología del paisaje de montaña. Con este fin, se propone realizar un trabajo de síntesis a partir de una revisión bibliográfica para responder a tres preguntas que se consideran principales y que estructurarán el presente artículo:

1. ¿Qué técnicas paleobotánicas aportan información sobre los incendios del pasado más allá de las de los propios yacimientos arqueológicos?
2. ¿Qué precisión espacial y temporal tiene la información que analizamos?
3. ¿Se puede separar la señal climática de la señal humana en los incendios forestales?

2. Las principales técnicas paleobotánicas para el estudio de los incendios del pasado en las zonas de montaña

Las secuencias sedimentarias en las zonas de montaña procedentes de ambientes lacustres y palustres han sido esenciales para conocer la evolución a largo plazo de la geohistoria ambiental y de la distribución biogeográfica (Dearing et al., 2015; González-Sampériz et al., 2019; Scott, 2020). En este sentido, aportaciones recientes sobre el estudio de las perturbaciones forestales indican una presencia continua de los incendios como factor determinante en las dinámicas vegetales de montaña (Gil-Romera et al., 2014). Los incendios han generado grandes perturbaciones en el paisaje desde el inicio del Holoceno, y la llegada de las poblaciones neolíticas convirtió el fuego en una gran herramienta de la gestión territorial para abrir pastos y generar zonas agrícolas (Bal et al., 2010; Valese et al., 2014; Pèlachs et al., 2016).

Hasta la fecha, las técnicas empleadas para estudiar el régimen de incendios se han fundamentado en el análisis de los carbones. Los carbones no siempre tienen el mismo tamaño, ya que este viene influenciado por múltiples factores, tales como la escala espacial del régimen de incendios o el tipo de vegetación quemada, entre otros. De tal forma, el estudio de carbones de mayor y menor tamaño aportará una información distinta y complementaria. Para empezar, el estudio de los macrocarbones sedimentarios (>150 µm) permite localizar el origen de los incendios en el propio valle, ya que generalmente no se dispersan más allá de unos 6-7 km de distancia (Clark, 1988; Whitlock y Millspaugh, 1996). Para su análisis se sigue un tratamiento químico específico de las muestras sedimentarias (Carcaillet et al., 2001 y 2007; Whitlock y Larsen, 2002; Power et al., 2008). Este protocolo, ajustado en Pérez-Obiol et al. (2016), utiliza KOH como solución defloculante y NaClO (un 15%) como solución de blanqueo (Genries et al., 2012; Finsinger et al., 2014). Las muestras se calientan a 70 °C durante 90 minutos y se tamizan con una malla de 150 µm. El número de partículas de carbón macroscópicas se estima con un estereomicroscopio a 40x. La superficie de los fragmentos de carbón vegetal se estima a partir de una cuadrícula ocular con 100 cuadrados de 0,0625 mm^2 cada uno. Finalmente, los fragmentos de carbón vegetal se pueden clasificar en clases de medida exponencial según su área, con el fin de identificar qué tamaño de carbón está más representado (Carcaillet et al., 2007; Whitlock y Larsen, 2002; Finsinger et al., 2014). Cuanto mayor sea el carbón, más potencialmente local será el incendio de su origen. Respecto a los carbones de mayor tamaño, cabe destacar también que la presencia de macrocarbones vegetales obtenidos a partir de otros tratamientos paleobotánicos, tal y como ocurre en el de los macrorrestos vegetales, también podría ser un buen indicador de incendios locales y un buen complemento a otras informaciones disponibles.

En cuanto a los carbones menores de 100 µm, algunos modelos apuntan que pueden desplazarse más allá de los 100 km (Conedera et al., 2009). Por este motivo, se pueden encontrar a cualquier distancia, aunque se acepta que potencialmente la distancia recorrida será mayor cuanto menor sea su tamaño (Patterson et al., 1987; Whitlock y Larsen, 2002). Por este motivo, los microcarbones sedimentarios (<150 µm) representan un buen indi-

cador del régimen de incendios a escala regional. Al contrario que con los macrocarbones sedimentarios, tal y como se señala en Carracedo et al. (2017), los microcarbones sedimentarios se pueden contar a partir de las mismas láminas preparadas para el recuento polínico. Este tratamiento tradicionalmente incluye lavados con HCl (un 10%), HF (un 70%), KOH (un 10%) y acetólisis (Faegri e Iversen, 1989; Moore et al., 1991; Bennett y Willis, 2001). En cuanto a la expresión de los resultados, tanto para los macrocarbones como para los microcarbones sedimentarios, se suele obtener la concentración de carbones sedimentarios (CHAC, mm^2/g) y, posteriormente, la tasa de acumulación de carbón vegetal (CHAR, $mm^2/g/año$). Este último siempre y cuando se cuente la tasa de sedimentación del depósito sedimentario, estimada a partir de modelos de edad y profundidad para cada lugar.

Tal y como se ha introducido, si bien el origen de los carbones respecto al punto de muestreo influye en el tamaño de los carbones, hay otros factores que también lo pueden determinar, como, por ejemplo, el tipo de la vegetación de origen y su capacidad para fragmentarse. Principalmente, los macrocarbones sedimentarios (>150 µm) se asocian a especies leñosas (Scott, 2010), mientras que los microcarbones sedimentarios (<150 µm) a especies herbáceas. No obstante, ambos se pueden relacionar tanto con los incendios de vegetación leñosa como herbácea si se atiende a la descripción de su forma (Enache y Cumming, 2006; Courtney-Mustaphi y Pisaric, 2014). En particular, la relación entre los microcarbones y la señal polínica de especies herbáceas ha sido probada por Turner et al. (2008). Finalmente, también hay que considerar la posibilidad de que la fragmentación de los microcarbones sedimentarios se deba a las condiciones ambientales del lugar donde se depositan (Marquer, 2009) o que sean el resultado del propio tratamiento fisicoquímico al que se someten las muestras a pesar de las precauciones.

