



Dinámica climática y paisajística del Pirineo leridano durante la transición Tardiglacial-Holoceno

Climate and landscape dynamics in the leridan Pyrenees during the Late Glacial-Holocene transition

Pèlachs, A.⁽¹⁾; Rodríguez, J.M.⁽²⁾; Pérez-Obiol, R.⁽²⁾; Julià, R.⁽³⁾; Burjachs, F.⁽⁴⁻⁵⁻⁶⁾; Expósito, I.⁽⁵⁻⁶⁾; Cunill, R.⁽⁷⁾; Soriano, J.M.⁽¹⁾; Yll, E.I.⁽⁸⁾

(1) UAB: Departament de Geografia, Facultat de Filosofia i Lletres, Universitat Autònoma de Barcelona. Edifici B, E-08193, Bellaterra, España. albert.pelachs@uab.cat

(2) UAB: Unitat de Botànica, Facultat de Biociències, Universitat Autònoma de Barcelona. Edifici B, E-08193, Bellaterra, España.

(3) ICT-CSIC: Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera". C/ Lluís Solé i Sabarís, s/n, E-08028, Barcelona, España.

(4) ICREA: Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats. Barcelona, España.

(5) IPHES: Institut Català de Paleoecologia Humana i Evolució Social. C/ Marcel·lí Domingo, s/n, E-43007, Tarragona, España.

(6) URV: Àrea de Prehistòria, Facultat de Lletres, Universitat Rovira i Virgili. Av. Catalunya, 35, E-43002, Tarragona, España.

(7) UTM: Géographie de l'Environnement, UMR 5602 CNRS, Université de Toulouse II-Le Mirail. 5, allées Antonio Machado, F-31058, Toulouse, France, Cedex 9.

(8) MINOA: Arqueologia i Serveis S.L. I+D. Camí Antic de Sant Cugat, 145, E-08193, Bellaterra, España.

Resumen

El Estany de la Coma de Burg (CMB) y la turbera de Estanilles (EST) son dos registros sedimentarios que aportan información paleoambiental sobre la transición del Tardiglacial al Holoceno en el Pirineo centro-oriental (Alto Pallars, Lleida). La comparación de los valores de materia orgánica (Loss On Ignition) de CMB con los registros polínicos de las dos secuencias (CMB y EST) indica que la LOI es más sensible a los cambios en la temperatura que en la precipitación. Los valores polínicos reflejan la sucesión de distintos paisajes, desde formaciones estépicas (*Artemisia* y *Poaceae*) hasta comunidades más o menos boscosas (*Pinus*, *Betula* y *Corylus*). Las 6 fluctuaciones documentadas por la LOI coinciden con las fluctuaciones de las temperaturas del Hemisferio Norte (Greenland Ice Core Project, GRIP) y marcan el Bölling, Alleröd, Dryas Reciente y el inicio del Holoceno, así como algunas fluctuaciones posteriores.

Palabras clave: LOI, polen, Tardiglacial-Holoceno, vegetación, clima, Pirineos.



Abstract

The Coma de Burg lake (CMB) and the Estanilles peat bog (EST) are two sedimentary records that provide paleoenvironmental information about the Lateglacial-Holocene transition in the central-eastern Pyrenees (Alt Pallars, Lleida). The comparison of the organic matter values (Loss On Ignition) with the pollen records from the two sequences (CMB and EST) indicates that the LOI is more sensitive to the changes in temperature than precipitation. Pollen values reflect the succession of different landscapes, from steppe formations (*Artemisia* and *Poaceae*) to forest communities (*Pinus*, *Betula* and *Corylus*). The 6 fluctuations documented by the LOI coincide with the temperature fluctuations in the Northern Hemisphere (Greenland Ice Core Project, GRIP) and mark Bølling, Allerød, Younger Dryas and the Holocene onset as well as later fluctuations.

Keywords: LOI, pollen, Lateglacial-Holocene, vegetation, climate, Pyrenees.

1. Introducción

Actualmente existen muy pocas secuencias paleoambientales en la vertiente sur del Pirineo que aporten información sobre la cronología y el paisaje vegetal entre el Último Máximo Glacial (LMG) y el inicio del Holoceno (González-Sampéris *et al.*, 2006; Pérez-Obiol y Julià, 1994; Pla y Catalán, 2005). En estos registros existen otros problemas añadidos como son la baja resolución, los hiatos temporales y una altitud no siempre adecuada para establecer un patrón comparativo, hecho que complica el análisis de los datos obtenidos para abordar con detalle la dinámica de la transición entre el Tardiglacial y los principios del Holoceno.

