

El análisis de fitolitos y otros restos vegetales: una nueva metodología arqueambiental aplicada a la reconstrucción de los paisajes culturales de alta montaña durante el Holoceno*

David Rodríguez Antón¹



© del autor

Recibido: 01/12/2021
Aceptado: 27/02/2023

Resumen

El estudio de los microrrestos biológicos presentes en los depósitos sedimentarios es el principal método empleado para la reconstrucción de los cambios climáticos y paleoambientales acaecidos en los últimos miles de años a escala local. Este tipo de parámetros se pueden emplear también para evaluar el impacto humano que las prácticas productivas pudieron ocasionar en los ecosistemas, produciendo paisajes culturales durante el pasado. Entre los diferentes parámetros biológicos utilizados con este objetivo, el análisis de fitolitos es una herramienta cada vez más frecuente en los programas de investigación arqueológicos, siendo conveniente integrar su estudio desde una metodología multiparamétrica cuantitativa, que considere además otros microrrestos de origen vegetal comúnmente presentes en los sedimentos, como el polen, las diatomeas, los microcarbónes y la materia orgánica, entre otros. A pesar de su presencia y potencialidad, los fitolitos han sido escasamente estudiados en medioambientes de alta montaña. En este trabajo se expone una nueva metodología arqueambiental, que ha sido aplicada en el estudio de la ocupación prehistórica del Parque Nacional de Aigüestortes y Estany de Sant Maurici (PNAESM), en el Pirineo occidental de Cataluña. En este caso de estudio, el análisis de fitolitos ha facilitado la caracterización de los primeros paisajes antropizados en esta zona, de modo que a partir de esta aproximación metodológica se pone en valor la incorporación del análisis de fitolitos para el estudio de la historia de los paisajes de alta montaña y particularmente del impacto humano en este proceso.

Palabras clave: bioarqueología; arqueobotánica; paleoecología; Neolítico; Pirineos; subalpino

Abstract. *Phytolith analysis and other plant micro remains: A new archaeo-environmental method applied to the reconstruction of cultural landscapes in high mountain areas during the Holocene*

The study of biological micro-remains found in sedimentary deposits is the main method used for modelling climatic changes and palaeo-environmental occurrences over recent millennia at

* La metodología descrita en este artículo ha sido desarrollada por del Grupo de Arqueología de Alta Montaña (UAB-CSIC) y aplicada en una tesis doctoral (Rodríguez-Antón, 2020) realizada en la Universidad Autónoma de Barcelona. El trabajo de investigación ha sido posible gracias al apoyo del Parque Nacional de Aigüestortes y el Estany de Sant Maurici (PNAESM) y a la financiación de diversos proyectos de investigación públicos (2006EXCAVA00022, OCUPA-088/2009, CUL-PA 2014, HAR2015-66780-P).

1. Universitat Autònoma de Barcelona. Departament de Prehistòria / Institut Català de Paleocologia Humana i Evolució Social (IPHES - CERCA). david.anton79@gmail.com

local level. In the same way, this type of marker can be used to evaluate the human impact that productive practices have had on mountain landscapes, creating cultural landscapes in the past. The use of phytolith analysis in archaeology is an increasingly common approach that can be used as part of an applied multifaceted approach, alongside analysis of other plant micro-remains such as pollen, diatoms, organic matter, micro-charcoals and others. Despite their potential, phytoliths have rarely been used as a proxy in mountain archaeology. In this work, we discuss a new archaeo-environmental method applied in the *Aiguestortes i l'Estany de Sant Maurici* National Park (PNAESM) to study prehistoric occupation in the high mountain areas of the Western Catalan Pyrenees. In this case study, analysis of phytoliths and other plant micro-remains has helped reconstruct and catalogue the first landscapes in the area affected by human activity. It demonstrates the value of incorporating phytolith analysis in the study of the history of high mountain landscapes, and particularly the impact of humans on them.

Keywords: bio-archaeology; archaeo-botany; palaeo-ecology; Neolithic; Pyrenees; subalpine

RODRÍGUEZ-ANTÓN, David (2023). «El análisis de fitolitos y otros restos vegetales: una nueva metodología arqueambiental aplicada a la reconstrucción de los paisajes culturales de alta montaña durante el Holoceno». *Treballs d'Arqueologia*, 26, 127-153. DOI: 10.5565/rev/tda.130

1. Introducción

En las últimas décadas se está haciendo evidente la estrecha relación existente entre la sostenibilidad de las prácticas productivas agropecuarias y la resiliencia de los sistemas socioecológicos tradicionales (Folke, 2006), lo que está implicando, en muchos casos, la pérdida de la biodiversidad asociada a la desaparición de sus respectivos paisajes culturales (Dearing et al., 2015). El calentamiento global actual junto al fuerte impacto antrópico sufrido por los ecosistemas terrestres en los últimos 200 años pone en valor creciente el conocimiento de la historia de los procesos de ocupación y gestión humana de los diversos biomas terrestres, de cara a reevaluar su resiliencia y preservación futura (Walker et al., 2006).

Esta problemática se aplica particularmente a las cordilleras alpinas, dado el fuerte impacto que el cambio climático y productivo está teniendo en los biomas

de montaña y su biodiversidad (Pauli et al., 2012). Este es el caso del bioma subalpino, caracterizado por bosques de coníferas que se desarrollan en climas templados de Eurasia y se localizan en sus extensas cordilleras montañosas (Rivas-Martínez et al., 2011). Las prácticas productivas asociadas a la gestión milenaria de las áreas de alta montaña, como la ganadería estacional o altitudinal (García-Casas et al., 2022; Rendu et al., 2016; Bal et al., 2010), están sufriendo una fuerte regresión debida a los procesos postindustriales, que ponen en riesgo el mantenimiento de los paisajes culturales asociados a dichas prácticas y su sostenibilidad a medio plazo (Lozny et al., 2013).

El paisaje cultural es un producto ecológico y social, fruto del conjunto de actividades humanas productivas realizadas en un espacio geográfico, que en la prehistoria reciente pueden implicar actividades agrícolas, ganaderas, cinegéticas, de abastecimiento de materias primas y

de recursos minerales y vegetales. Esta problemática aconseja profundizar en el conocimiento de la historia del manejo de los biomas de montaña, lo que ha permitido la generación y transformación de los paisajes culturales, de cara a su preservación futura como bienes de interés cultural y ecológico (Catalan et al., 2017).

En síntesis, en este trabajo se describe la metodología empleada en el PNAESM, donde ha sido aplicado el análisis de fitolitos en biomas de alta montaña subalpinos, desde un enfoque propio de la arqueología ambiental, que busca reconstruir las prácticas socioeconómicas que generaron los primeros paisajes culturales en este tipo de ecosistemas (Catalan et al., 2013; Rodríguez-Antón y Gassiot, 2022). En este artículo, concretamente, se detalla el diseño de los muestreos arqueológicos y geológicos realizados, especialmente pensados para regiones de alta montaña. Además, se discute la metodología de referencia aplicada para el análisis de fitolitos en cordilleras alpinas de Europa (Carnelli et al., 2004; Lisztes-Szabó et al., 2019), con el objetivo de evaluar su potencial aplicación en los extensos biomas subalpinos de Eurasia (An et al., 2015; Gavrillov et al., 2018).

1.1. El programa de investigación en alta montaña

Debemos tener en consideración que los medioambientes de alta montaña han sido tradicionalmente considerados marginales en los programas de investigación históricos y especialmente en los arqueológicos, ignorándose su valor patrimonial y cultural hasta las últimas décadas (Gassiot et al., 2014), cuando, en realidad, las áreas montañosas suponen una extensión considerable de Asia central y de Europa

meridional, y su valor ecológico, geológico y estratégico ha sido de gran importancia para las sociedades a lo largo de la historia. Sin embargo, la ocupación y el aprovechamiento humano de los medios de alta montaña han sido escasamente abordados desde una narrativa histórica (Tzoertzis et al., 2010). Fue a partir del descubrimiento, en 1991, del cadáver congelado y bien preservado de un hombre de 5.300 años de antigüedad, localizado en un glaciar a 3.100 metros de altitud en los Alpes tiroleses (Coia et al., 2016), cuando la perspectiva del poblamiento prehistórico de los medios alpinos comenzó a cambiar radicalmente, documentándose en las últimas décadas el poblamiento sistemático de las cordilleras alpinas durante el Neolítico (Remolins y Gibaja, 2018; Gassiot, 2016; Rendu et al., 2016). Por otra parte, desde un enfoque paleoambiental y paleogeográfico, diversos programas de investigación han tratado de evaluar los cambios en el paisaje de las montañas europeas a lo largo de los últimos milenios, en base a criterios esencialmente climáticos (González-Sampériz et al., 2017). La convergencia de ambas líneas de investigación, la arqueológica y la paleoclimática, nos han llevado a tomar en consideración el impacto antrópico de las prácticas agroganaderas en la construcción de los paisajes subalpinos durante, como mínimo, los últimos 7.000 años de poblamiento humano de las montañas (Gassiot et al., 2014).

1.2. Caso de estudio: el Parque Nacional de Aigüestortes y Estany de Sant Maurici

En esta línea de investigación sobre las áreas de alta montaña europeas (Tzoertzis et al., 2010) se ha escogido como caso de

estudio el Parque Nacional de Aigüestortes y Estany de Sant Maurici (PNAESM) por tres motivos:

1. Se ha realizado un trabajo arqueológico de prospección y datación radiométrica de las ocupaciones humanas, así como diversas excavaciones sistemáticas (Gassiot, 2016).
2. Se ha desarrollado una intensa investigación paleoambiental y paleoclimática a partir de los registros paleolacustres holocénicos (Catalan et al., 2013; Rull et al., 2021).
3. Es un área especialmente protegida a nivel medioambiental y dedicada a la investigación científica (Catalan et

al., 2013), de manera que los resultados de ambas líneas de trabajo (arqueológica y paleoambiental) convergen en un programa de investigación interdisciplinario integrado desde hace más de una década, gracias a una perspectiva científica realmente innovadora (Gassiot et al., 2014; Catalan et al., 2019).

Partiendo de la configuración del espacio arqueológico a nivel territorial y geográfico regional (Gassiot et al., 2020a), nuestro caso de estudio se ha circunscrito al área nuclear del PNAESM, que comprende la cabecera del valle de Èspot y el valle de Sant Nicolau (figura 1). Se trata

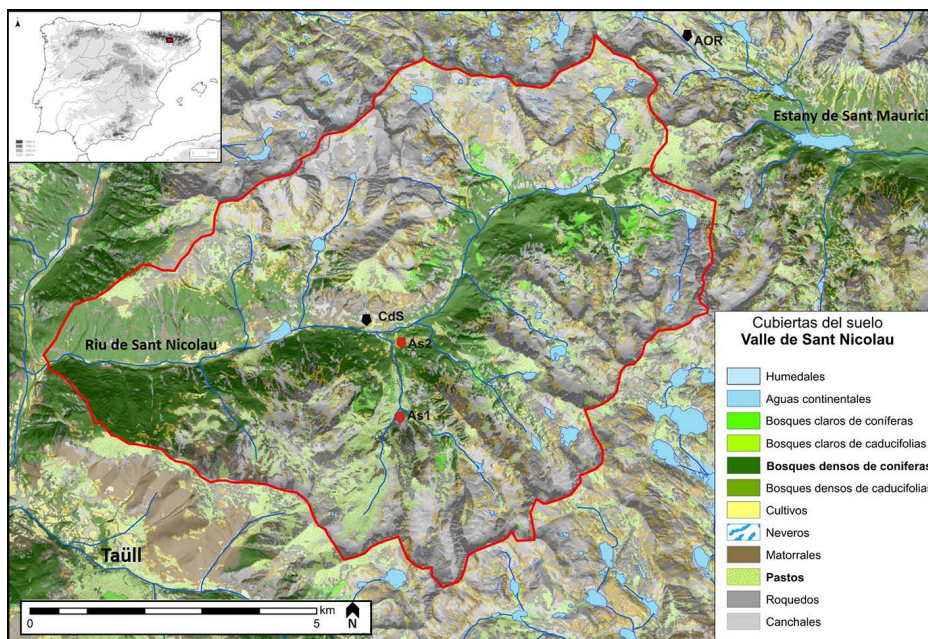


Figura 1. Mapa de la cobertura vegetal del valle de Sant Nicolau y la cabecera del valle de Èspot. En rojo se localizan los sondeos pedosedimentarios (AS1, AS2) y en negro los yacimientos arqueológicos: Cova del Sardo (CdS) y Abric de les Obagues de Ratera (AOR). Mapa base de cobertura del suelo del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya – ICGC / CREA.

de un territorio de alta montaña que se desarrolla entre 1.318 y 2.983 m s. n. m., de manera que incluye cinco pisos bioclimáticos (montano superior, subalpino inferior, subalpino superior, alpino y nival) (Ninot et al., 2007 y 2017) y una gran biodiversidad de comunidades vegetales típicas (Carrillo y Ninot, 1992) (figuras 1 y 3).