En los casos en que los incendios se analizan a partir de un registro sedimentario, la precisión temporal depende de la resolución del testigo sedimentario y oscila mucho en función del material analizado. En general, esta puede abarcar un rango orientativo que se mueve entre 100 y 20 años por muestra cuando la resolución temporal es buena.

Los incendios forestales también se pueden analizar a partir de los carbones vegetales que contienen los suelos, es decir, mediante la pedoantracología. El objetivo principal es el de muestrear los carbones mayores de 400 µm, ya que debido a su tamaño se puede deducir que el incendio que los ha originado es muy local, dada su menor capacidad para dispersarse. Además, el tamaño del carbón permite realizar la identificación taxonómica de la especie vegetal. Este factor, unido a la gran precisión espacial que ofrecen los registros edáficos frente a los registros sedimentarios, ayuda a obtener una mejor localización (posición geográfica, altitud y orientación) de las diferentes especies leñosas en el seno del valle donde se realiza el estudio. El desarrollo de la pedoantracología ha sido de gran ayuda dentro del estudio de los incendios forestales (Talon et al., 1998; Pardo, 2020). Inicialmente, esta sirvió para analizar el límite altitudinal del bosque en el pasado (Talon et al., 2010; Cunill et al., 2013), pero con el tiempo se ha visto también su utilidad para estudiar las dinámicas arbóreas y arbustivas pretéritas

de otro tipo de paisajes: pastizales, espacios forestales y zonas de cultivo abandonadas (Bal et al., 2010; Dutoit et al., 2009; Touflan et al., 2010; Beato et al., 2019; Olmedo-Cobo et al., 2019). El protocolo para aislar carbones del suelo es distinto del protocolo para los carbones sedimentarios. De lo que se trata es de establecer una estrategia de muestreo en el campo (por ejemplo, un transecto altitudinal si lo que se pretende es el estudio del límite altitudinal del bosque). Una vez seleccionado el punto, se excava una fosa que permita describir el perfil completo del suelo hasta la roca madre. Por este motivo, la profundidad de la fosa es muy variable. La descripción de los horizontes del suelo permite identificar posibles fenómenos de bioturbación. La extracción del material se realiza por niveles de suelo homogéneo de 10 cm de grosor. La cantidad de suelo extraída de cada nivel puede oscilar y suele ser de entre 4 y 10 kg. Una vez en el laboratorio, los fragmentos de carbón vegetal se aíslan por flotación y se tamizan a 5 mm, 2 mm i 0,8 mm, ordenándose por esta medida de malla. Los carbones se clasifican manualmente con la ayuda de una lente binocular para proceder a su identificación. Finalmente, la antracomasa se define como la cantidad de carbón vegetal por quilogramo de suelo seco y se calcula a partir de la masa de carbón vegetal superior a 0,8 mm (expresada en miligramos) y la masa total de la fracción de suelo seco inferior a 5 mm (expresada en quilogramos).

La dendrología, o el estudio de los anillos de crecimiento de los árboles, permite la datación de los anillos (dendrocronología), estudiar sus crecimientos anuales y relacionar estas informaciones con los distintos factores que han influido en su crecimiento. De este modo, a partir de los anillos anuales se puede estudiar la historia de los bosques, interpretando las variables que los han influenciado, como la precipitación (Trouet, 2021), y caracterizar el régimen de perturbaciones que los han afectado a lo largo del tiempo. Las cicatrices del fuego (*fire-scarred trees*), es decir, las marcas que deja el fuego cuando quema parcialmente la corteza de los árboles y las reacciones que ello provoca en los anillos de crecimiento, también permiten el estudio de los incendios forestales y su recurrencia en el tiempo. El principal problema para su estudio es que las marcas se observan mejor en cortes completos y, por ello, es preciso aprovecharse de árboles caídos para no cortar ejemplares vivos. Hay que tener en cuenta, no obstante, que si los árboles se caen por la edad pueden estar en mal estado interior y haber perdido señales. Por otra parte, la intensidad del incendio y la velocidad de propagación deben presentar unas características determinadas, y ello complica encontrar árboles afectados regularmente por incendios que no hayan quemado por completo. En cualquier caso, los trabajos actuales combinan madera muerta y árboles vivos.

Tal y como se ha indicado en Carracedo-Martín et al. (2017), en el campo de la química ambiental, el levoglucosano puede ser un buen indicador de los incendios de espacios abiertos. Este compuesto procede de la pirólisis de los carbohidratos que se producen en los incendios y se dispersa en la atmósfera sedimentando con el resto de partículas procedentes de ellos (Jordan et al., 2006). Su medición permite deducir la intensidad de los incendios producidos por debajo de 350 °C y, por tanto, incluye superficies que no son ni arboladas ni leñosas. No obstante, su procedencia incierta y la falta de sufi-

cientes antecedentes en la península Ibérica impide ir más allá de un carácter exploratorio en lo que se refiere a los incendios (Rivas-Ruiz, 2017).

3. La precisión espacial y temporal de la información de los carbones

Los macrocarbones (>150 µm) y los microcarbones (<150 µm) sedimentarios han permitido analizar el impacto del fuego en el paisaje desde el principio del Holoceno y, junto con los estudios de polen, relacionar los fuegos con episodios climáticos y la disponibilidad de biomasa (Carcaillet et al., 2012; Gil-Romera et al., 2014). Además, los incendios se han presentado como una de las principales causas de perturbaciones en el paisaje (Burjachs y Expósito, 2015; González-Pellejero et al., 2014).