En el hemisferio norte la cronología de este período se ha establecido a partir del GRIP (Greenland Ice Core Project) basado en las variaciones isotópicas del oxígeno (^{18}O) siguiendo los resultados de Walker *et al.* (1999). Para la vertiente norte de los Pirineos, Jalut y Turu (2006) han presentado un trabajo de síntesis de la dinámica de la vegetación a partir del polen en función de los distintos Greenland Stadial (GS) y Greenland Interstadial (GI) definidos por Walker y que ha servido para caracterizar una vegetación tipo estepa o tundra con árboles muy diseminados hasta el 17.000 cal BP (GS-2b). A partir de

ese momento las formaciones con *Artemisia* y la presencia de leñosas (cf. *Juniperus*, *Salix*, *Betula*) ganan protagonismo (GS-2a) y reflejan una mejora climática, que se confirma con la llegada del Bølling (GI-1e) a partir de 14.700 cal BP y el fuerte aumento de *Betula*. Estos autores señalan como hacia 14.075 cal BP en la transición hacia el Allerød (GI-1d) *Pinus* incrementa significativamente la cubierta forestal. Una dinámica que interrumpe el Dryas Reciente (GS-1) entre 12.650 y 11.700 cal BP. A partir de este momento la extensión de caducifolios (*Quercus* y *Corylus*) indicarán el inicio del Holoceno.

Según Jalut y Turu (2006), esta dinámica vegetal general debe ser analizada región a región, ya que el desarrollo más o menos marcado de las especies estépicas y heliófilas puede variar. En este sentido, los registros que se presentan en este trabajo aportan información regional inédita de la vertiente sur pirenaica. De este modo, el registro sedimentario del Estany de la Coma de Burg (CMB), según los datos polínicos y la LOI (*Loss On Ignition*), se muestra altamente sensible a las variaciones medioambientales a escala regional (Pèlachs *et al.*, 2011). Asimismo, la secuencia de Burg se complementa con los datos polínicos de la turbera de Estanilles (2.247 msnm), también situada en el Alt Pallars (Pirineo leridano), que permite corrobora-

rar los datos obtenidos y dar consistencia al modelo paisajístico en la transición del Dryas Reciente al Holoceno. El objetivo principal de este artículo es aportar nuevos datos para caracterizar el paisaje vegetal de la vertiente sur pirenaica centro/oriental en la transición del Tardiglacial al Holoceno.

Las secuencias analizadas en este artículo son inéditas en cuanto a resultados del Tardiglacial, aunque han aportado otros datos relevantes para la historia ambiental de la región sirviendo para caracterizar tres grandes etapas del paisaje vegetal a lo largo del Holoceno: desde los bosques caducifolios a la llegada de los abetales (9000-6200 años cal BP), la presencia de bosques mixtos y la consolidación del abetal (6200-3300/2800 años cal BP) y la presencia de los pinares (3300/2800 años cal BP-actualidad) (Pèlach et al., 2007). Además, se ha demostrado como durante el Holoceno medio (7200-2800 años cal BP) existió una elevada coherencia entre la dinámica de la materia orgánica y los ciclos de Bond, la cual cosa ha indicado fluctuaciones climáticas que pudieron afectar la dinámica de la vegetación y condicionar la influencia humana (Pèlach et al., 2011). Una influencia humana basada en el uso del fuego, al menos desde hace 7500 años cal BP en Estanilles (Pérez-Obiol et al., 2012), y considerada determinante en Burg para los últimos 3.300 años cal BP (Bal et al., 2011). El papel del fuego también se ha discutido en el límite altitudinal del bosque señalando su importancia en el inicio del Holoceno a partir de los restos de carbón de los suelos o pedoantracología (Cunill et al., 2012).

2. Área de estudio

Las dos secuencias estudiadas se encuentran en la parte alta de la cuenca de la Noguera Pallaresa (Pallars Sobirà, Pirineo de Lleida) (Figura 1). Ambos depósitos tienen una base sedimentaria lacustre, sin embargo su colmatación holocena ha provocado que actualmente funcionen como humedales estacio-

nales. A pesar de ello se llamará Estany de Burg y turbera de Estanilles a cada depósito manteniendo la denominación toponímica actual.

El Estany de la Coma de Burg (CMB) (42° 30' 18" N y 1° 18' 22" E) se encuentra a 1.821 m de altitud, mide 85 metros de largo por 64 m de ancho y se sitúa entre la Noguera Pallaresa y el río Segre, cerca de la frontera con Andorra y Francia, en el municipio de Farrera de Pallars. El valle en forma de U está formado por calco-esquistos (Poblet, 1991; ICC, 2010). La precipitación anual media oscila entre 500-900 mm y la temperatura anual es de 10,1 °C (en el valle) y 2,3 °C en la cima, según los datos del *Atlas Climàtic Digital de Catalunya* (Ninyerola et al., 2000). La vegetación actual se caracteriza por una elevada presencia de *Pinus sylvestris*, en combinación con *Betula pendula* en la parte inferior del piso subalpino, mientras que en la transición al alpino domina *Pinus uncinata*. La paleolaguna de Burg es de origen glaciar y fue formada por obturación de una morrena frontal (Vizcaíno, 2003).