Dado el interés científico del PNAESM como laboratorio de pruebas y caso de estudio para los biomas de alta montaña del sur de Europa y el interés metodológico suscitado en explorar nuevas líneas de trabajo capaces de integrar los enfoques arqueológico y paleoambiental, el estudio de los fitolitos ha sido evaluado como un nuevo parámetro aplicable en esta línea de investigación multidisciplinaria (Catalan et al., 2013).

1.3. *Microarqueología*

Esencialmente, todo sedimento está compuesto por partículas minerales y otros agregados de origen orgánico. Se pueden distinguir por su tamaño entre macroscópicos y microscópicos (elementos menores de 0,25 milímetros de longitud), que, tipológica y numéricamente, son la mayor parte (Benito-Calvo et al., 2014). Generalmente, los microrrestos que hallamos en los sedimentos son mineralizaciones de partes de la estructura de los organismos vivos o bien elementos carbonizados (Weiner, 2010; Buxó y Piqué, 2003). El origen de los microrrestos biológicos que se encuentran en los suelos se localiza siempre en los organismos vivos, capaces de producir algunas estructuras o partes orgánicas que pasan a ser inorgánicas tras la muerte del organismo mediante procesos de fosilización, o bien que ya eran inorgánicas desde su formación, como los

fitolitos (Strömberg et al., 2018), las carcasas polínicas (Mander y Punyasena, 2018) o las de algunas microalgas (Mann, 1989). Estas partes inorgánicas de los seres vivos no se descomponen fácilmente, sino que, generalmente, se incorporan al sustrato terrestre y, finalmente, a los suelos mediante procesos tafonómicos postdeposicionales (Weiner, 2010; Croft et al., 2018). Entre los microrrestos que producen las plantas y que se encuentran frecuentemente depositados en los sedimentos, sobre todo lacustres, destaca el polen; concretamente las esporopoleninas de politerpeno, que son las carcasas que contienen el material celular, altamente resistentes a la disolución (Burjachs et al., 2003; Mander y Punyasena, 2018). Otros microrrestos que aportan información paleoambiental son las carcasas silíceas de algunas microalgas acuáticas, como las diatomeas y crisofíceas (Mann, 1989; Pla-Rabés y Catalan, 2018). Entre los microrrestos que pueden conservarse en depósitos sedimentarios podemos también distinguir algunos de origen animal, como los esferolitos fecales, que son pequeñas estructuras semiesféricas de carbonato de calcio (CaCO_3), de entre 3 y 30 μm , producidas en el aparato digestivo de los rumiantes (Canti, 1998; Alonso-Eguíluz et al., 2017; Dunseth y Shahack-Gross, 2018). No obstante, hay un tipo de microrresto vegetal, cada vez más empleado en arqueología prehistórica, pero que paradójicamente ha sido muy poco utilizado como parámetro paleoambiental en zonas de alta montaña: los fitolitos de sílice (Piperno, 2006; Albert y Portillo, 2014; Rashid et al., 2019). De hecho, el análisis de fitolitos en los biomas de alta montaña no había sido aplicado aún en los Pirineos, mientras que su estudio sistemático en las

cordilleras alpinas se limita a los Alpes occidentales en Europa (Carnelli et al., 2001 y 2004) o a la cordillera del Himalaya en Asia central (An et al., 2015).

1.4. Potencialidad del análisis de fitolitos

Los fitolitos son un microrresto biológico habitualmente presente en los sedimentos formados en contextos geológicos con cobertura vegetal, que se emplea en diferentes líneas de investigación científica como la paleoecología o la arqueología (Rapp y Mulholland, 1992; Albert y Weiner, 2001; Piperno, 2006; Albert y Portillo, 2014; Strömberg et al., 2018; Rashid et al., 2019). Los fitolitos son estructuras celulares o intercelulares silicificadas, generalmente de dióxido de sílice (SiO_2), procedentes de la epidermis de las plantas vasculares (Piperno, 2006; Rashid et al., 2019). Estos microrrestos vegetales suelen conservarse en diferentes contextos sedimentarios. Pueden hallarse incluso en depósitos de millones de años de antigüedad, ya que tienen la característica de preservarse en suelos ácidos, en los cuales generalmente se disuelven el polen o los almidones (Strömberg et al., 2018). Por lo tanto, su aplicación potencial es indispensable de cara a la reconstrucción de los ecosistemas y paisajes del pasado, especialmente a escala local (Albert, 2015). Además, su extensa aplicación arqueológica, como parámetro para la reconstrucción de las prácticas productivas en contextos de hábitat y de producción de alimentos (Kadowaki et al., 2015), también los convierte en un microrresto directamente indicativo de la alteración antrópica de los paisajes, junto con otros microrrestos, como el polen, las diatomeas y los carbonos sedimentarios (Albert et al., 2018; Berger et al., 2016; Delhon et al., 2009).

Aunque han sido publicados en los últimos años algunos trabajos científicos sobre fitolitos en contextos sedimentarios o pedológicos de zonas de montaña subalpinas de la región eurosiberiana, estas investigaciones han sido enfocadas desde una perspectiva esencialmente ecológica y paleoclimática que no toma en consideración el impacto antrópico en los ecosistemas (Carnelli et al., 2004; An et al., 2015; Gavrilov et al., 2018). De hecho, el estudio de los fitolitos desde una perspectiva geoarqueológica, enfocada en la detección de la antropización del paisaje en contextos de montaña europeos durante el Holoceno, es una línea de trabajo realmente incipiente (Delhon et al., 2009; Berger et al., 2016).

En definitiva, el análisis de fitolitos es una herramienta muy útil para la investigación histórica, tanto aplicada al estudio de la gestión de los productos vegetales en los contextos de hábitat y de producción como a la hora de localizar e interpretar las áreas de ocupación de las poblaciones en el pasado y la transformación de los paisajes culturales (Albert, 2015). Concretamente, los fitolitos se han mostrado un parámetro especialmente relevante a la hora de delimitar y caracterizar el asentamiento humano, más allá de los espacios de hábitat (Delhon et al., 2009). Por tanto, este tipo de aproximación metodológica, basada en el estudio arqueológico de los fitolitos y otros microrrestos vegetales, permite caracterizar espacios donde se realizaban actividades productivas que implican una transformación activa o pasiva del paisaje (Albert, 2015; Piqué et al., 2021).

Particularmente, el análisis de fitolitos ha sido aplicado en este caso de estudio en tres objetivos científicos diferentes:

1. Evaluar la conservación diferencial de fitolitos en suelos de fondos de valle subalpinos alterados por la acción humana durante el Holoceno.
2. Identificar y caracterizar las acciones antrópicas y las prácticas productivas que alteraron el paisaje en este bioma.
3. Detectar cambios en la dinámica de los paisajes subalpinos a lo largo del Holoceno y su secuencia cronológica.

2. El análisis de fitolitos en alta montaña

2.1. Fitosociología de la alta montaña

Los biomas alpino y subalpino se extienden a lo largo de toda la región eurosiberiana meridional, localizados en zonas de montaña de clima templado. Se caracterizan por el desarrollo de bosques de coníferas con sotobosques de betuláceas y ericáceas (Ninot et al., 2017), dando lugar también a praderas alpinas, humedales y pastizales de uso ganadero (Gómez-García, 2008). Con algunas variaciones ecológicas locales o regionales, este bioma presenta unas comunidades vegetales comunes en toda su extensión geográfica (Rivas-Martínez et al., 2011). A nivel geobotánico puede dividirse en tres ecozonas: alpina, subalpina y altimontana (Ninot et al., 2007). Estas ecozonas o biomas se desarrollan en función de la altitud y de las condiciones climáticas, que a su vez dependen de la latitud y la continentalidad (Rivas-Martínez et al., 2011). Mientras en regiones septentrionales como los Alpes escandinavos podemos encontrar el bioma subalpino a 600 metros de altitud, en la Europa meridional los ecosistemas de alta montaña se desarrollan entre los 1500-1800 me-

tros hasta los 2600-2800 metros de altitud, aproximadamente (Ninot et al., 2017) (figura 2).

En el límite inferior de la alta montaña, se transita hacia el piso montano que puede desarrollarse entre los 1.100-1.900 m s. n. m. en regiones alpinas mediterráneas o meridionales (Ninot et al., 2007). Este bioma se caracteriza por el desarrollo de bosques mixtos de caducifolias, con dominio de los abetales (*Abies alba*), pinares albares (*Pinus sylvestris*), robledos (*Quercus robur*) y hayedos (*Fagus sylvatica*), con fuerte presencia de ericáceas (*Rhododendron*, *Vaccinium* y *Arctostaphylos*) y otras caducifolias secundarias (*Corylus*, *Tilia*, *Alnus* y *Sorbus*). En las cordilleras de Europa meridional, el piso subalpino inferior se desarrolla entre los 1.500/1.700 m s. n. m. y los 1.800/2.000 m s. n. m. Se caracteriza por presentar bosques mixtos con dominio de coníferas (*Pinus*, *Abies* y *Picea*) y betuláceas, como abedules (*Betula*), avellanos (*Corylus*) y otras caducifolias (*Fagus*, *Sorbus*, *Salix*, *Tilia*, *Fraxinus* y *Alnus*). Las poáceas (*Festuca*, *Nardus* y *Poa*) y las juncáceas (*Carex*, *Juncus* y *Luzula*) se desarrollan en zonas deforestadas y humedales, respectivamente, donde falta la vegetación leñosa potencial. El piso subalpino superior se encuentra entre los 1.800/2.000 m s. n. m. y los 2.200/2.400 m s. n. m., siendo el piso bioclimático altitudinal más elevado donde dominan las formaciones boscosas boreoalpinas. Se trata de bosques, más o menos abiertos, de pino negro (*Pinus mugo* y *Pinus uncinata*), con presencia de abedules (*Betula*). En zonas de sotobosque o roquedos se desarrollan enebrales (*Juniperus*) y brezales de diversas ericáceas (*Rhododendron*, *Vaccinium* y *Arctostaphylos*). En las zonas de transición al piso