Hasta el momento, los macrocarbones sedimentarios se han considerado los mejores indicadores a escala de valle y, por lo tanto, los que mejor se adaptan a la arqueología del paisaje, tal y como se realizó en la turbera de La Molina, Cantabria (figura 1, extraída de Pérez-Obiol et al., 2016). La interpretación de la tasa de acumulación de macrocarbones sedimentarios ($mm^2/g/año$), en comparación con otras variables ambientales explicativas de los registros sedimentarios, permitió in-

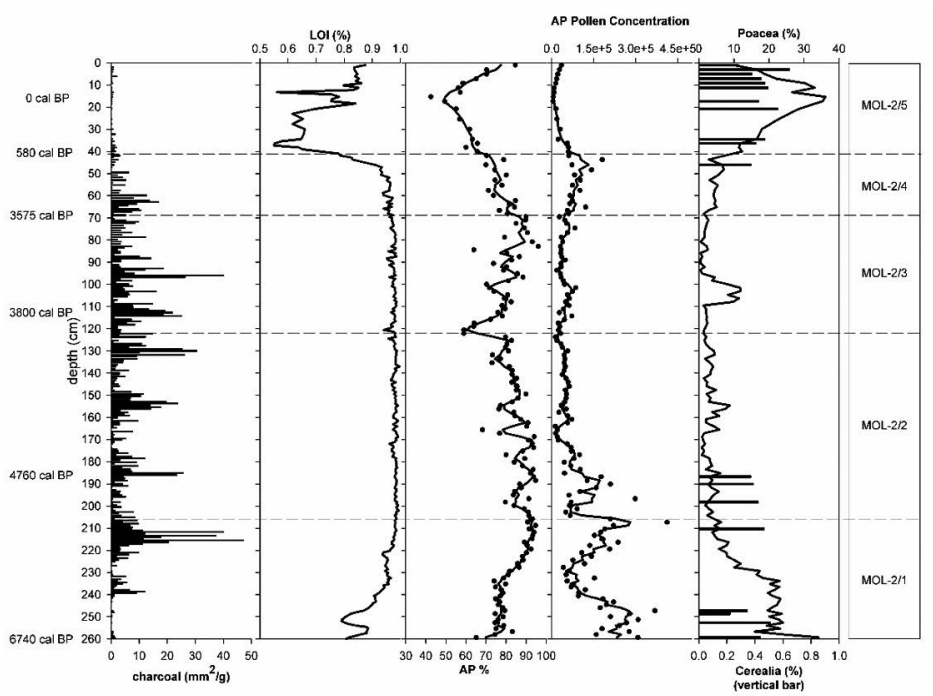

Figura 1. Macrocarbones sedimentarios y variables ambientales (publicado en Pérez-Obiol et al., 2016).

terpretar buena parte de las perturbaciones ligadas al clima (materia orgánica obtenida a partir de la LOI: *loss on ignition*), al paisaje natural (porcentaje y concentración de AP: *arboreal pollen*) o al paisaje cultural (*Poaceae* % y *Cerealia* %). Además, el método utilizado discrimina el carbón según el tamaño y tiene en cuenta de forma aislada partículas mayores de 0,25 mm^2, las cuales han sido consideradas un excelente indicador de la escala más local.

Entre las consideraciones sobre cómo interpretar los resultados es fundamental comparar los valores teniendo en cuenta las formas de acumulación y la erosión. Por ello, las diferencias entre lagos y turberas hacen necesario considerar la tasa de sedimentación durante el proceso de acumulación. En este sentido, el contenido de elementos litogénicos, como el aluminio (Al) y el titanio (Ti), sirven para indicar fases más inestables. Si no se puede disponer de ellos, las variaciones de materia orgánica y algunos palinomorfos no polínicos (*non-pollen palynomorphs*: NPPs), como las clamidósporas de *Glomus*, ayudan a interpretar los procesos erosivos.

Los microcarbones tienen un rango de procedencia mucho más extenso, lo cual complica su utilidad en la interpretación de los incendios a escala de la arqueología del paisaje. No obstante, en comparación con los macrocarbones sedimentarios, son un buen indicador del ambiente general y aportan datos sobre la historia de los incendios durante el período considerado (Scott, 2020). Además, ayudan a interpretar los diagramas polínicos y se pueden relacionar con la presencia y la ausencia de plantas leñosas, lo cual es de suma importancia para explicar el paisaje vegetal y los procesos de intensidad y abandono de la actividad humana.

El aprovechamiento de toda esta información está supeditado a la construcción de un modelo de calibración de edades y de acumulación del registro sedimentario lo más precisos posibles. Aunque la paleobotánica en los últimos años ha experimentado un aumento considerable de registros, aún son pocos los que han tratado sistemáticamente la señal del fuego. Los valores de acumulación de carbón varían mucho entre ellos y hace falta tener más datos para establecer umbrales que permitan abordar con precisión el tema de la intensidad de los incendios y los paisajes asociados. Por ejemplo, en Cantabria se han comparado tres registros de macrocarbones sedimentarios obtenidos en las turberas de La Molina, El Sertal y El Cueto de la Avellanosa (Carracedo-Martín et al., 2018). Si se comparan los valores máximos de la concentración más alta de carbón y sus correspondientes tasas de acumulación (tabla 1), se observa la enorme disparidad de valores. Ello se

Tabla 1. Concentración máxima y tasas de acumulación de carbones en tres registros sedimentarios de Cantabria. Fuente: elaboración propia a partir de Carracedo-Martín et al. (2018)

Turberas analizadas (altitud)	Concentración máxima de carbón CHAC (mm^2/g)	Tasa de acumulación máxima de carbones CHAR (mm^2/g/año)
La Molina (484 m s. n. m.)	45	2,5
El Sertal (940 m s. n. m.)	0,45	0,009
El Cueto de la Avellanosa (1.320 m s. n. m.)	5,5	0,30

ha atribuido a las diferencias de acumulación natural de cada registro sedimentario provocadas por la geomorfología local, por lo cual los valores de magnitud de los incendios solo son comparables en el propio registro. No obstante, sí que resulta interesante la comparación de las dinámicas de los episodios de incendios entre distintas localidades para obtener pautas de incendios a nivel regional.