La turbera de Estanilles (42° 37' 7,0" N y 1° 17' 42,9" E) se sitúa a 2.247 msnm en la cabecera del valle de Cardós, en la base de la zona conocida como Plaús de Boldís-Montarennyo en el término municipal de Lladorre. Una extensa superficie de aplanamiento que forma un altiplano de formas suaves por encima de los 2.450 msnm con una extensión total de 3,2 km². El sustrato litológico está formado por rocas de origen Cambro-Ordoviciano que se corresponde con esquistos cuarcíticos y filitas. La precipitación anual media en la zona oscila entre los 793 mm (fondo valle) y los 1.352 mm (cabecera), aunque en las zonas altas se pueden constatar unos valores máximos en primavera y otoño. Además, hay que destacar que el manto nival se prolonga durante meses. La temperatura anual media varía entre 7,7 °C (1.100 msnm) y los 2,6 °C (2.240 msnm) (Ninyerola et al., 2000). La vegetación actual, producto de una intensa transformación humana, permite dis-

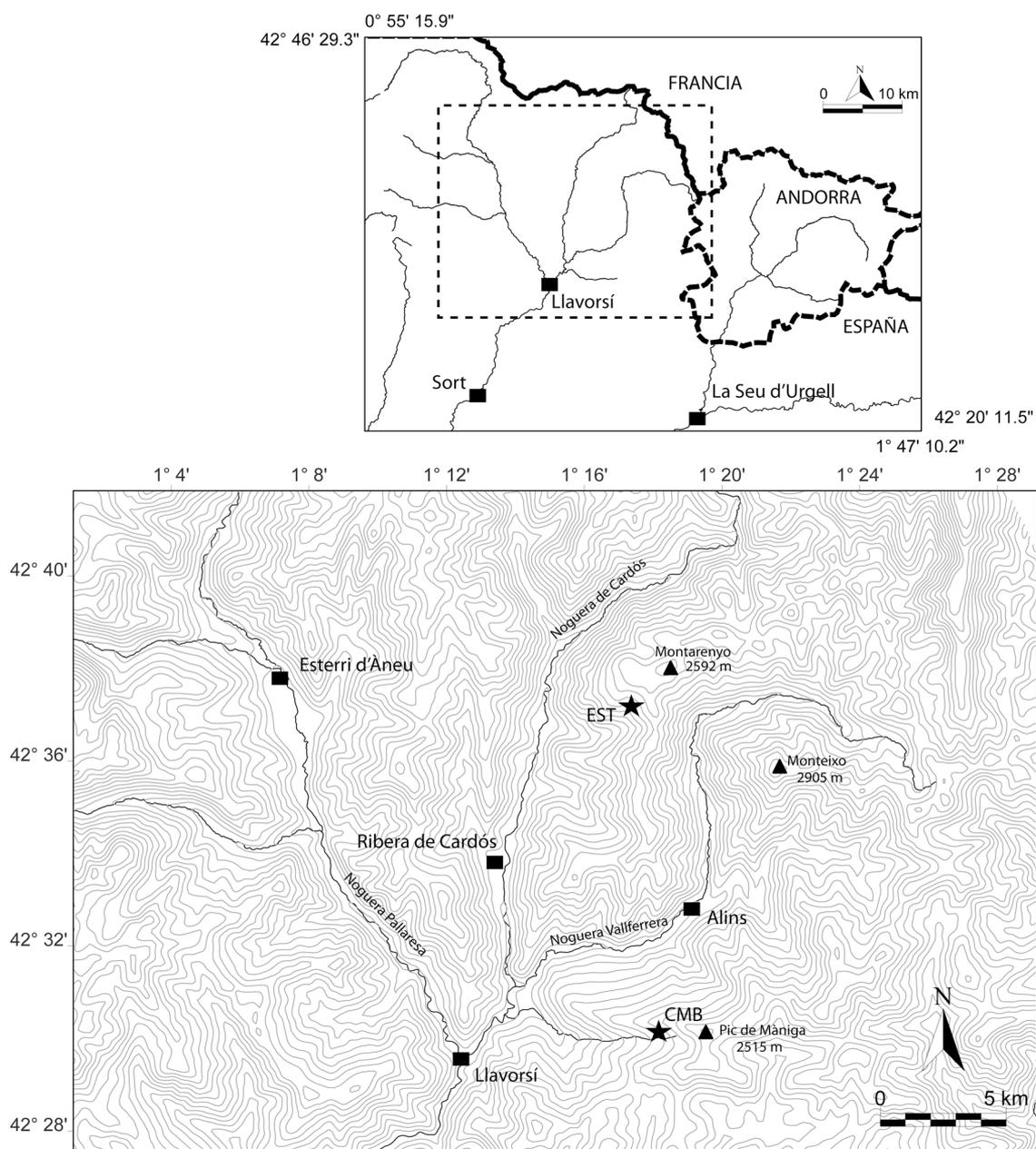


Figura 1. Localización de la zona de estudio.
 Figure 1. Location of the study area.