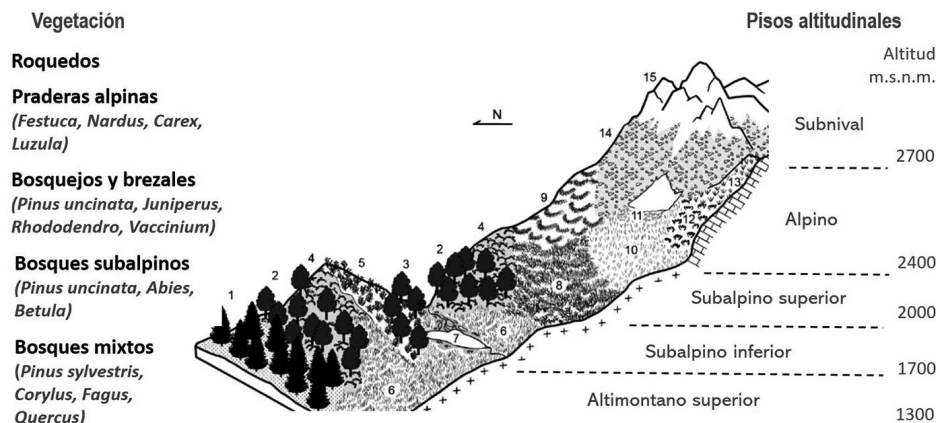


Figura 2. Representación fitosociológica de las comunidades vegetales potenciales de las zonas de alta montaña de los Pirineos axiales centrales. El corte altitudinal incluye los pisos: altimitano (1.100/1.300 – 1.600/1.800 m s. n. m.), subalpino (1.900/2.100 – 2.300/2.500 m s. n. m.), alpino (2.300/2.500 – 2.600/2.800 m s. n. m.) y subnival (2.600/2.800 – 3.000/3.200 m s. n. m.). Los números representan las siguientes comunidades vegetales: Bosques subalpinos: 1) *Rhododendro – Abietetum*; 2) *Rhododendro – Pinetum uncinatae*; 3) *Arctostaphylo – Pinetum uncinatae*. Brezales de ericáceas: 4) *Rhododendro – Vaccinión*; Enebrales: 5) *Juniperion nanae*; 6) *Alchemillo-Nardetum*. Humedales y turberas: 7) *Caricion fuscae*. Praderas alpinas: 8) *Selino-Festucetum eskiae*; 9) *Festucion eskiae*; 10) *Festucion airoidis*; 11) *Salicion herbaceae*. Vegetación subnival: 12) *Dryado-Salicetum pyrenaicae*; 13) *Oxytropido foucadii-Kobresietum myosuroidis*; 14) *Senecionion leucophylli*. Roquedos: 15) *Androsacion vandellii* (Ninot et al., 2017: 327).

alpino son frecuentes los suelos nitrófilos e hidrófilos donde se pueden formar turberas, humedales y pastizales de juncáceas (*Carex*, *Juncus* y *Luzula*), junto a las predominantes praderas de poóideas alpinas (*Festuca*, *Nardus* y *Poa*). Entre los 2.200/2.400 m s. n. m. y los 2.500/2.800 m s. n. m. se encuentra el piso alpino, donde, si hay formación de suelos, se extienden las praderas de festucas (*Festuca*), cárices (*Carex*) y cervuno (*Nardus*). Por encima del alpino se sitúa el piso subnival, dominado por sustratos rocosos, nevados y glaciares, sin vegetación vascular o cormofítica significativa (Rivas-Martínez, 1987; Carrillo y Ninot, 1992; Gómez-García, 2008; Ninot et al., 2017).

A partir de los estudios de geobotánica y fitosociología se han caracterizado los biomas alpino y subalpino en base a las series catenales de especies vegetales dominantes y codominantes en este tipo de comunidades vegetales (Rivas-Martínez, 1987; Carrillo y Ninot, 1992; Ninot et al., 2007). Estas especies, a su vez, son definitorias de los diferentes paisajes potenciales: bosque montano de caducifolias (*Sorbo-Fagetum* y *Buxo-Quercetum*), bosque de coníferas boreoalpino (*Rhododendro-Pinetum*), bosque subalpino de ribera (*Betula-Pinetum*), brezal de ericáceas (*Rhododendro-Vaccinión*), enebral (*Juniperion nanae*), pradera alpina (*Festucion eskiae*), pastos higrófilos (*Caricion fuscae*)

y pastos nitrófilos (*Nardus strictae*) (Ninot et al., 2017) (figura 2). La caracterización de las especies dominantes define, por tanto, las comunidades vegetales de cada paisaje potencial, de modo que conociendo los tipos y la cantidad de fitolitos producidos por estas especies podremos inferir el tipo de formación vegetal característico de un suelo en el momento de su formación, gracias a que los fitolitos, a diferencia del polen, se depositan normalmente *in situ*, donde la planta habita y muere (Strömberg et al., 2018).

2.2. Fitolitos de plantas alpinas y subalpinas

A partir de los estudios geobotánicos y ecológicos referenciados (Rivas-Martínez, 1987; Carrillo y Ninot, 1992; Ninot et al., 2017) (figura 2), podemos afirmar que los diversos tipos de paisajes descritos en alta montaña se suelen definir por un número relativamente limitado de subfamilias botánicas y que, a su vez, estas, por lo general, son características y comunes en los biomas alpinos y subalpinos en toda Eurasia (Rivas-Martínez et al., 2011).

La concentración de fitolitos en los suelos es un primer indicador del tipo de paisajes potenciales en medios de alta montaña (Carnelli et al., 2004; An et al., 2015). A partir de los estudios realizados en los Alpes suizos, se ha documentado que los brezales de ericáceas (*Rhododendro-Vaccinion*) y los enebrales (*Juniperion nanae*) alpinos son los suelos menos productivos en cuanto a su concentración de fitolitos (0,09 - 0,27 g/m²). Por su parte, los bosques subalpinos de coníferas presentan concentraciones intermedias (0,85 - 1,09 g/m²). Mientras, las praderas alpinas (1,3 g/m²) y, especialmente, los pastos subalpinos nitrófilos

(*Nardus* y *Festuca*) son, con mucha diferencia, los suelos más ricos en fitolitos (2,29 - 2,65 g/m²) (Carnelli et al., 2001; Carnelli, 2002). Por lo tanto, una elevada concentración de fitolitos en un paleosuelo suele ser una primera señal de su uso productivo.

Gracias a las colecciones de referencia de fitolitos de plantas características de ecosistemas de alta montaña europeos publicadas (Carnelli et al., 2001 y 2004; Lisztes-Szabó et al., 2019), podemos asociar las especies de plantas dominantes de las comunidades vegetales de los medios alpinos y subalpinos con los diversos morfotipos de fitolitos que producen (figura 2). De esta manera se puede aproximar qué morfotipos de fitolitos son característicos de cada tipo de comunidad vegetal, a partir del estudio de las especies de plantas dominantes en cada uno de los tipos de paisajes potenciales antes descritos (figura 2). Una segunda aproximación útil a la hora de reconocer los paleopaisajes se basa en la distribución cuantitativa de los diversos morfotipos de fitolitos hallados en cada muestra sedimentaria analizada (Carnelli et al., 2001; Delhon et al., 2003; Rodríguez-Antón, 2020).

A partir del estudio de veinte especies dominantes que caracterizan las comunidades vegetales típicas de los biomas alpino y subalpino europeos se ha inferido qué morfotipos produce cada planta y en qué porcentajes relativos (figura 3).

A partir de los estudios de referencia de producción diferencial de fitolitos en plantas alpinas y subalpinas europeas (Carnelli et al., 2004; Lisztes-Szabó et al., 2019), se documenta que diferentes especies del mismo grupo taxonómico producen los mismos morfotipos diagnósticos. Sin embargo, a nivel cuantitativo, su proporción puede variar significativamente

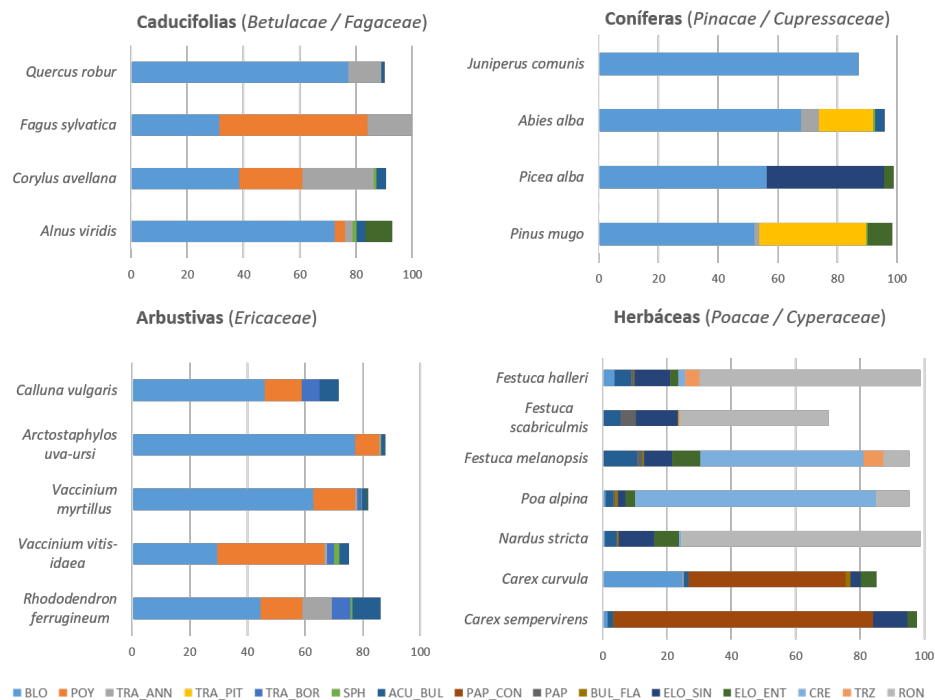


Figura 3. Producción porcentual de fitolitos de las especies más características de los biomas alpinos y subalpinos europeos (Carnelli et al., 2004; Lisztes-Szabó et al., 2019). Los morfotipos de fitolitos cuantificados por especies aparecen representados según su código y su nomenclatura actualizadas según el ICPN 2.0 (Neuman et al., 2019): BLO: BLOCKY; POY: POLYGONATE; TRA_ANN: TRACHEARY ANNULATE; TRA_PIT: TRACHEARY PITTED; TRA_BOR: TRACHEARY BORDERED; SPH: SPHEROID; ACU_BUL: ACUTE BULBOSUS; PAP_CON: PAPILLATE CONICAL; PAP: PAPILLATE; BUL_FLA: BULIFORM FLABELLATE; ELO_SIN: ELONGATE SINUATE; ELO_ENT: ELONGATE ENTIRE; CRE: CRENATE; TRZ: TRAPEZOID; RON: RONDEL.

entre especies de la misma subfamilia (figura 3). Por ejemplo, en las hierbas de la subfamilia C_3 *Pooideae*, entre el 50% y el 75% de los fitolitos que producen son fitolitos de células cortas de gramíneas (GSSCP) de los morfotipos *RONDEL* o *CRENATE* (Neuman et al., 2019). Ambos morfotipos son diagnósticos, por lo tanto, de este grupo taxonómico (C_3 *Pooideae*), de manera que una muestra de sedimento dominada cuantitativamente por estos dos morfotipos de fitolitos en

alta montaña será característica de una pradera alpina o subalpina de *Festuca*, *Nardus* y *Poa* (Gómez-García, 2008). De igual manera, las *PAPILLATE CONICAL* son producidas únicamente por las ciperáceas, plantas herbáceas características de los pastos hidrófilos y húmedales (Stevanato et al., 2019). Entre las plantas leñosas, el morfotipo más común son las *BLOCKY*, que suponen entre el 50% y el 80% de los fitolitos producidos por las especies analizadas. Por su parte, las caduci-

folias (fagáceas, betuláceas y ericáceas) se diferencian por producir porcentajes elevados de *POLYGONATE*. Mientras, las pináceas producen un solo tipo diagnóstico: *TRACHEARY PITTET* (ICPN 2.0; Neuman et al., 2019).

Los fitolitos nos permiten, por tanto, hacer distinciones entre comunidades vegetales, pero no entre especies. De los datos graficados (figura 3) se deduce que podemos distinguir claramente entre los fitolitos característicos de las plantas leñosas respecto a las herbáceas, pues no son recurrentes entre sí. Sin embargo, dentro de las leñosas apenas podemos diferenciar entre coníferas y caducifolias, sin poder distinguir netamente entre subfamilias de caducifolias, ya sean estas de porte arbóreo o arbustivo. Dentro de las herbáceas estudiadas es posible diferenciar ciperáceas de festucáceas, pero no a nivel de especies, ya que presentan una importante variabilidad entre ellas. Estas diferencias cuantitativas y cualitativas (Albert y Weiner, 2001), junto a la concentración de fitolitos en el suelo, permite distinguir, *a priori*, un conjunto de fitolitos característico de un brezal de ericáceas, un bosque de coníferas, una pradera alpina o un pastizal nitrófilo (Carnelli et al., 2001; Delhon et al., 2003; Rodríguez-Antón, 2020). De modo que, mediante el análisis de fitolitos procedentes de un depósito sedimentario, y gracias al análisis cuantitativo de las colecciones de referencia de plantas (figura 3), podemos inferir qué tipos de paisajes se desarrollaron en el pasado (figura 2). Esta conclusión debe ser comparada siempre con el estudio de otros restos vegetales procedentes de los mismos niveles estratigráficos, como el polen y los carbonos sedimentarios, de cara a validar o completar la reconstrucción de los paleopaisajes

(Delhon et al., 2009; Berger et al., 2016; Piquè et al., 2021). Se ha de tener presente que el análisis cuantitativo de fitolitos nos permite formular hipótesis sobre usos de los suelos o tipos de paisajes, pero no es demasiado útil para la determinación taxonómica de las plantas productoras, ya que la mayoría de los morfotipos diagnósticos hallados en un contexto sedimentario solo nos permiten señalar a una familia o subfamilia de plantas dominantes en esa comunidad vegetal a un nivel fitosociológico (figura 3) (Carnelli et al., 2004; Rodríguez-Antón, 2020).