Desde un punto de vista metodológico queda pendiente analizar si el origen de la fuente influye en la mayor o menor acumulación de carbón vegetal, ya que hasta ahora no se ha considerado teniendo en cuenta el origen vegetal que ha generado el carbón. Los incendios dan lugar a carbón, tanto si queman vegetación mediterránea (mayoritariamente perennifolia) como atlántica (mayoritariamente caducifolia) y resultaría de gran interés relacionar el residuo generado en función de cada tipo de paisaje y las distintas plantas leñosas. Para ello sería conveniente trabajar su transformación a carbón en el laboratorio y experimentar con distintos tipos de plantas en condiciones ambientales cambiantes y a temperaturas diversas.

Como factor negativo, los suelos carecen de la resolución temporal de los registros sedimentarios y por ello los estudios pedoantracológicos deben apoyarse en la datación radiométrica (^{14}C) del mayor número posible de carbones y en la comparación con secuencias polínicas cercanas (Cunill et al., 2013; Pérez-Obiol et al., 2012). Además, tal y como ocurre con los carbones sedimentarios, la antracomasa (peso de carbón vegetal por kilogramo de suelo seco, expresada en mg/kg) es un valor difícil de modelizar debido a la falta de datos y, de momento, se debe calcular y analizar en cada caso de estudio concreto.

Las cicatrices de fuego en los anillos de crecimiento de los árboles para el estudio de la recurrencia de los incendios han sido bien estudiadas en América del Norte. Así, desde los trabajos pioneros en Arizona con *Pinus ponderosa* (Dieterich y Swetnam, 1984) hasta los más recientes de Guiterman et al. (2015) en bosques mixtos de pino (*Pinus ponderosa*) y robles (*Quercus gambelii*), hay una gran variedad de trabajos que han demostrado su utilidad (p. ej. Falk et al., 2011). En cambio, si bien cuesta más encontrar ejemplos en el continente europeo, los existentes demuestran que se puede trabajar con muchos tipos de coníferas como *Pinus sylvestris* en Suecia (Niklasson y Granström, 2000) y *Pinus sylvestris* con *Picea abies* en Polonia (Niklasson et al., 2010). En la zona mediterránea se ha trabajado con *Pinus nigra* en Grecia (Christopoulou et al., 2013), con *Pinus heldreichii* en el suroeste de Bulgaria (Vasileva y Panayotov, 2016) y con *Pinus halepensis* en el sur de Francia (Fournier et al., 2013). En la península Ibérica se ha trabajado con *Pinus nigra* en la sierra Turmell de Castellón (Fulé et al., 2008) y en la sierra de Gredos (Camarero et al., 2018), siendo este trabajo un ejemplo pluridisciplinario que combina tres fuentes de información histórica: tasas de acumulación de carbón vegetal de una turbera, registros históricos detallados de la incidencia de los incendios y la dendrología con cicatrices de los incendios.

4. Consideraciones sobre las señales climáticas y humanas a partir de los incendios forestales del Pirineo y la montaña cantábrica

La combinación de técnicas paleobotánicas y, en especial, la del estudio del car-

bón vegetal ha permitido establecer algunas aproximaciones que han superado las dificultades provocadas por las escalas temporales y espaciales de cada técnica. De este modo, algunas aportaciones recientes para los Pirineos y el norte peninsular ibérico indican una presencia continua de los incendios como factor determinante en la dinámica de los paisajes de montaña (Gil-Romera et al., 2014). Por ello, desde un punto de vista ecológico, los incendios (naturales o humanos) han podido promover la diversidad de hábitats y han podido favorecer la biodiversidad, pero también lo contrario. En la actualidad, el abandono rural y los cambios en los usos y en las cubiertas del suelo (CUCS) han provocado que los fuegos se comporten de manera distinta a como lo venían haciendo, como mínimo desde la Edad Media, a la vez que se consideran un riesgo para las personas y una amenaza para el sistema forestal (Vélez, 2000; Lasanta et al., 2005, 2006).

Los principales resultados obtenidos a partir del estudio de los carbones permiten discutir algunos de los aspectos a considerar en el futuro desde la arqueología del paisaje:

1. El fuego forma parte de nuestros paisajes de montaña con independencia de la comunidad vegetal existente. A su vez, la cantidad de biomasa parece ser un factor determinante para que se produzcan con mayor o menor intensidad. De tal forma, queman tanto los paisajes mediterráneos como los atlánticos, tal y como se ha observado en trabajos realizados en zonas de coníferas de los Pirineos (Cunill et al., 2013; Pérez-Obiol et al., 2012) y en zonas de frondosas de la montaña cantábrica (Carracedo-Martín et al., 2017 y 2018). El uso y manejo del fuego humano es un factor cultural que se debe tener muy en cuenta. La distinción entre los fuegos naturales y los antrópicos sigue siendo uno de los retos, tanto de la geohistoria ambiental como de la arqueología del paisaje.
2. Desde el inicio del Holoceno, en sentido amplio, hay una presencia destacada de incendios. Este hecho se ha relacionado hasta el momento con factores climáticos (los eventos áridos del 9300 años o 8200 años serían buenos ejemplos) y la incidencia solar máxima entre el inicio del Holoceno y aproximadamente 9000 años (Gil-Romera et al., 2014). Los resultados polínicos descritos en los Pirineos y en Cantabria confirman la idea de un paisaje gobernado por vectores naturales, como demuestra la ausencia de indicadores antrópicos relacionados con la ganadería y la agricultura en los diagramas polínicos. Asimismo, también es cierto que los incendios podrían ser un indicador de gestión del paisaje como ocurre en otras partes del mundo (Bird et al., 2005), los cuales podrían relacionarse con un contexto gestionado por grupos de «cazadores recolectores». No obstante, la falta de trabajos arqueológicos locales impide discutir estas interpretaciones y discernir si podría haber habido un origen distinto del natural. Hasta el momento los datos arqueológicos no permiten ir más allá de la interpretación de los diagramas polínicos y de la información paleobotánica a través de los carbones, los cuales indican un incremento de los incendios sin relación con la actividad humana.

3. Las perturbaciones más importantes en la historia forestal tienen en los fuegos su causa principal. Además, a lo largo de la historia forestal, los indicios del fuego han sido crecientes desde el Neolítico, con un punto de inflexión durante los últimos 3.000 años cuando se generalizan y muestran su máxima actividad durante la Edad Media (Riera, 1996; Bal et al. 2010; Pèlachs et al., 2011).
4. La caracterización del régimen de incendios de vegetación leñosa es fácil de detectar a partir del análisis de macrocarbones sedimentarios (>150 µm), mientras que para el estudio de los espacios abiertos los microcarbones sedimentarios (<150 µm) y la pedoantracología pueden ser una buena fuente. Las informaciones aportadas por la arqueología del paisaje han de ser un buen complemento para interpretar hasta qué punto existía manejo de los espacios abiertos o del bosque. No obstante, en la actualidad faltan trabajos de pedoantracología para situar con precisión especies forestales quemadas y, a partir de ellas, explicar su distribución pretérita y su relación con los yacimientos.
5. El hecho de que angiospermas y gimnospermas dejen la misma señal en los incendios es un tema por trabajar en el futuro. Falta reflexión sobre las pautas comparativas de los valores del fuego de distintos lugares, la biomasa quemada y la estructura del paisaje forestal de cada momento. Por ello los estudios antracológicos en las antiguas plazas carboneras y los antiguos hornos de reducción pueden ser una fuente de información complementaria a tener muy en cuenta debido a la selección específica de coníferas y frondosas (Euba-Rementeria, 2008; Pèlachs et al., 2009).

5. Comentarios finales

La arqueología del paisaje tiene en el estudio de los incendios forestales una fuente de información necesaria e imprescindible para el estudio del marco ambiental y humano en los yacimientos de las zonas de montaña. Las limitaciones de los métodos y las técnicas utilizadas en el estudio de las perturbaciones provocadas por el fuego obligan a considerar el trabajo desde ópticas pluridisciplinarias y a partir de fuentes complementarias, motivo por el cual no parece adecuado afrontar estudios de arqueología del paisaje sin considerar la geohistoria ambiental ni las investigaciones paleobotánicas.

Referencias bibliográficas

Badia, A.; Pèlachs, A.; Vera, A.; Tulla, A. F.; Soriano, J. M. (2014). «Cambios en los usos y cubiertas del suelo y los efectos en la vulnerabilidad en las comarcas de montaña de Cataluña: Del rol del fuego como herramienta de gestión a los incendios como amenaza». *Pirineos*, 169 (enero-diciembre). <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2014.169001>

Bal, M. C.; Rendu, C.; Ruas, M.; Campmajo, P. (2010). «Paleosol charcoal. Reconstructing vegetation history in relation to agro-pastoral activities since the Neolithic: A case study in the Eastern French Pyrenees». *Journal of Archaeological Science*, 37 (8), 1785-1797. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.035>

Battarbee, R. W.; Gasse, F.; Stickley, C. E. (2005). *Past climate variability through Europe and Africa*. Dordrecht: Springer.

Beato, S.; Poblete, M. A.; Cunill, R. (2019). «*Taxus baccata* in the Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano)». *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81. <https://doi.org/10.21138/bage.2772>

Bennett, K. D.; Willis, K. J. (2001). «Pollen». En: Smol, J. P.; Birks, H. J. B.; Last, W. M. (Eds.). *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Vol. 3: Terrestrial, Algal, and Silaceous Indicators*. Dodrecht: Kluwer Academic Publishers, 5-32.

Bird, D. W.; Bliege Bird, R.; Parker, C. H. (2005). «Aboriginal Burning Regimes and Hunting Strategies in Australia's Western Desert». *Human Ecology*, 33 (4), 443-464. <https://doi.org/10.1007/s10745-005-5155-0>

Burjachs, F.; Expósito, I. (2015). «Charcoal and pollen analysis: Examples of Holocene fire dynamics in Mediterranean Iberian Peninsula». *Catena*, 135, 340-349. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.006>

Camarero, J. J.; Sangüesa-Barreda, G.; Montiel-Molina, C.; Seijo, F.; López-Sáez, J. A. (2018). «Past growth suppressions as proxies of fire incidence in relict Mediterranean black pine forests». *Forest Ecology and Management*, 413 (1), 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.046>

Carcaillet, C.; Bergman, I.; Delorme, S.; Hornberg, G.; Zackrisson, O. (2007). «Long-term fire frequency not linked to prehistoric occupations in northern Swedish boreal forest». *Ecology*, 88 (2), 465-477. <http://dx.doi.org/ 10.1890/0012-9658(2007)88[465:lffnlt]2.0.co;2>