tinguir tres pisos de vegetación. El montano (1.600-1.850 msnm) se caracteriza por una fuerte presencia de *Quercus petraea* mezclado con *Betula pendula*. En el piso subalpino *Pinus uncinata* con *Rhododendron*

ferrugineum y *Vaccinium myrtillus* son las especies dominantes. Y, hacia los 2.000 msnm, en un paisaje abierto se combinan leñosas (*Genista balansae*) con pastos (prados de *Festuca eskia* y *Festuca airoides*) hasta la cima. El

límite altitudinal del bosque en esta zona ha sido claramente modificado por la acción humana y el uso del fuego (Cunill, 2010).

3. Material y métodos

3.1. Sondeos y preparación de las muestras

Del Estany de la Coma de Burg se han obtenido dos testigos: CMB-9 (de la superficie hasta los 228 cm) y CMB-8 (de los 228 cm hasta los 1.650 cm). La campaña de extracción se hizo con una máquina industrial de sondeos geotécnicos a rotación Rolatec (RL 48-L), que permitió la recuperación de los testigos con 10 cm de diámetro. En Estanilles se recuperaron cinco testigos con la ayuda de una sonda mecánica *Eijkelkamp* a percusión. En este artículo se analiza EST-4 por ser el más profundo (277 cm) y tener la datación más antigua en la base. El diámetro del testigo recuperado ha sido de 5 cm. En este artículo para CMB-8 se presenta la descripción sedimentológica inédita entre la cota 700 cm y la base del sondeo a 1.600 cm (Figura 2). Y para EST-4 la descripción inédita entre la cota 160 cm y la base del sondeo a 277 cm (Figura 2) (más detalles del resto de la secuencia en Pèlachs *et al.*, 2011 y Pérez-Obiol *et al.*, 2012).

En ambos casos el testigo de sedimento se ha cortado longitudinalmente y separado en dos partes, a partir de las cuales se ha realizado la descripción estratigráfica y se han seleccionado fragmentos orgánicos a datar. Una de las dos mitades ha servido para muestrear cada 1 cm y reservar material para otros análisis.

3.2. Cronología

Un total de 13 dataciones para el conjunto de CMB y 10 dataciones para EST de ^{14}C -AMS, calibradas mediante CalPal2007_HULU (Danzeglocke *et al.*, 2010), han permitido extrapolar linealmente edad y profundidad para toda la secuencia (Tabla 1).

3.3. Loss On Ignition

En este artículo se presentan los análisis de 157 muestras (sobre un total de 211 analizadas) de LOI, entre la cota 655 y 1.441 cm de CMB-8. El procedimiento seguido para su cálculo ha consistido: **a)** determinar el contenido en agua de cada muestra usando un horno a 60 °C; **b)** moler la muestra (aprox. 1 g) en un mortero de ágata para el análisis de difracción de rayos X con un difractorómetro Buker D5005; **c)** esta muestra también fue utilizada para calcular el porcentaje de materia orgánica y la cantidad de carbonatos por peso de muestra, después de quemar los sedimentos durante 4 horas, a 550 °C y 950 °C respectivamente, en una mufla (Dean, 1974; Heiri *et al.*, 2001).

Para evitar resultados engañosos, debidos a la presencia de agua de cristalización, enlaces metal-hidróxidos, o a una gran cantidad de arcillas, se ha comprobado mediante análisis de difracción de rayos X la composición mineral de cada muestra. El análisis de difracción de rayos X indica la presencia de yeso y la contribución de los carbonatos a los sedimentos. La LOI a 550 °C y a 950 °C mostró valores similares ($r^2=0,998$, $n=211$). Por lo tanto, los valores de LOI a 550 °C se asumen como el reflejo del contenido de materia orgánica en los sedimentos.