3. Propuesta metodológica para el muestreo de sedimentos

3.1. El programa de muestreo

Nuestro programa de muestreo se enfoca en la incorporación al estudio de los sedimentos de todos los restos biológicos susceptibles de aportar información arqueológica y paleoambiental. Para ello, se recuperan muestras preparadas para el estudio de cada tipo de resto vegetal: fitolitos, polen, materia orgánica, microcarbonos y macrorrestos vegetales carbonizados (figuras 4 y 5). Para realizar los diferentes procesos de extracción de restos vegetales de las muestras de sedimento se aplican diversos métodos fisicoquímicos, en función del tipo de parámetro vegetal a estudiar: polen (Burjachs et al., 2003), fitolitos (Madella et al., 1998; Katz et al., 2010), carbonos (Kabukcu y Chabal, 2021), etc. El análisis de fitolitos y otros microrrestos es solo una parte del estudio microarqueológico o paleoecológico de los sedimentos, que debe incluir una estrategia de muestreo multiparamétrica sistemática y complementaria. Para ello,

en esta propuesta metodológica, el muestreo sedimentario incluye dos tipos de depósitos distintos: 1) áreas de hábitat excavadas con metodología arqueológica y 2) suelos con horizontes pedosedimentarios de formación aluvial, localizados en las posibles zonas de ocupación humana del espacio (figura 3). Ambos tipos de depósitos (arqueológicos y pedológicos) se analizan con la misma metodología arqueobotánica (Buxó y Piqué, 2003) y microarqueológica (Weiner, 2010), lo que permite la comparación cuantitativa de los resultados (Rodríguez-Antón, 2020; Rodríguez-Antón y Gassiot, 2022).

3.2. *Diseño del muestreo*

El diseño del muestreo en arqueología es un tema altamente relevante, puesto que condiciona el alcance de la investigación. Los resultados están potencialmente condicionados a la selección de los sitios estudiados (figura 1) y a la sistemática de recogida de muestras aplicada (figuras 4 y 5) (Buxó y Piqué, 2003). Este tipo de muestreos, dentro y fuera de los sitios, pretende caracterizar y comprender mejor el asentamiento en su espacio histórico. Especialmente, se trata de comprender las actividades productivas realizadas y el impacto que tuvieron para modificar el medio ambiente circundante y generar paisajes culturales. Los lugares de hábitat, como la Cova del Sardo o el Abric de les Obagues de Ratera (figuras 5 y 6), son únicamente sitios donde se realizaban una parte de las actividades sociales, pero no todas. La mayor parte de las actividades productivas (caza, recolección, pesca, producción de alimentos, obtención de materias primas, gestión de rebaños, cultivos, etc.), se realizaban fuera de los abrigos u otros lugares de habitación: al aire

libre (figuras 6 y 7) (Obea et al., 2021). Sin embargo, estas actividades necesariamente impactaban en el entorno de los lugares de hábitat generando paisajes antropizados (Delhon et al., 2009; Piqué et al., 2021). Un medio para evaluar esta hipótesis es la realización de catas o sondeos pedológicos en suelos localizados fuera de los límites de los abrigos, pero relativamente cercanos y que se ubican en los mismos ambientes. La localización de estos sondeos viene determinada también por la geología del terreno, ya que el objetivo principal de esta técnica de muestreo es la búsqueda de paleosuelos fechables mediante técnicas fisicoquímicas, como el Carbono 14, que puedan contener restos biológicos analizables, capaces de aportar información sobre los paleopaisajes o eventos paleoambientales contemporáneos a la ocupación humana de los espacios de hábitat *stricto sensu* (Delhon et al., 2009; Berger et al., 2016; Beverly et al., 2018; Rodríguez-Antón, 2020). En un segundo momento del proceso de investigación se trata de correlacionar, en la medida de lo posible, las ocupaciones de los espacios de hábitat con su impacto en el paisaje del entorno de los asentamientos, mediante el fechado radiocarbónico de estratos coetáneos.

3.3. *El muestreo en la excavación arqueológica*

A nivel metodológico, el muestreo de sedimentos para microarqueología durante la excavación de yacimientos arqueológicos debe seguir siempre una misma lógica y sistemática (Badal et al., 2003). En primer lugar, se toman muestras de control del sedimento procedentes de los diversos estratos geológicos documentados en el sitio (Benito-Calvo et al., 2014). Este pri-

mer muestreo es esencial para conocer la concentración y la morfología de fitolitos, polen y otros microrrestos en los sedimentos geológicos que conforman el contexto del sitio arqueológico, así como su composición detallada (Weiner, 2010). Después, durante el proceso de excavación en extensión del yacimiento, se recogen entre 50 y 20 gramos de sedimento de cada unidad estratigráfica (UE), según el tamaño de estas o la morfología y la composición del sedimento y según su procedencia estratigráfica concreta. La cantidad de muestra necesaria depende del método que vaya a ser empleado posteriormente en el proceso de extracción de los diferentes tipos de microrrestos. En el caso de la extracción de fitolitos, según el método empleado, la muestra necesaria puede variar de 0,05 gramos (Katz et al., 2010) hasta 5 gramos (Madella et al., 1998). En general, 10/20 gramos de muestra son suficientes para realizar diversas analíticas fisicoquímicas, espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (*FTIR*) (Weiner, 2010; Dunseth y Shahack-Gross, 2018) y extracción microscópica de microrrestos: fitolitos (Albert y Portillo, 2014), polen (Burjachs et al., 2003), esferolitos fecales (Canti, 1998) y diatomeas (Pla-Rabés y Catalan, 2018). No obstante, si el estrato o su contenido presentan especial relevancia arqueológica es conveniente aumentar la muestra hasta 40/50 gramos, cantidad más que suficiente para realizar otras analíticas complementarias, así como su fechado radiocarbónico o fisicoquímico. No es conveniente tomar muestras de más de 50 gramos para el análisis microarqueológico, pues aumenta la imprecisión del análisis. Cada muestra recogida es mapeada topográficamente en el yacimiento y se acompaña de información

complementaria (UE, facies, zona, descripción, materiales asociados, etc.).

En principio, deben muestrearse todas las unidades estratigráficas descritas en el proceso de excavación del sitio (Benito-Calvo et al., 2014). No obstante, debe prestarse especial atención a aquellos estratos y estructuras de mayor interés arqueológico, como las estructuras de combustión, las áreas de frecuentación y procesamiento de productos y herramientas o los lugares de almacenamiento de alimentos, de modo que todos los espacios con significación arqueológica del yacimiento y las áreas de actividad queden debidamente representados en el muestreo (Kadowaki et al., 2015). Un estrato muy grande, de varios metros cuadrados de extensión, debe ser muestreado en diversos puntos, a nivel horizontal. Si tiene varias capas o facies, cada una debe ser muestreada. Mientras que una estructura de pequeño tamaño, como un hogar, también debe ser muestreada en diferentes puntos, de cara a poder caracterizar distintos usos a lo largo de su vida útil, si los tuviera (Albert y Weiner, 2001). En los lugares especialmente relevantes para la investigación, como enterramientos, silos o áreas de cocina y procesamiento de productos, también será necesario tomar varias muestras de sedimento en cada UE, de cara a poder reconocer diferentes modos de uso de las estructuras, los espacios de producción y la utilización de herramientas (Kadowaki et al., 2015). No obstante, para el estudio microarqueológico de los útiles deben aplicarse protocolos de extracción de residuos y toma de muestras de control específicos (Cnuts y Rots, 2017). Por último, es conveniente, según el tipo de excavación arqueológica y contexto, tomar muestras de los perfiles. Estas pueden ser recuperadas siguiendo la

misma metodología que se describe para los sondeos pedológicos (figuras 4 y 5).

En síntesis, el objetivo de este trabajo es el estudio independiente con metodología microarqueológica de los sedimentos de cada unidad estratigráfica significativa (Weiner, 2010). El análisis de fitolitos debe ser comparado con otros restos microbotánicos, como el polen o las diatomeas, y macrobotánicos, como los carbones y las semillas carbonizadas (Badal et al., 2003). Siempre deben compararse muestras significativas de las mismas unidades estratigráficas o sedimentarias (Benito-Calvo et al., 2014).

3.4. El muestreo mediante el sondeo pedológico

Para la ejecución de sondeos pedológicos se propone una nueva metodología sistemática que incluye la excavación de una cata de 1 m², hasta alcanzar, si es posible, la roca madre o la base geológica inorgánica sobre la que se ha formado el suelo. En los contextos de alta montaña esta base se suele situar en la roca madre o en un estrato limoso inorgánico, coloquialmente denominado *harina glaciar (glacial till)*, cuya formación se debe a la acumulación periglacial de sedimentos heterogéneos (Brown, 1997; Martínez-Rius et al., 2011; Beverly et al., 2018). Este suelo inorgánico en la mayoría de los sondeos realizados en zonas aluviales de nuestro caso de estudio se localiza entre 80 y 110 centímetros de profundidad (Rodríguez-Antón, 2020), cota similar a otros casos de estudio realizados en alta montaña (Carnelli, 2002; Cunill et al., 2013).

Mientras se realiza la cata, se documenta detalladamente la edafología del suelo, sus horizontes y las características de todas las facies o estratos documenta-

dos (Benito-Calvo et al., 2014; Beverly et al., 2018). Posteriormente, se toman muestras sistemáticas de sedimento de todos los niveles. Se recogen 11 decímetros cúbicos (dm³) de sedimento cada 10 centímetros de profundidad, dentro de cada horizonte estratigráfico, de los que posteriormente se realizará la flotación de 10 dm³ para la extracción y el análisis de carbones sedimentarios y otros macrorestos vegetales (Cunill et al., 2013). Además, se toman muestras de 20 gramos de sedimento del perfil, cada 5 centímetros, para el análisis polínico y otros 20 gramos para fitolitos y otros microrestos. Se recogen también otros 10 gramos para el análisis bioquímico del sedimento, FTIR, materia orgánica y microcarbones. Si las condiciones edáficas del suelo lo permiten, también se obtienen columnas sedimentarias y diversas muestras del perfil en molduras de aluminio para su estudio pedológico y micromorfológico, mediante láminas delgadas (Brown, 1997). Las columnas de los perfiles también pueden ser utilizadas para la extracción, en el laboratorio, de muestras sedimentarias para análisis espectrográfico (FTIR), de microrestos biológicos, materia orgánica y microcarbones, de mayor precisión estratigráfica que en las muestras de 10/20 gramos recogidas en el campo, pudiendo extraerse muestras centimétricas igual que en las columnas lacustres (Catalan et al., 2013) (figuras 4 y 5).