Carcaillet, C.; Bouvier, M.; Fréchette, B.; Larouche, A. C.; Richard, P. J. H. (2001). «Comparison of pollen-slide and sieving methods in lacustrine charcoal analysis for local and regional fire history». *Holocene*, 11, 467-476. <http://dx.doi.org/10.1191/095968301678302904>

Carcaillet, C.; Hörnberg, G.; Zackrisson, O. (2012). «Woody vegetation, fuel and fire track the melting of the Scandinavian ice-sheet before 9500 cal yr BP». *Quaternary Research*, 78 (3), 540-548. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.08.001>

Carracedo-Martín, V.; Cunill-Artigas, R.; García-Codron, J. C.; Pèlachs, A.; Pérez-Obiol, R.; Soriano-López, J. M. (2017). «Fuentes para la geografía histórica de los incendios forestales: Algunas consideraciones metodológicas». *Cuadernos Geográficos*, 56 (3), 66-89. Recuperado de <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/5299>

— (2018). «History of fires and vegetation since the Neolithic in the Cantabrian Mountains (Spain)». *Land Degradation and Development*, número especial, 1-13. <https://doi.org/10.1002/ldr.2891>

Castellnou, M.; Prat-Guitart, N.; Arilla, E.; Larrañaga, A.; Nebot, E.; Castellarnau, X.; Vendrell, J.; Pallàs, J.; Herrera, J.; Monturiol, M.; Cespedes, J.; Pagès, J.; Gallardo, C.; Miralles, M. (2019). «Empowering strategic decision making for wildfire management: Avoiding the fear trap and creating a resilient landscape». *Fire Ecology*, 15, 31. <https://doi.org/10.1186/s42408-019-0048-6>

Christopoulou, A.; Fulé, P. Z.; Andriopoulos, P.; Sarris, D.; Arianoutsou, M. (2013). «Dendrochronology-based fire history of *Pinus nigra* forests in Mount Taygetos, Southern Greece». *Forest Ecology and Management*, 293 (1), 132-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.048>

Clark, J. S. (1988). «Particle motion and the theory of charcoal analysis: Source area, transport, deposition and sampling». *Quaternary Research*, 30, 67-80. <https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90088-9>

Conedera, M.; Tinner, W.; Neff, C.; Meurer, M.; Dickens, A. F. (2009). «Reconstructing past fire regimes: Methods, applications, and relevance to firemanagement and conservation». *Quaternary Science Reviews*, 28, 555-576. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.11.005>

Courtney-Mustaphi, C. J.; Pisaric, M. F. J. (2014). «A classification for macroscopic charcoal morphologies found in Holocene lacustrine sediments». *Progress in Physical Geography*, 38 (6), 734-754. <https://doi.org/10.1177/0309133314548886>

Cuadrat-Prats, J.; Lasanta-Martínez, T.; Vicente Serrano, S. (2000). «Influencia de la ganadería en la evolución del riesgo de incendio en función de la vegetación en un área de montaña: El ejemplo del valle de Borau (Pirineo aragonés)». *Geographicalia*, 38, 33-58.

Cunill, R.; Soriano, J. M.; Bal, M. C.; Pèlachs, A.; Rodríguez, J. M.; Pérez-Obiol, R. (2013). «Holocene high-altitude vegetation dynamics in the pyrenees: A pedoanthracology contribution to an interdisciplinary approach». *Quaternary International*, 289, 60-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2012.04.041>

Dearing, J. A.; Acma, B.; Bub, S.; Chambers, F. M.; Chen, X.; Cooper, J.; Crook, D.; Dong, X. H.; Dotterweich, M.; Edwards, M. E.; … Zhang, R. (2015). «Social-ecological systems in the Anthropocene: The need for integrating social and biophysical records at regional scales». *The Anthropocene Review*, 2 (3), 220-246. <https://doi.org/10.1177/2053019615579128>

Dieterich, J. H.; Swetnam, T. W. (1984). «Dendrochronology of a Fire-Scarred Ponderosa Pine». *Forest Science*, 30 (1), 238-247.

Dutoit, T.; Thinon, M.; Talon, B.; Buisson, E.; Alard, D. (2009). «Sampling soil wood charcoals at a high spatial resolution: A new methodology to investigate the origin of grassland plant communities». *Journal of Vegetation Science*, 20 (2), 349-358. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.05403.x>

Enache, M. D.; Cumming, B. F. (2006). «Tracking recorded fires using charcoal morphology from the sedimentary sequence of Prosser Lake, British Columbia (Canada)». *Quaternary Research*, 65, 282-292. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2005.09.003>

Euba-Rementeria, I. (2008). *Análisis antracológico de estructuras altimontanas en el Valle de la Vansa-Sierra del Cadí (Alt Urgell) y en el Valle del Matriu (Andorra): Explotación de recursos forestales del Neolítico a la época moderna*». Tarragona: Universitat Rovira i Virgili. Recuperado de <https://www.tdx.cat/handle/10803/8620#page=1>

Faegri, K.; Iversen, J. (1989). *Textbook of Pollen Analysis*. Chichester: John Wiley.