3.4. Polen

El tratamiento de las muestras para extraer el polen sedimentario ha sido el descrito por los estándares habituales, incluyendo el tratamiento con 50% HCl, 10% NaOH y 70% HF, a fin de eliminar los carbonatos, ácidos húmicos y silicatos respectivamente. Además, las muestras fueron sometidas a flotación en licor denso de Thoulet (2,1 g/cm³), a fin de separar los pólenes por densidad (Goëury y Beaulieu, 1979). Finalmente, el residuo se montó en preparación biológica en un medio de glicerina fenolada. El polen se ha identificado usando un microscopio óptico y las co-

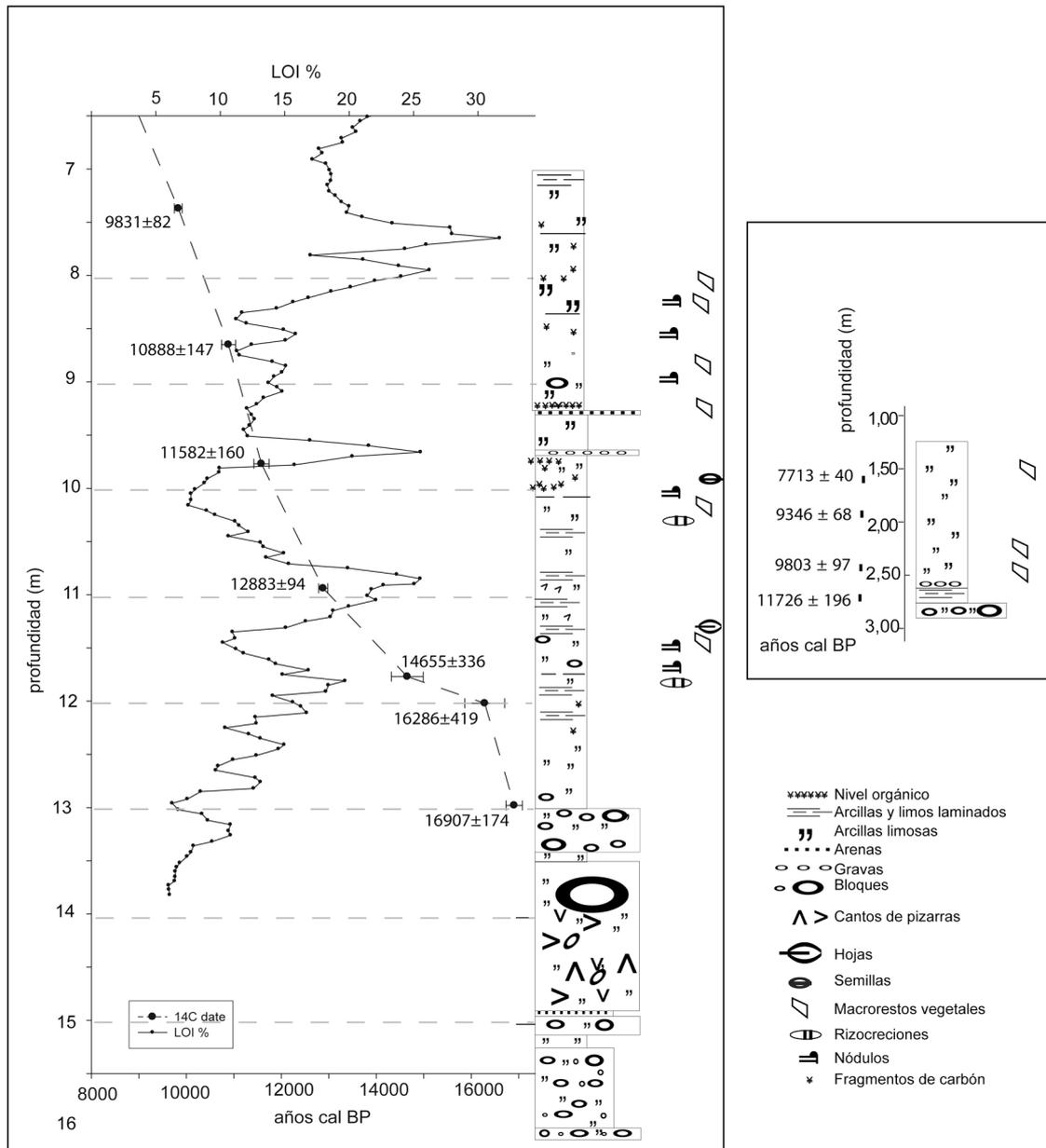


Figura 2. Litología y ¹⁴C (CMB y de EST), LOI (CMB).
 Figure 2. Litology and ¹⁴C (CMB y de EST), LOI (CMB).

lecciones de referencia estándares y sus claves de determinación (Moore *et al.*, 1991) y atlas de fotos (Reille, 1992, 1998). Los resultados han sido expresados en porcentajes relativos, excluyendo las esporas y los hidro-higrófitos (*Ranunculus*, *Cyperaceae*,

Typha-Sparganium, *Apiaceae*, algas, hongos y helechos) de la suma base polínica, cuyo porcentaje se ha calculado respecto a ésta.

El recuento polínico presentado para CMB-8 se ha realizado a partir del tratamiento de

Tabla 1. Edades radiocarbónicas de los testigos sedimentarios del estany de Burg (CMB) y la turbera de Estanilles (EST). CMB: Datos publicados por primera vez en Pèlach et al. (2011); EST: Datos publicados por primera vez en Cunill et al. (2012).