En síntesis, el proceso de excavación de cada sondeo pedológico incluye un protocolo de intervención sistemático. Cada actuación se documenta detalladamente en fichas de campo que incluyen los detalles de la intervención, una síntesis de la estratigrafía del sondeo y la lista de las muestras sedimentarias recogidas, así como las características ambientales y

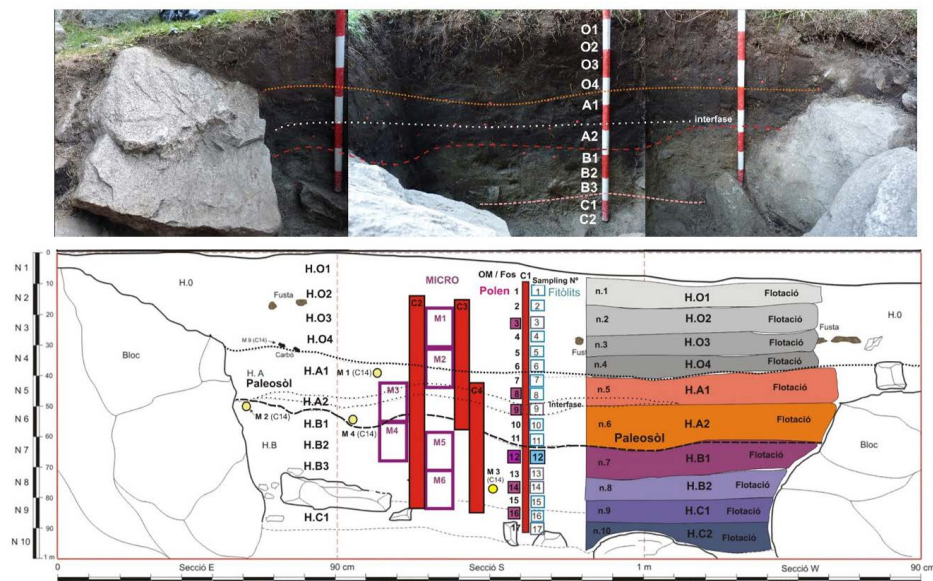


Figura 4. Información gráfica del sondeo AS2 del Forcall de Sant Esperit. En la figura aparece una fotocomposición de los perfiles y un dibujo técnico donde se localizan las diferentes muestras extraídas del perfil: columnas de sedimento y muestras para micromorfología extraídas en molduras de aluminio, muestras de sedimento para su flotación, muestras microsedimentarias, polínicas y de fitolitos, para C14 y otras.

geológicas del entorno de la localización y las coordenadas GPS del sitio donde se ha efectuado la cata. *In situ*, se realiza un dibujo técnico de precisión de todos los perfiles de la cata, donde quedan localizados, de forma gráfica y a escala, la procedencia y el contexto edáfico cada una de las muestras (sedimentos, columnas, muestras para C-14, etc.) (figuras 4 y 5).

4. Caso de estudio

4.1. El estudio de los yacimientos arqueológicos

Teniendo en cuenta los condicionantes biogeográficos de las zonas de alta monta-

ña, a la hora de diseñar el muestreo de fitolitos se han considerado diversas variables. En primer lugar, la distribución de los asentamientos arqueológicos conocidos. Estos tienden a concentrarse en dos espacios: fondo de valle y límite superior del bosque. A tal propósito, han sido seleccionados dos abrigos que presentan una larga secuencia reiterada de frecuencias humanas, que van desde hace unos 10.000 años, en el caso del Abric de les Obages de Ratera (Gassiot et al., 2020b), o desde hace unos 7500, en el caso de la Cova del Sardo (Gassiot et al., 2015); hasta épocas históricas en ambos casos, con una especial intensidad en la alta Edad Media (siglos VI y XI) (García-Casas et al., 2022). Cada uno de estos emplazamien-



Figura 5. Fotografías de diferentes tareas de muestreo realizadas en las catas pedosedimentarias que incluyen: la extracción de columnas polínicas y muestras para estudios de micromorfología de suelos, microarqueología, fitolitos, geoquímica y datación radiocarbónica (A y B), y la recogida sistemática de muestras de sedimento para su flotación y recuperación de carbones y otros macrorrestos vegetales (C y D).

tos se localiza en dos espacios geográficos diferentes, justamente en los límites inferior y superior del bioma subalpino (Ninot et al., 2007) (figuras 1 y 2).

El primero de los yacimientos elegidos para su muestreo ha sido la Cova del Sardo de Boí (figura 6), que se localiza a 1.780 m s. n. m. en las inmediaciones del fondo del valle de Sant Nicolau, entre el

Estany de la Llebreta y el Planell d'Aigüestortes (figura 1).

Se trata de un yacimiento articulado en torno a un abrigo rocoso y una terraza natural, que presenta una reiterada secuencia de frecuentaciones neolíticas que se inician hace unos 7.500 años y finalizan hace 4.500, aproximadamente. Posteriormente, volverá a ocuparse a finales

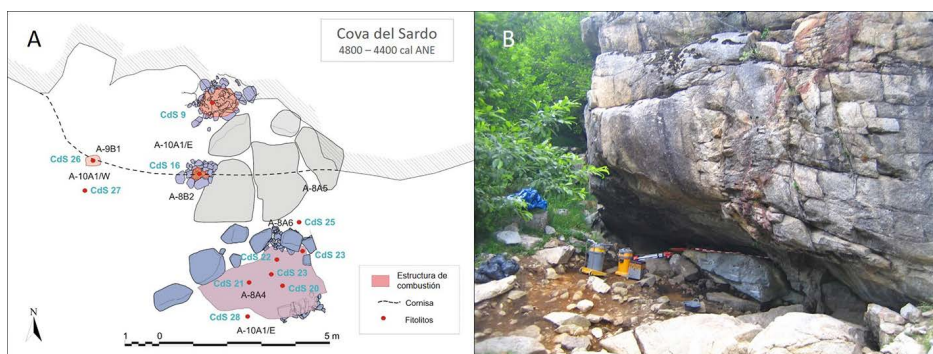


Figura 6. Cova del Sardo de Boí. (A) Planimetría de la fase de ocupación del Neolítico antiguo fechada entre 4800 y 4400 cal ANE. Se señala el muestreo de fitolitos realizado en ese nivel arqueológico. (B) Fotografía realizada durante la excavación y el muestreo de la citada fase, en julio de 2008.

de la Alta Edad Media (siglos IX a XI) (Gassiot et al., 2015). Podría definirse como un emplazamiento característico de las ocupaciones del fondo de los valles subalpinos, que además funciona como lugar de paso logístico natural para el acceso a emplazamientos a mayor altura en distintos valles secundarios (figura 1) (Gassiot et al., 2020a). Siguiendo la metodología descrita, durante la excavación de la Cova del Sardo se recuperaron muestras de sedimento de todas las unidades estratigráficas y fases documentadas. No obstante, en función de los objetivos de la investigación, fueron analizadas 24 muestras procedentes de los diferentes estratos arqueológicos del Holoceno medio. Las muestras de fitolitos incluyen todas las estructuras de combustión fechadas, así como las áreas de actividad de las diferentes fases de ocupación neolítica del sitio, dentro y fuera del abrigo, incluyendo períodos de desocupación. La mitad de las muestras (12) provienen del interior de la cavidad, y el resto (12), de la terraza exterior (figura 6).

El muestreo de fitolitos incluye las tres fases prehistóricas de uso del abrigo: Neolítico antiguo (5500-4400 cal ANE), Neolítico medio (4200-3400 cal ANE) y Neolítico final / Calcolítico (3300-2500 cal ANE) (Gassiot et al., 2015; Rodríguez-Antón, 2020).

El segundo yacimiento arqueológico muestreado en el PNAESM ha sido el Abric de les Obagues de Ratera, que se ubica justamente en el límite superior del bosque actual, a 2.320 m s. n. m., en un lugar de paso que conecta tres cabeceras de valles distintos (Espot, Sant Nicolau y Saboredó/Aran) (figura 1) (Gassiot et al., 2020b). Se trata de un pequeño abrigo bajo un bloque errático localizado en una morrena glaciar (figura 7).

Este yacimiento presenta reiteradas ocupaciones humanas durante todo el Holoceno. Si bien estas frecuentaciones son intermitentes y de limitada entidad temporal, pero nos permiten muestrear actividades humanas en momentos climáticos tan distintos como el Holoceno inicial (c. 8000 cal ANE), el Holoce-

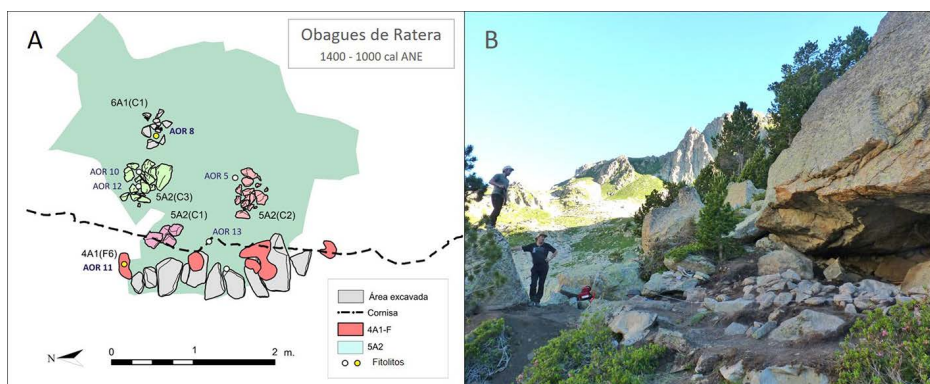


Figura 7. Abric de les Obagues de Ratera. (A) Planimetría de la fase de ocupación del Bronce, fechada entre 1400 y 1000 cal ANE. Se señala el muestreo de fitolitos realizado en ese nivel arqueológico. (B) Fotografía realizada durante la excavación y muestreo de la citada fase en julio de 2016.

no medio (c. 5700, 4000, 3000-2500) o el Holoceno reciente (c. 1700-1000, 800-500 cal DNE). Igual que la Cova del Sardo, también presenta una última reocupación importante durante la Alta Edad Media (siglos VI y VII) (Gassiot et al., 2020b). Siguiendo siempre la misma metodología de muestreo, durante la excavación del sitio fueron recuperadas muestras de sedimento de todas las UE descritas. En función del programa de investigación del sitio, finalmente, han sido seleccionadas para su análisis 22 muestras de fitolitos procedentes de diferentes fases de ocupación que comprenden la práctica totalidad del Holoceno. En este caso, únicamente 6 muestras proceden del exterior del bloque errático, ya que la mayor parte de las ocupaciones se localizaron en el interior del abrigo, de donde han sido analizadas 17 muestras de fitolitos. El muestreo se centra, particularmente, en los niveles arqueológicos de mayor entidad, que han sido fechados en el Mesolítico (10 000 cal ANE), en el Mesolítico final / Neolítico inicial (7700 cal ANE), en el Neolítico medio (4000 cal ANE), en el Neolítico final / Calcolítico (3000-2500 cal ANE) y en el Bronce final (1400-1000 cal ANE). Todas estas ocupaciones se estructuran en torno a diversos hogares situados en el interior del abrigo, asociados a estructuras de cierre que se localizaban bajo la cornisa (figura 7) (Gassiot et al., 2020b). Siguiendo la misma metodología, han sido analizadas las diferentes estructuras de combustión fechadas y áreas de actividad de cada fase, incluyendo algunos momentos de desocupación del abrigo.

Los resultados del análisis de fitolitos de ambos yacimientos están en proceso de publicación y no son objeto de este trabajo metodológico.

4.2. *El estudio de los suelos*

Una vez muestreados los contextos de hábitat, el segundo paso en el programa de investigación implica la detección y la caracterización de las actividades antrópicas en las áreas de frecuentación, dedicadas a la producción y al abastecimiento de los asentamientos humanos en el territorio.

En nuestro caso de estudio, de cara a analizar las áreas de frecuentación en torno a los espacios de hábitat y su impacto en el paisaje, fueron realizados diversos sondeos pedológicos. Sin embargo, la mayoría de los suelos alpinos o subalpinos no suelen preservar eventos paleosedimentarios o paleosuelos fechables, sino que frecuentemente muestran una mezcla de materiales holocénicos (Carnelli 2002; Cunill et al., 2013). Los depósitos susceptibles de conservar paleosuelos son de formación aluvial, próximos a cursos fluviales lentos y horizontales (Brown, 1997; Beverly et al., 2018). Estos ambientes suelen situarse en antiguas cubetas de sobreexcavación glaciaria en el medio alpino (Martínez-Rius et al., 2011). Por lo tanto, la elección del lugar donde realizar estas catas no puede ser en ningún caso aleatoria, sino que es el resultado de un análisis geoarqueológico previo del terreno (Gassiot et al., 2020a) (figura 3).