Falk, D. A.; Heyerdahl, E. K.; Brown, P. M.; Farris, C.; Fulé, P. Z.; McKenzie, D.; Swetnam, T. W.; Taylor, A. H.; Van Horne, M. L. (2011). «Multi-scale controls of historical forest-fire regimes: New insights from fire-scar networks». *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9 (8), 446-454. <https://doi.org/10.1890/100052>

Finsinger, W.; Kelly, R.; Fevre, J.; Magyari, E. K. (2014). «A guide to screening charcoal peaks in macrocharcoal-area records for fire-episode reconstructions». *Holocene*, 24 (8), 1002-1008. <https://doi.org/10.1177/0959683614534737>

Fournier, T. P.; Battipaglia, G.; Brossier, B.; Carcaillet, C. (2013). «Fire-scars and polymodal age-structure provide evidence of fire-events in an Aleppo pine population in southern France». *Dendrochronologia*, 31 (3), 159-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2013.05.001>

Fulé, P. Z.; Ribas, M.; Gutiérrez, E.; Vallejo, R.; Kayed, Margot, W. (2008). «Forest structure and fire history in an old *Pinus nigra* forest, eastern Spain». *Forest Ecology and Management*, 255 (3-4), 1234-1242. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.046>

Genries, A.; Finsinger, W.; Asnong, H.; Bergeron, Y.; Carcaillet, C.; Garneau, M.; Hély, C.; Ali, A. A. (2012). «Local versus regional processes: Can soil characteristics overcome climate and fire regimes by modifying vegetation trajectories?». *Journal of Quaternary Science*, 27, 745-756.

Gil-Romera, G.; González-Sampériz, P.; Lasheras-Álvarez, L.; Sevilla-Callejo M.; Moreno, A.; Valero-Garcés, B.; López-Merino, L.; Carrión, J. S.; Pérez Sanz, A.; Aranbarri, J.; García-Prieto, E. (2014). «Biomass-modulated fire dynamics during the last glacial-interglacial transition at the Central Pyrenees (Spain)». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 402, 113-124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.03.015>

González-Pellejero, R.; Allende, F.; López-Sáez, J. A.; Frochoso, M.; Alba-Sánchez, F.; Abel-Schaad, D. (2014). «Dinámicas naturales y antrópicas en los paisajes vegetales de los valles internos de Cantabria occidental (Norte de España)». *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 65, 139-165. <https://doi.org/10.21138/bage.1747>

González-Sampériz, P.; Montes, L.; Aranbarri, J.; Leunda, M.; Domingo, R.; Laborda, R.; Sanjuan, Y.; Gil-Romera, G.; Lasanta, T.; García-Ruiz, J. M. (2019). «Scenarios, timing and paleo-environmental indicators for the identification of Anthropocene in the vegetal landscape of the Central Pyrenees (NE Iberia)». *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 45 (1), 167-193. <http://doi.org/10.18172/cig.3691>

Guiterman, C. H.; Margolis, E. Q.; Swetnam, T. W. (2015). «Dendroecological methods for reconstructing high-severity fire in Pine-Oak Forests». *Tree-Ring Research*, 71 (2), 67-77. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-71.2.67>

Jordan, T. B; Seen, A. J.; Jacobsen, G. E. (2006). «Levoglucosan as an atmospheric tracer for woodsmoke». *Atmospheric Environment*, 40, 5316-5321. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.023>

Lasanta, T.; Vicente-Serrano, S. M.; Anáez-Vadillo, J. A. (2011). «La revegetación en las montañas españolas: ¿Dejar hacer o intervenir en el territorio?». *Geographicalia*, 59-60, 199-212.

Lasanta-Martínez, T.; González-Hidalgo, J. C.; Vicente-Serrano, S. Y.; Sferi, E. (2006). «Using landscape ecology to evaluate an alternative management scenario in abandoned Mediterranean mountain areas». *Landscape and Urban Planning*, 78, 101-114. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.06.003>

Lasanta-Martínez, T.; Vicente-Serrano, S. Y.; Cuadrat-Prats, J. M. (2005). «Mountain Mediteranean landscape evolution caused by abandonment of traditional primary activities: A study of Spanish Central Pyrenees». *Applied Geography*, 25, 47-65. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2004.11.001>

Marquer, L. (2009). *Apport des signaux polliniques et charbons à la reconstitution des paléoenvironnements et à la connaissance des relations homme-milieu au Pleistocène dans le bassin de la Loire moyenne (France)*. [Tesis de doctorado en Paleobotánica.] París: Muséum National d'Histoire naturelle. École Doctorale Sciences de la nature et de l'Homme - Évolution et écologie.

Moore, P. D.; Webb, J. A.; Collinson, M. E. (1991). *Pollen Analysis*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.

Niklasson, M.; Granström, A. (2000). «Numbers and sizes of fires: Long-term spatially explicit fire history in a swedish boreal landscape». *Ecology*, 81 (6), 1484-1499. <https://doi.org/10.2307/177301>

Niklasson, M.; Zin, E.; Zielonka, T.; Feijen, M.; Korczyk, A. F.; Churski, M.; Samojlik, T.; Jędrzejewska, B.; Gutowski, J. M.; Brzeziecki, B. (2010). «A 350-year tree-ring fire record from Białowieza Primeval Forest, Poland: Implications for Central European lowland fire history». *Journal of Ecology*, 98 (6), 1319-1329. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01710.x>

Olmedo-Cobo, J. A.; Cunill, R.; Gómez-Zotano, J. (2019). «The native status of *Pinus pinaster* on serpentine soils: Charcoal analysis and palaeoenvironmental history in Sierra Bermeja (southern Iberian Peninsula, Spain)». *Vegetation History and Archaeobotany*, 28 (4), 417-432.