Table 1. Radiocarbon data for the sediment cores of Burg lake (CMB) and Estanilles (EST) peat bog. CMB: First published data Pèlach et al. (2011); EST: First published data Cunill et al. (2012).

Código de laboratorio y código de sondeo	Material datado	Edad ^{14}C	Edad usada para el modelo cronológico (CalPal2007_HULU)	Muestra (profund. cm)	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$
Beta-246365 CMB-8	carbón vegetal (no identificable)	8800 \pm 40	cal. 9831 BP [cal. 7881 BC]	786-787	NA
NOSAMS-59784 CMB-8	madera (<i>Pinus</i> sp.)	9520 \pm 45	cal. 10888 BP [cal. 8938 BC]	914-915	-25.14
NOSAMS-59785 CMB-8	madera (<i>Pinus</i> sp.)	10050 \pm 45	cal. 11582 BP [cal. 9632 BC]	1026-1027	-27.1
NOSAMS-59786 CMB-8	madera (<i>Pinus</i> sp.)	10950 \pm 50	cal. 12883 BP [cal. 10933 BC]	1143-1144	-26.57
Beta-246366 CMB-8	turba	12420 \pm 60	cal. 14655 BP [cal. 12705 BC]	1226-1227	-26.2
NOSAMS-59787 CMB-8	turba	13350 \pm 60	cal. 16286 BP [cal. 14336 BC]	1251-1252	-26.12
NOSAMS-59788 CMB-8	semillas de plantas acuáticas	13750 \pm 70	cal. 16907 BP [cal. 14957 BC]	1346-1348	-21.52
Beta-273257 EST-IV	madera (no identificable)	6870 \pm 40	cal. 7713 \pm 40 BP [5763 \pm 40 cal. BC]	159-160	-25.3
Beta-264257 EST-IV	madera (no identificable)	8320 \pm 50	cal. 9346 \pm 68 BP [7396 \pm 68 cal. BC]	197-198	-25.3
Beta-264258 EST-IV	madera (no identificable)	8780 \pm 50	cal. 9803 \pm 97 BP [7853 \pm 97 cal. BC]	246-247	-26.0
Beta-264259 EST-IV	sedimento orgánico	10120 \pm 50	cal. 11726 \pm 196 BP [9796 \pm 196 cal. BC]	265-266	-20.2

154 muestras (entre 659 y 1.441 cm) y el conteo polínico de EST-4 a partir de 53 muestras (entre el centímetro 160 y la base a 277 cm).

3.5. Tratamiento estadístico

Se ha realizado un análisis de componentes principales con los datos de CMB y EST con el paquete Statistica 8.0, aplicado sobre la media móvil de tres muestras para detectar mejor la tendencia y eliminar resultados anómalos entre muestras. Las variables consideradas han sido la materia orgánica (únicamente en el registro CMB), las principales especies arbóreas (*Pinus*, *Corylus*, *Betula* y *Salix*,

este último género únicamente en el registro CMB), y las especies herbáceas más representativas e indicadoras de espacios abiertos y/o de estrés climático (*Plantago*, *Ephedra*, Poaceae, *Artemisia*, Chenopodiaceae y Apiaceae, este último género únicamente en el registro CMB).

Para todos los casos el polen analizado mediante dicho análisis representa siempre más de un 75% del porcentaje polínico total, siendo superior al 95% en la mayoría de los casos, excepción hecha de 6 muestras de CMB en las cuales el porcentaje ha sido del 50% (a 1.350 y a 1.234 cm de profundidad) y entre el 60 y el 70% para el tramo de testigo

de 1.349 a 1.324 cm de profundidad debido a la predominancia de megaforbias, que responden más bien a fenómenos edáficos locales y son menos sensibles al clima (*Scabiosa*, Caryophyllaceae, *Cytisus*, etc.), que no se han tenido en cuenta para el análisis. El porcentaje polínico mínimo del polen considerado para EST ha representado el 75,16% del polen total. En todos los análisis el *eigenvalue* mínimo considerado siempre ha sido 1.

El Análisis de Componentes Principales se presenta de forma gráfica a partir de adaptar el gráfico elaborado con Statistica 8.0 con el programa Adobe Illustrator CS4 14.0.0 (Figura 4). Además, el Factor 1 y 2 de CMB se han representado conjuntamente con la LOI, con algunos de los principales taxones arbóreos y herbáceos considerados en el análisis estadístico utilizando el programa SigmaPlot 11.0.