Aquí se presentan dos de estos sondeos que sirven para ejemplificar la potencialidad de la metodología propuesta. De igual manera que en la selección de los yacimientos antes descritos, han sido seleccionados dos sondeos que delimitan la extensión altitudinal del piso geobotánico subalpino en el caso de estudio. El primero de los sondeos (AS1) se localiza a 2.255 m s. n. m. en la Pleta d'Erdo, en una cubeta de sobreexcavación glaciaria colmatada, en torno al límite superior del

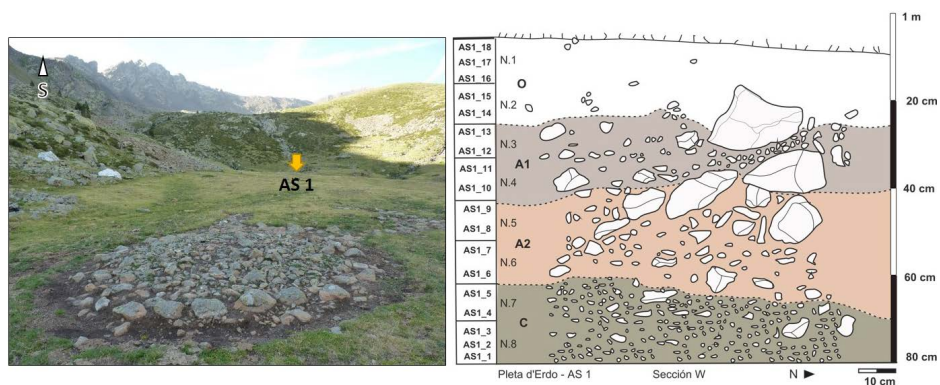


Figura 8. Fotografía del emplazamiento de la cata AS1, situada en la Pleta d’Erdo, a 2.255 m s. n. m. y localizada 41 metros al sur de una estructura tumular de la prehistoria reciente. Dibujo a escala del perfil del sondeo con los 4 horizontes estratigráficos descritos.

bosque actual (figura 8). En esta misma zona de Vall de Llacs, en el entorno de la Pleta d’Erdo, se localizan diversos hallazgos arqueológicos del Holoceno reciente (c. 1300-1100 cal ANE, 540-1150 cal DNE) (Gassiot, 2016). A nivel ecológico este sondeo se localiza en el límite superior del bioma subalpino, en un medio ambiente equivalente al del Abric de les Obagues de Ratera (2.320 m s. n. m.) (figuras 1 y 2).

Del estudio del sondeo pedosedimentario de la Pleta d’Erdo (AS1) podemos inferir varias cuestiones a nivel edáfico. El suelo se compone de 4 horizontes sedimentarios: uno orgánico (O) superficial, de formación aluvial; dos eventos coluviales (A1 y A2), y un horizonte inorgánico de gravas y limos periglaciares (C) (figura 8).

La primera problemática de este tipo de suelos alpinos y subalpinos superiores radica en que no suelen contener macrorestos vegetales, por lo que su fechado radiométrico sobre carbón vegetal (C-14) en este caso ha resultado inviable. Este problema es frecuente en sondeos pedo-

lógicos en contextos orográficos a esta altitud (Cunill et al., 2013). La segunda problemática que presentan es la propia dinámica sedimentaria formativa de estos tipos de suelos, donde se alternan episodios de coluvio muy activos y otros aluviales de menor energía (Martínez-Rius et al., 2011). Se trata, por tanto, de suelos muy dinámicos y expuestos a la erosión, a lo largo del Holoceno, que no suelen preservar paleosuelos (Carnelli, 2002). El tercer problema añadido a este tipo de suelos es consecuencia de su propia dinámica formativa. No suelen preservar restos vegetales, ni macroscópicos, ni microscópicos, en cantidades suficientes para un buen análisis paleoambiental. En el caso aquí ejemplificado (AS1) (figura 8), únicamente 4 de 18 muestras estudiadas tenía fitolitos suficientes para un conteo estadísticamente significativo. Los horizontes de tipo coluvial (A) son totalmente estériles. Mientras, el horizonte superficial (O) presenta dos niveles, que señalan algunas variaciones en la dinámica forestal del Holoceno más reciente. El nivel basal (C) es coherente con fases ini-

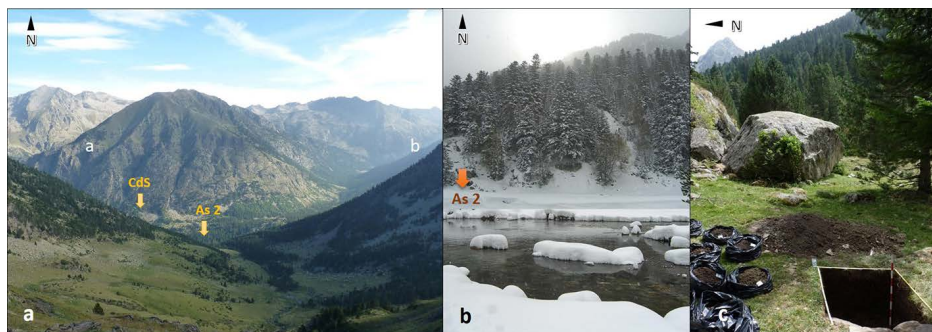


Figura 9. *a)* Localización de la cata del Forcall de Sant Esperit (AS2) y de la Cova del Sardo (CdS), ubicada a 563 m al oeste. *b)* Localización de la cata AS2 en una terraza fluvial holocénica del valle de Sant Nicolau. *c)* Fotografía de la realización de la cata AS2 en agosto de 2012.

ciales de relleno de la cubeta de sobreexcavación glaciaria, que nos remiten a un paisaje periglacial frío y árido (Rodríguez-Antón, 2020).

En síntesis, a nivel metodológico, el muestreo de suelos en contextos por encima de los 2.200 m s. n. m. es altamente ineficiente para los objetivos de la investigación, ya que no suelen preservar ni paleosuelos, ni horizontes fechables, ni microrrestos vegetales suficientes para su estudio paleoambiental. Idéntica problemática ha sido descrita en otros casos de estudio en contextos ecológicos y altitudinales similares (Carnelli, 2002; Cunill et al., 2013; An et al., 2015).

El segundo de los sondeos que ejemplifica la metodología empleada (AS2), se localiza a 1.771 m s. n. m., en una terraza fluvial del Forcall de Sant Esperit, a 563 m lineales de la Cova del Sardo (1.780 m s. n. m.), en un bioma subalpino inferior de fondo de valle (figuras 1, 2 y 9). A diferencia del caso anterior (AS1), el segundo sondeo ejemplificado (AS2) presenta una dinámica pedosedimentaria aluvial con una excelente preservación de la materia orgánica y dos paleosuelos con-

servados (A1 y A2) (figura 4). En este caso, la dinámica sedimentaria formativa de la terraza fluvial ha permitido una buena preservación de los horizontes aluviales, que han podido ser fechados a partir de cuatro carbones de *Abies*, *Pinus* y *Betula* (Rodríguez-Antón, 2020). El perfil edáfico preserva cuatro horizontes estratificados: el actual, orgánico (O), dos paleosuelos orgánicos (A1 y A2), un horizonte aluvial (B) y un horizonte coluvial inorgánico (C) (figura 4). Los cuatro horizontes estratigráficos se muestran ordenados cronológicamente, por lo que son representativos de diferentes eventos sedimentarios holocénicos. El estudio microbotánico y macrobotánico de diferentes restos vegetales confirma esta hipótesis (Rodríguez-Antón, 2020; Piqué et al., 2021; Rodríguez-Antón y Gassiot, 2022).

El horizonte orgánico superior (O) refleja la vegetación actual y de los últimos siglos, definida por un bosque mixto de abetos y caducifolias con apertura de claros que se emplean como zonas de pasto estival. El paleosuelo superior (A1) ha sido fechado en torno a los siglos IX y X, y refleja un fuerte impacto antrópico en el

paisaje, con un bosque algo más abierto que el anterior. Podemos relacionarlo con la fase de uso altomedieval, de similar cronología, de la Cova del Sardo. Por debajo de A1, aparece un evento erosivo y luego se desarrolla un segundo paleosuelo (A2) (figura 4). Este paleosuelo más antiguo ha sido fechado entre 5293 y 4932 cal ANE, mediante dos dataciones radiocarbónicas realizadas por el método C-14 AMS sobre carbones de pino (*Pinus*) y abedul (*Betula*), de modo que representa un suelo sedimentado que se formó hace unos 7.200-6.900 años. Este segundo paleosuelo presenta una excelente preservación de la materia orgánica, altos niveles de fósforo y concentraciones excepcionales de fitolitos, carbones sedimentarios y polen. Los diferentes parámetros estudiados apuntan a un paleopaisaje antropizado por actividades agroganaderas, con presencia de pastos nitrófilos (Piqué et al., 2021; Rodríguez-Antón y Gassiot, 2022).

Por último, el nivel inorgánico (C) de limos y gravas periglaciales, situado a la base del sondeo, ha sido fechado mediante un carbón de *Pinus* entre 6606 y 6443 cal ANE, lo que lo sitúa dos o tres siglos antes del evento climático frío 8.2 ka cal BP (Walker et al., 2019). Los escasos restos microbotánicos y macrobotánicos documentados en este horizonte apuntan a un paisaje más abierto y frío que el actual (Rodríguez-Antón, 2020).

En definitiva, a partir de los dos sondeos ejemplificados en este caso de estudio, vemos que el medio biogeográfico determina la potencialidad del método de muestreo empleado. Mientras, en zonas aluviales del fondo del valle es posible la detección y el estudio de paleosuelos en terrazas fluviales (Delhon et al., 2009; Berger et al., 2016; Rodríguez-Antón,

2020; Piqué et al., 2021; Rodríguez-Antón y Gassiot, 2022); en contextos a mayor altitud el método presenta claras limitaciones (Carnelli, 2002; Cunill et al., 2013; An et al., 2015).

5. Conclusiones

El diseño de la investigación, basado en el estudio de los sedimentos, aplica una metodología que permite recuperar toda la información paleoambiental contenida en cada estrato arqueológico u horizonte sedimentario muestreado (figura 4). El análisis multiparamétrico de diferentes restos vegetales, presentes en cada estrato, busca complementar la información que puedan aportar cada uno por separado, de cara a su lectura e interpretación conjunta (Buxó y Piqué, 2003). Para ello, nuestro programa de investigación arqueobotánico integra en el análisis sedimentario los siguientes parámetros: (1) fitolitos, (2) macrocarbones sedimentarios (>250 μm), (3) microcarbones, (4) macrorestos vegetales, (5) polen, (6) palinomorfos no polínicos (NPP), (7) materia orgánica, (8) análisis de componentes del suelo por espectrometría infrarroja (FTIR) y (9) análisis bioquímica y (10) de otros microrestos biológicos que pudieran conservarse en los sedimentos (almidones, esferulitos fecales, diatomeas y crisofíceas, etc.).

Como ya ha sido ejemplificado en el caso de estudio, raramente se conservan paleosuelos en zonas de alta montaña, y en el caso de conservarse y localizarse, no siempre se conservan todos los tipos de microrestos enunciados. Algunos, como los esferulitos fecales o los almidones, raramente se encuentran en suelos fuera de las zonas de hábitat. Mientras, la conser-

vación de diatomeas y crisofícias está condicionada a la presencia de agua en el momento de formación del estrato. Paradójicamente, este hecho puede poner en valor la potencialidad del análisis de fitolitos, ya que estas células de sílice son, generalmente, los microrrestos vegetales más resistentes a la disolución, dado que pueden soportar procesos geoquímicos que suelen disolver o descomponer la mayoría de los biorrestos inicialmente presentes en los suelos (Cabanes y Shahack-Gross, 2015). Los fitolitos, por su parte, resisten bien una climatología extrema, condiciones de elevada acidez y otros agentes geológicos, tratándose de un biorresto altamente resiliente en los suelos. Además, a diferencia de otros microrrestos también resilientes, como los carbones o el polen, que pueden recorrer largas distancias antes de depositarse, los fitolitos, normalmente, se sedimentan *in situ* (Strömberg et al., 2018). Por lo tanto, los análisis de fitolitos aportan una información paleoambiental a escala local, a diferencia del polen y los microcarbones, que son señales de diferente alcance geográfico.