Pardo, R. (2020). «La pedoantracología en España: Una revisión bibliográfica». *Pirineos*, 175, e059. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2020.175009>

Patterson, W. A.; Edwards, K. J.; Maguire, D. J. (1987). «Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire». *Quaternary Science Reviews*, 6 (1), 3-23. <https://doi.org/10.1016/0277-3791(87)90012-6>

Pèlachs, A.; Julià, R.; Pérez-Obiol, R.; Soriano, J. M.; Bal, M. C.; Cunill, R.; Catalan, J. (2011). «Potential influence of Bond events on mid-Holocene climate and vegetation in southern Pyrenees as assessed from Burg lake LOI and pollen records». *The Holocene*, 21 (1), 95-104. <https://doi.org/10.1177/0959683610386820>

Pèlachs, A.; Nadal, J.; Soriano, J. M.; Molina, D.; Cunill, R. (2009). «Changes in Pyrenean woodlands as a result of the intensity of human exploitation: 2,000 years of metallurgy in Vallferrera, northeast Iberian Peninsula». *Vegetation History and Archeobotany*, 18 (5), 403-416. <https://doi.org/10.1007/s00334-009-0218-6>

Pèlachs-Mañosa, A.; García-Codron, J. C.; Soriano-López, J. M.; Pérez-Obiol, R.; Catalán-Aguilar, J. (2016). «Papel de los incendios en las dinámicas forestales del Norte de la Península Ibérica durante el Holoceno». En: Gómez-Zotano, J.; Arias-García, J.; Olmedo-Cobo, J. A.; Serrano-Montes, J. L. (eds.). *Avances en Biogeografía: Áreas de distribución: entre puentes y barreras*. Granada: Universidad de Granada, 553-562.

Pérez-Obiol, R.; Bal, M. C.; Pèlachs, A.; Cunill, R.; Soriano, J. M. (2012). «Vegetation dynamics and anthropogenically forced changes in the Estanilles peat bog (southern Pyrenees) during the last seven millennia». *Vegetation History and Archaeobotany*, 21, 385-396.

Pérez-Obiol, R.; García-Codron, J. C.; Pèlachs, A.; Pérez-Haase, A.; Soriano, J. M. (2016). «Landscape dynamics and fire activity since 6740 cal yr BP in the Cantabrian region (la Molina peat bog, Puente Viesgo, Spain)». *Quaternary Science Reviews*, 135, 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.01.021>

Power, M. J.; Marlon, J.; Ortiz, N.; Bartlein, P. J.; … Zhang, J. H. (2008). «Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: An assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data». *Climate Dynamics*, 30, 887-907. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-007-0334-x>

Pyne, S. (2019). *Fire: A Brief History*. Seattle: Seattle University.

Reasoner, M.; Becker, A.; Bugmann, H.; Graumlich, L.; Haeberli, W.; Messerli, B.; Oldfield, F. (2001). «The Mountain Research Initiative and Past Global Changes». *PAGES News*, 9, 4-6. <https://doi.org/10.22498/pages.9.3.4>

Riera, S. (1996). «Paleoambient: Incendis i pertorbacions forestals d'origen antròpic durant el neolític antic al pla de Barcelona (sector central de la costa catalana)». *Rubricatum: Revista del Museu de Gavà*, 1, 35-42.

Rivas-Ruiz, P. (2017). *Validation and application of pyrogenic and vegetation biomarkers as proxies*. [Tesis doctoral.] Universitat Autònoma de Barcelona. Recuperado de <https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=1494759>

Scott, A. C. (2010). «Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis». *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 291 (1-2), 11-39. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.12.012>

— (2020). *Planeta en llamas: La historia del fuego a través del tiempo*. Barcelona: Galaxia Gutenberg.

Smol, J. P.; Birks, J. B.; Last, W. M. (2003). *Tracking environmental change using lake sediments*. Volumen 3: *Terrestrial, algal and siliceous indicators*. Dordrecht, Boston, Londres: Kluwer Academic Publishers.

Talon, B. (2010). «Reconstruction of Holocene high-altitude vegetation cover in the French southern Alps: Evidence from soil charcoal». *The Holocene*, 20 (1), 35-44. <https://doi.org/10.1177/0959683609348842>

Talon, B.; Carcaillet, C.; Thinon, M. (1998). «Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocene dans les alpes françaises». *Géographie Physique et Quaternaire*, 52 (2), 195-208. <https://doi.org/10.7202/004875ar>

Touflan, P.; Talon, B.; Walsh, K. J. (2010). «Soil charcoal analysis. A reliable tool for spatially precise studies of past forest dynamics: A case study in the French southern Alps». *The Holocene*, 20 (1), 45-52. <https://doi.org/10.1177/0959683609348900>

Trouet, V. (2021). *Escrito en los árboles: La historia del mundo contada en anillos*. Barcelona: Crítica.

Turner, R.; Roberts, N.; Jones, M. D. (2008). «Climatic pacing of Mediterranean fire histories from lake sedimentary microcharcoal». *Global and Planetary Change*, 63 (4), 317-324. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.07.002>

Valese, E.; Conedera, M.; Held, A. C.; Ascoli, D. (2014). «Fire, humans and landscape in the European Alpine region during the Holocene». *Anthropocene*, 6, 63-74. Recuperado de <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A5001>

Vélez, R. (2000). «Perspectiva histórica de los incendios forestales en España». En: Vélez, R. (coord.). *La defensa contra incendios forestales: Fundamentos y experiencias*. Madrid: McGraw Hill.

Vasileva, P.; Panayotov, M. (2016). «Dating fire events in *Pinus heldreichii* forests by analysis of tree ring cores». *Dendrochronologia*, 38, 98-102. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.04.001>

Whitlock, C.; Larsen, C. (2002). «Charcoal as a fire proxy». En: Smol, J. P.; Birks, H. J.; Last, W. M. (eds.). *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*, vol. 3. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 75-97. <https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1_5>

Whitlock, C.; Millspaugh, S. H. (1996). «Testing the assumptions of fire-history studies: An examination of modern charcoal accumulation in Yellowstone National Park, USA». *The Holocene*, 6 (1), 7-15. <https://doi.org/10.1177/095968369600600102>