4. Resultados

4.1. Modelo cronológico

La secuencia completa de CMB incluye la historia ambiental de los últimos 17.000 años cal. BP y la de EST los últimos 11.725 años cal BP (Tabla 1). Las 13 dataciones de ¹⁴C de CMB y las 10 dataciones de ¹⁴C de EST (calibradas en ambos casos) han permitido observar una tasa de sedimentación más o menos constante a escala de milenios durante la mayor parte del Holoceno (Figura 2). Aunque para CMB durante el inicio del Tardiglacial la tasa de sedimentación fue baja y asintóticamente mayor posteriormente, para llegar a ser más o menos constante a partir de hace 12.000 años cal BP. Para EST la transición al Holoceno desde el fin del Tardiglacial fue abrupta. En ambos casos el modelo cronológico se ha elaborado usando una interpolación lineal entre muestras, ya que proporcionaba una pauta de edades muy sólida teniendo en cuenta los cambios abruptos en la sedimentación.

4.2. Estratigrafía

El registro sedimentario de Burg analizado en este artículo presenta un conjunto litológico constituido por limos, con un contenido orgánico bajo (<30%), en el que se sitúan pequeñas capas de arenas y gravas (Pèlachs *et al.*, 2011) (LOI de la Figura 2). Estratigráficamente se puede distinguir dos únicos niveles en la parte analizada: entre 525 y 1.300 cm, limos lacustres que coinciden, según el modelo cronológico, con la transición entre el Holoceno y el Tardiglacial. Y, a partir de los 1.300 cm, gravas heterométricas hasta la base con un elevado contenido de arcillas (Pèlachs *et al.*, 2011). Tramo descrito de forma gráfica en la Figura 2 y en la que destacan distintos niveles de arcillas y limos laminados.

El registro sedimentario de la turbera de Estanilles ha permitido describir arcillas limosas que se encuentran entre 121 y 254 cm con abundantes restos de macrorrestos vegetales. Mientras que entre 254 y 269 cm los limos se han descrito como arcillas y limos laminados. Y a partir de 269 cm y hasta la base a 277 cm el sedimento corresponde a una grava con matriz (Figura 2) (Cunill *et al.*, 2012). En esta comunicación se ha descrito gráficamente el tramo entre la cota 160 y la base.

4.3. Materia orgánica

A partir de la LOI de CMB se han identificado 6 fluctuaciones distintas a lo largo del período considerado (Figura 3):

LOI-1) Entre la base de la secuencia a 1.441 cm (17.380 cal BP) y 1.231 cm (14.915 cal BP) la LOI describe una tendencia gradual al alza en forma de diente de sierra con mínimos y máximos crecientes. En este sentido se observan mínimos de LOI en distintas profundidades: 1.346 cm (6,2%), 1.315 cm (9,6%), 1.275 cm (10,3%), 1.245 cm (14%) y 1.225 cm (14,8%); mientras que se observan picos ele-