En definitiva, la integración de todos los estudios paramétricos de restos vegetales sedimentarios debe fomentar el análisis comparado de todos ellos, de cara a caracterizar los paisajes culturales y su evolución a lo largo del tiempo. Por ello, la incorporación del análisis de fitolitos a zonas de alta montaña, dentro y fuera de los espacios de hábitat, como parte de una metodología multidisciplinaria integrada, resulta una herramienta potencialmente útil a la hora de detectar y caracterizar los asentamientos a nivel espacial y los diversos usos del suelo en el

pasado. La metodología propuesta parte de un trabajo de investigación arqueológico previo, que implica tanto la excavación en extensión de yacimientos en el área de estudio como la prospección sistemática intensiva del territorio y su muestreo mediante catas sedimentarias. La elección de lugares susceptibles de preservar información paleopedológica implica una buena comprensión de las dinámicas sedimentarias y de la paleogeografía del área de estudio. De los ejemplos descritos, podemos inferir que las áreas óptimas para la localización de paleosuelos son las planicies aluviales en fondos de valle, mientras que las zonas de ladera presentan, en general, escaso potencial para su muestreo arqueobotánico.

Para concluir esta propuesta metodológica, podemos afirmar que el programa de investigación desarrollado en zonas de alta montaña del PNAESM está aportando potencialidad y resultados que facilitan la integración de los estudios sedimentarios lacustres con los arqueológicos (Catalan et al., 2013). Esto es así gracias a un nuevo enfoque de alcance medio en la reconstrucción de los paleopaisajes, basado en los estudios pedosedimentarios. La metodología descrita pone el foco en el área circundante al asentamiento, posibilitando la caracterización de las prácticas productivas y de gestión forestal allí desarrolladas, además de los paisajes culturales generados y su resiliencia a lo largo del tiempo. Esta aproximación metodológica permite una reconstrucción del impacto humano en el paisaje a una escala local, a diferencia de los estudios de depósitos lacustres, cuya escala es el área de captación freática de lagos y turberas.

Referencias bibliográficas

- ALBERT, R. M. (2015). «Anthropocene and early human behavior». *The Holocene*, 25 (10), 1542-1552.
- ALBERT, R. M.; BAMFORD, M. K.; STANISTREET, I. G.; STOLLHOFEN, H.; RIVERA-RONDÓN, C. A.; NJAU, J. K.; BLUMENSCHINE, R. J. (2018). «River-fed wetland palaeovegetation and palaeoecology at the HWK W site, Bed I, Olduvai Gorge». *Review of Palaeobotany and Palynology*, 259, 223-241.
- ALBERT, R. M.; PORTILLO, M. (2014). «Aportaciones de los estudios de fitolitos en la prehistoria: Formación, metodología y casos de estudio». *Treballs d'Arqueologia*, 20, 79-93. <<https://doi.org/10.5565/rev/tda.48>>
- ALBERT, R. M.; WEINER, S. (2001). «Study of Phytoliths in Prehistoric Ash Layers from Kebara and Tabun Caves Using a Quantitative Approach. En: MEUNIER J. D.; COLINE, F. (Eds.). *Phytoliths, Applications in Earth Sciences and Human History*, I, 251-266.
- ALONSO-EGUÍLUZ, M.; FÉRNANDEZ ERASO, J.; ALBERT, R. M. (2017). «The first herders in the upper Ebro basin at Los Husos II (Álava, Spain): Microarchaeology applied to fumier deposits». *Veget. Hist. Archaeobot.*, 26, 143-157.
- AN, X.; LU, H.; CHU, G. (2015). «Surface soil phytoliths as vegetation and altitude indicators: A study from the southern Himalaya». *Nature Scientific Reports*, 5, 15523.
- BADAL, E.; CARRIÓN, Y.; RIVERA, D.; UZQUIANO, P. P. (2003). «La arqueobotánica en cuevas y abrigos: Objetivos y métodos de muestreo». En: BUXÓ, R.; PIQUÉ, R. (Eds.). *La recogida de muestras en arqueobotánica, objetivos y propuestas metodológicas: La gestión de los recursos vegetales y la transformación del paleopaisaje en el Mediterráneo occidental*. Barcelona: Museu d'Arqueologia de Catalunya, 19-29.
- BAL, M. C.; RENDU, C.; RUAS, M. P.; CAMPMAJO, P. (2010). «Paleosol charcoal, reconstructing vegetation history in relation to agropastoral activities since the Neolithic: A case of study in the Eastern French». *Journal of Archeological Science*, 37, 1785-1797.
- BENITO-CALVO, A.; CAMPAÑA LOZANO, I.; KARAMPAGLIDIS, T. (2014). «Conceptos básicos y métodos en geoarqueología: Geomorfología, estratigrafía y sedimentología». *Treballs d'Arqueologia*, 20, 41-54. <<https://doi.org/10.5565/rev/tda.45>>
- BERGER, J. F.; DELHON, C.; MAGNIN, F.; BONTÉ S.; PERYC, D.; THIÉBAULT, S.; GUILBERT, R.; BEECHING, A. (2016). «A fluvial record of the mid Holocene rapid climatic changes in the middle Rhone valley (Espeluche-Lalo, France) and of their impact on Late Mesolithic and Early Neolithic societies». *Quaternary Science Reviews*, 136, 66-84.
- BEVERLY, E. L.; LUKENS, W. E.; STINCHCOMB, G. E. (2018). «Paleopedology as a Tool for Reconstructing Paleoenvironments and Paleoecology». En: CROFF, D. A.; SÜ, D. F.; SIMPSON, S. W. (Eds.) (2018). *Methods in Paleoecology: Reconstructing Cenozoic Terrestrial Environments and Ecological Communities*. Nueva York: Springer, 151-183.
- BROWN, A. C. (1997). *Alluvial Geoarchaeology: Floodplain Archaeology and Environmental Change*. Cambridge: Cambridge University Pres.
- BURJACHS, F.; LÓPEZ-SÁEZ, J. A.; IRIARTE, M. J. (2003). «Metodología arqueopalinológica». En: BUXÓ, R.; PIQUÉ, R. (Eds.). *La recogida de muestras en arqueobotánica, objetivos y propuestas metodológicas*. Barcelona: Museu d'Arqueologia de Catalunya, 11-18.
- BUXÓ, R.; PIQUÉ, R. (Eds.) (2003). *La recogida de muestras en arqueobotánica, objetivos y propuestas metodológicas*. Barcelona: Museu d'Arqueologia de Catalunya.
- CABANES, D.; SHAHACK-GROSS, R. (2015). «Understanding Fossil Phytolith Preservation: The Role of Partial Dissolution in Paleoecology and Archaeology». *PLOS ONE*, 10 (5), e0125532.
- CANTI, M. G. (1998). «The Micromorphological Identification of Faecal Spherulites from Archaeological and Modern Materials». *Journal of Archaeological Science*, 25, 435-444.

- CARNELLI, A. L. (2002). *Long Term dynamics of the vegetation at the subalpine-alpine ecocline during the Holocene, comparative study in the Aletsch region, Val d'Arpette, and Furka Pass (Valais, Switzerland)* [Tesis doctoral]. Université de Genève. Section des Sciences de la Terre, 349 p. <<https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:212>>
- CARNELLI, A. L.; MADELLA, M.; THEURILLAT, J. P. (2001). «Biogenic Silica Production in Selected Alpine Plants Species and Plant Communities». *Annals of Botany*, 87, 425-434.
- CARNELLI, A. L.; THEURILLAT, J. P.; MADELLA, M. (2004). «Phytolith types and type frequencies in subalpine-alpine plant species of the European Alps». *Review of Paleobotany and Palynology*, 129, 39-65.
- CARRILLO, E.; NINOT, J. M. (1992). *Flora i vegetació de les valls d'Espòt i Boí*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans. Arxius Secció Ciències, vol. I-II.
- CATALAN, J.; BATALA, M.; BONET, M.; VALERO, D. et al. (2019). «Análisis ecológico de la culturización del paisaje de alta montaña desde el neolítico: Los parques nacionales de montaña como modelo». En: AMENGUAL, P. (Ed.). *Proyectos de investigación en Parques Nacionales, 2013-2017: Naturaleza y Parques Nacionales*. Madrid: Organismo Autónomo de Parques Nacionales, 281-298.
- CATALAN, J.; NINOT, J. M.; ANIZ, M. M. (Eds.) (2017). «The High Mountain Conservation in a Changing World». En: *High Mountain Conservation in a Changing World: Advances in Global Change Research*. Springer: Cham, 3-36.
- CATALAN, J.; PÈLACHS, A.; GASSIOT, E.; SORIANO, J. M. et al. (2013). «Interacción entre clima y ocupación humana en la configuración del paisaje vegetal del Parque Nacional de Aigüestortes i Estany de Sant Maurici a lo largo de los últimos 15.000 años». En: RAMÍREZ, L.; ASENSIO, B. (Eds.) (2013). *Proyectos de investigación en Parques Nacionales, 2009-2012: Naturaleza y Parques Nacionales*. Madrid: Organismo Autónomo de Parques Nacionales, 71-92.
- CNUTS, D.; ROTS, V. (2017). «Extracting residues from stone tools for optical analysis: Towards an experiment-based protocol». *Archaeol Anthropol Sci*, 10, 1717-1736. <<https://doi.org/10.1007/s12520-017-0484-7>>
- COIA, V.; CIPOLLINI, G.; ANAGNOSTOU, P. et al. (2016). «Whole mitochondrial DNA sequencing in Alpine populations and the genetic history of the Neolithic Tyrolean Iceman». *Sci Rep*, 6, 18932. <<https://doi.org/10.1038/srep18932>>
- CROFT, D. A.; SU, D. F.; SIMPSON, S. W. (Eds.) (2018). *Methods in Paleocology: Reconstructing Cenozoic Terrestrial Environments and Ecological Communities*. Nueva York: Springer.
- CUNILL, R.; SORIANO, J. M.; BAL, M. C.; PÈLACHS, A.; PÉREZ-OBIO, R. (2013). «Holocene high-altitude vegetation dynamics in the Pyrenees: A pedoanthracology contribution to an interdisciplinary approach». *Quaternary International*, 289, 60-70.
- DEARING, J. A.; ACMA, B.; ZHANG, K. et al. (2015). «Socialecological systems in the Anthropocene: The need for integrating social and biophysical records at regional scales». *The Anthropocene Review*, 2 (3), 220-246.
- DELHON, C.; ALEXANDRE, A.; BERGER, J. F.; THIÈBAULT, S.; BROCHIER, J. L.; MEUNIER, J. D. (2003). «Phytolith assemblages as a promising tool for reconstructing Mediterranean Holocene vegetation». *Quaternary Research*, 59, 48-60.
- DELHON, C.; THIÈBAULT, S.; BERGER, J. F. (2009). «Environment and landscape management during the Middle Neolithic in Southern France: Evidence for agrosylvopastoral systems in the Middle Rhone Valley». *Quaternary International*, 200, 50-65.
- DUNSETH, Z. C.; SHAHACK-GROSS, R. (2018). «Calcitic dung spherulites and the potential for rapid identification of degraded animal dung at archaeological sites using FTIR spectroscopy». *Journal of Archaeological Science*, 97, 118-124.
- FOLKE, C. (2006). «Resilience: The emergence of a perspective for socialecological systems analyses». *Global Environmental Change*, 16, 253-267.

- GARCIA-CASAS, D.; RODRÍGUEZ-ANTÓN, D.; COSTA-BADIA, X.; GASSIOT, E. (2022). «Arqueología del paisaje en la alta montaña: Una primera aproximación al estudio de las ocupaciones ganaderas de época medieval en el Parque Nacional de Aigüestortes i Estany de Sant Maurici (Pirineo Occidental de Cataluña)». *CAUN*, 30 (2), 211-238.
<<https://doi.org/10.15581/012.30.2.010>>
- GASSIOT, E. (Ed.) (2016). *Montañas humanizadas: Arqueología del pastoralismo en el Parque Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici*. Naturaleza y Parques Nacionales.
- GASSIOT, E.; GARCIA, D.; NUNES, J.; SALVADOR, G. (2020a). «Modelización de territorios ganaderos en la alta montaña al final del Neolítico: Una integración de análisis espacial e información etnográfica». *Trabajos de Prehistoria*, 77 (1) (enero-junio), 48-66.
<<https://doi.org/10.3989/tp.2020.12246>>
- GASSIOT, E.; CLEMENTE, I.; DÍAZ BONILLA, S.; MAZZUCCO, N.; OBEA, L.; RODRÍGUEZ-ANTÓN, D.; SALVADOR, G. (2020b). «Des de la prehistòria fins a l'actualitat: Les ocupacions de l'Abric de les Obagues de Ratera, al Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici (Espot)». En: MONJO, M. et al. (Coords.). *Segones Jornades d'Arqueologia i Paleontologia del Pirineu i Aran*. Diputació de Lleida, 95-101.
- GASSIOT, E.; MAZZUCCO, N.; OBEA, L.; TARIFA, N.; ANTOLÍN, F.; CLOP, X.; NAVARRETE, V.; SAÑA, M. (2015). «La Cova del Sardo de Boí i l'explotació de l'alta muntanya als Pirineus occidentals en època neolítica». *Tribuna d'Arqueologia 2013-2014*, 199-218.
- GASSIOT, E.; RODRÍGUEZ-ANTÓN, D.; PÈLACHS, A.; PÉREZ OBIOL, R.; JULIÀ, R.; BAL, M. C.; MAZZUCCO, N. (2014). «La alta montaña durante la Prehistoria: 10 años de investigación en el Pirineo catalán occidental». *Trabajos de Prehistoria*, 71 (2) (julio-diciembre), 262-282.
<<https://doi.org/10.3989/tp.2014.12134>>
- GAVRILOV, D. A.; LOIKO, S. V.; KLIMOVA, N. V. (2018). «Holocene Soil Evolution in South Siberia Based on Phytolith Records and Genetic Soil Analysis (Russia)». *Geosciences*, 8, 402.
- GÓMEZ-GARCÍA, D. (2008). «Pastos del Pirineo: Breve descripción ecológica y florística». En: FILLAT, F.; GARCÍA GONZÁLEZ, R.; GÓMEZ-GARCÍA, D.; REINÉ, R. (2008). *Pastos del Pirineo*. CSIC/Diputación de Huesca, 111-140.
- GONZÁLEZ-SAMPÉREZ, P. P.; ARANBARRI, J.; PÉREZ SANZ, A.; GIL ROMERA, G.; MORENO, A.; LEUNDA, M.; SEVILLA CALLEJO, M.; CORELLA, J. P.; MORELLÓN, M.; OLIVA, B.; VALERO-GARCÉS, B. (2017). «Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records». *Catena*, 149, 668-688.
- KABUKCU, C.; CHABAL, L. (2021). «Sampling and quantitative analysis methods in anthracology from archaeological contexts: Achievements and prospects». *Quaternary International*, 593-594, 6-18.
<<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.11.004>>
- KADOWAKI, S.; MAHER, L.; PORTILLO, M.; ALBERT, R. M.; AKASHI, Ch.; GULIYEV, F.; NISHIAKI, Y. (2015). «Geoarchaeological and palaeobotanical evidence for prehistoric cereal storage in the southern Caucasus: The Neolithic settlement of Göytepe (mid 8th millennium BP)». *Journal of Archaeological Science*, 53, 408-425.
- KATZ, O.; CABANES, D.; WEINER, S.; MAEIR, A. M.; BOARETTO, E.; SHAHACK-GROSS, R. (2010). «Rapid phytolith extraction for analysis of phytolith concentrations and assemblages during an excavation, an application at Tell esSafi/Gath, Israel». *Journal of Archaeological Science*, 37, 1557-1563.
<<https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.016>>
- LISZTES-SZABÓ, Z.; BRAUN, M.; CSIK, A.; PETO, A. (2019). «Phytoliths of six woody species important in the Carpathians: Characteristic phytoliths in Norway spruce needles». *Vegetation History and Archaeobotany*, 28, 649-662.
- LOZNY, L. R. (Ed.) (2013). *Continuity and Change in Cultural Adaptation to Mountain Environments: From Prehistory to Contemporary Threats*. Nueva York: Springer, 420.

- MADELLA, M.; POWERS-JONES, A. H.; JONES, M. K. (1998). «A Simple Method of Extraction of Opal Phytoliths from Sediments Using a Non Toxic Heavy Liquid». *Journal of Archaeological Science*, 25, 801-803.
- MANDER, L.; PUNYASENA, S. W. (2018). «Fossil Pollen and Spores in Paleoecology». En: CROFF, D. A.; SU, D. F.; SIMPSON, S. W. (Eds.). *Methods in Paleoecology: Reconstructing Cenozoic Terrestrial Environments and Ecological Communities*. Nueva York: Springer, 215-234.
- MANN, D. G. (1989). «The species concept in diatoms: Evidence for morphologically distinct, sympatric gamodemes in four epipelagic species». *Plant Systematics Evolution*, 164, 215-237.
- MARTÍNEZ-RIUS, A.; COMAS, J.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, L. R. (2011). *Parque Nacional de Aigüestortes i Estany de Sant Maurici. Guía geológica. Guías geológicas de parques nacionales*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Organismo Autónomo de Parques Nacionales.
- NEUMAN, K.; STRÖMBERG, C.; BALL, T.; ALBERT, R. M.; VRYDAGHS, L.; CUMMINGS, S.; INTERNATIONAL COMMITTEE FOR PHYTOLITH TAXONOMY (ICPT) (2019). «International Code for Phytolith Nomenclature (ICPN) 2.0». *Annals of Botany*, 124, 189-199.
- NINOT, J. M.; CARRILLO, E.; FERRÉ, A. (2017). «The Pyrenees». En: LOIDI, J. (Ed.). *The Vegetation of the Iberian Peninsula*. Springer: Cham. Plant and Vegetation, 12, 323-366.
- NINOT, J. M.; CARRILLO, E.; FONT, X.; CARRERAS, J.; FERRE, A.; MASALLES, R. M.; SORIANO, I.; VIGO, J. (2007). «Altitude zonation in the Pyrenees: A geobotanic interpretation». *Phytocoenologia*, 37 (34), 371-398.
- OBEA, L.; CELMA-MARTINEZ, M.; PIQUÉ-HUERTA, R.; GASSIOT-BALLBÈ, E.; MARTIN-SEIJO, M.; SALVADOR BAIGES, G.; RODRÍGUEZ-ANTÓN, D.; QUESADA CARRASCO, M.; MAZZUCCO, N.; GARCIA CASAS, D.; DÍAZ BONILLA, S.; CLEMENTE CONTE, I. (2021). «Firewood-gathering strategies in high mountain areas of the Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici (Central Pyrenees) during prehistory». *Quaternary International*, 593-594, 129-143. <<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.11.044>>
- PAULI, H.; GOTTFRIED, M.; GRABHERR, G. et al. (2012). «Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits». *Science*, 336 (6079), 353-355.
- PIPERNO, D. R. (2006). *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists*. Oxford: AltaMira Press.
- PIQUÉ, R.; ALCOLEA, M.; ANTOLÍN, F.; BERIHUETE AZORÍN, M.; BERROCAL, A.; RODRÍGUEZ ANTON, D.; HERRERO OTAL, M.; LÓPEZ BULTÓ, O.; OBEA, L.; REVELLES, J. (2021). «Mid-Holocene palaeoenvironment, plant resources and human interaction in northeast Iberia: An archaeobotanical approach». *Appl. Sci.*, 11 (11), 5056. <<https://doi.org/10.3390/app11115056>>
- PLA-RABÉS S.; CATALAN, J. (2018). «Diatom species variation between lake habitats: Implications for interpretation of paleolimnological records». *Journal of Paleolimnology*, 60, 169-187.
- RAPP, G., JR.; MULHOLLAND, S. E. (Eds.) (1992). *Phytolith Systematics: Emerging issues. Advances in Archaeological and Museum Science*, vol. 1. Nueva York: Springer.
- RASHID, I.; MIR, S. H.; ZURRO, D.; DAR, R. A.; RESHI, Z. A. (2019). «Phytoliths as proxies of the past». *Earth Science Reviews*, 194, 234-250.
- REMOLINS, G.; GIBAJA, J. F. (Eds.) (2018). *Les Valls d'Andorra durant el Neolític: Un encreuament de camins al centre dels Pirineus*. Museu d'Arqueologia de Catalunya. Monografies del MAC, 2.
- RENDU, CH.; CALASTRENC, C.; LE COUEDIC, M.; BERDOY, A. (Coords.) (2016). *Estives d'Ossau: 7000 ans de pastoralisme dans les Pyrénées*. Aulus-les Bains: Le Pas d'Oiseau.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S. (1987). *Memoria del mapa de series de vegetación de España*. ICONA.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S.; RIVAS-SÁENZ, S.; PENAS, A. (2011). «Worldwide Bioclimatic Classification System». *Global Geobotany*, 1, 1-634.

- RODRÍGUEZ-ANTÓN, D. (2020). *Ocupación e impacto humano en la alta montaña durante la prehistoria: Un estudio arqueoambiental de Aigüestortes (8 – 4 ka cal BP) mediante el análisis de fitolitos*. Cerdanyola del Vallès: Universitat Autònoma de Barcelona.
<<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10239.15528/1>>
- RODRÍGUEZ-ANTÓN, D.; GASSIOT BALLBÈ, E. (2022). «L'impacte humà a l'alta muntanya durant l'Holocè mitjà: L'anàlisi de fitòlits aplicat a l'estudi arqueoambiental d'Aigüestortes». En: *La investigació al Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici. XII Jornades sobre Recerca*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural, 245-252.
- RULL, V.; CAÑELLES-BOLTÀ, N.; VEGAS-VILLARÚBIA, T. (2021). «Late-Holocene forest resilience in the central Pyrenean highlands as deduced from pollen analysis of Lake Sant Maurici sediments». *The Holocene* (julio).
<<https://doi.org/10.1177/09596836211033207>>
- STEVANNATO, M.; RASBOLD, G. G.; PAROLIN, M.; DOMINGOS LUZ, L.; LO, E.; WEBER, Ph.; TREVISAN, R.; GALEAZZI-CAXAMBU, M. (2019). «New characteristics of the papillae phytolith morphotype recovered from eleven genera of cyperaceae». *Flora*, 253, 49-55.
- STRÖMBERG, C. A. E.; DUNN, R. E.; CRIFÓ, C.; HARRIS, E. B. (2018). «Phytoliths in Paleoecology: Analytical Considerations, Current Use, and Future Directions». En: CROFT, D. A.; SU, D. F.; SIMPSON, S. W. (Eds.). *Methods in Paleoecology: Reconstructing Cenozoic Terrestrial Environments and Ecological Communities*. Nueva York: Springer, 235-287.
- TZOERTZIS, S.; DELESTRE, X.; GRECK, J. (Dir.) (2010). *Archéologie de la Montagne Européenne: Actes de la table ronde internationale de Gap (29 septembre 1er octobre 2008)*. París: Bibliothèque d'Archéologie de la Méditerranéenne et Africaine.
- WALKER, M.; GIBBARD, P.; HEAD, M. J. et al. (2019). «Formal Subdivision of the Holocene Series/Epoch: A Summary». *Journal of the Geological Society of India*, 93, 135-141.
<<https://doi.org/10.1007/s12594-019-1141-9>>
- WALKER, B.; SALT, D.; REID, W. (2006). *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*. Washington, DC: Island Press.
- WEINER, S. (2010). *Microarchaeology: Beyond the Visible Archaeological Record*. Cambridge: Cambridge University Press.
<<https://doi.org/10.1017/CBO9780511811210>>