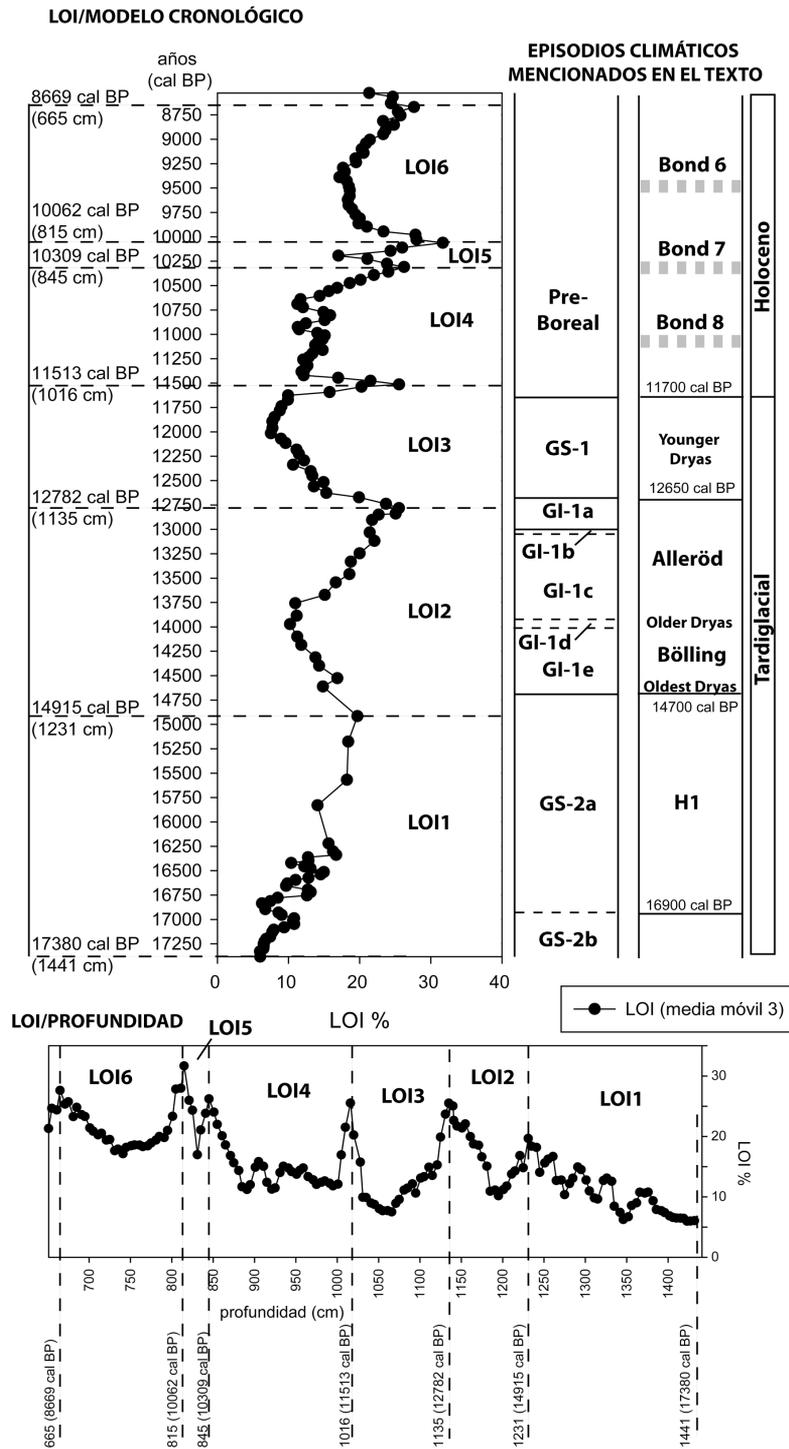


Figura 3. Síntesis de la LOI y episodios climáticos de CMB. Elaboración propia a partir de Walker *et al.* (1999), Ingolfsson *et al.* (1997) y Bond *et al.* (2001).

Figure 3. Synthesis of LOI and climate events from CMB. Own elaboration from Walker *et al.* (1999), Ingolfsson *et al.* (1997) y Bond *et al.* (2001).

vados de LOI en las siguientes profundidades: 1.376 cm (10,8%), 1.326 cm (13,2%), 1.291 cm (14,9%), 1.261 cm (16,7%) y 1.231 cm (19,6%).

El lapso temporal según se analicen máximos o mínimos oscila entre 16.836 años cal BP (1.346 cm) y 16.989 años cal BP (1.376 cm) en la base y 14.612 (1.225 cm) y 14.915 años cal BP (1.231 cm) al final.

LOI-2) Un segundo episodio, claramente diferenciado del anterior, descrito por la amplitud de la oscilación de LOI se sitúa entre la cota 1.231 cm y 1.135 cm. Esta forma de uve tiene una fuerte caída inicial de LOI pasando de 19,7% (1.231 cm) a un mínimo acusado del 10,2% (1.195 cm) y un mínimo relativo de 10,9 (1.185 cm) para ascender fuertemente hasta el 22% (1.155 cm), caer muy ligeramente 21,4% (1.151 cm) y terminar la ascensión en pico máximo de 25,5% a 1.135 cm.

El lapso temporal de la caída se ha situado entre 14.915 años cal BP (1.231 cm) y 13.970 años cal BP (1.195 cm), 13.758 años cal BP, si consideramos el mínimo relativo; y, desde este punto, la ascensión se prolonga ininterrumpidamente hasta 13.117 años cal BP (1.155 cm), en primera instancia y 12.782 años cal BP (1.135 cm) en una segunda ascensión hasta el máximo.

LOI-3) El siguiente episodio también se explica por una forma de "V" mucho más pronunciada y abierta que la anterior y se caracteriza por contener la caída (la LOI desciende un 18%, entre 1135 y 1066 cm, 12.782 y 12.015 años cal BP respectivamente) y el incremento (la LOI aumenta otro 18% entre 1.066 y 1.016 cm, es decir desde 12.015 hasta 11.513 años cal. BP) más acusados de todo el periodo analizado.

Respecto la fase de caída de la materia orgánica se han detectado dos pequeñas oscilaciones entre 1.115 y 1.111 cm (12.560-12.515 años cal BP) y entre 1.095 y 1.091 cm (12.337-12.293 años cal BP). Mientras que el

incremento presenta dos pendientes de la curva distintos: entre 1.066 y 1.035 cm (12.015 y 11.670 años cal BP) y de aquí hasta el máximo a 1.016 cm (11.513 años cal BP).

LOI-4) La curva de la LOI describe una gran "V" abierta con doble uve inferior en el centro del episodio, cuya doble base representa valores mínimos de LOI para este episodio (11,2% y 11,6% a 921 cm y 891 cm respectivamente). La caída inicial de LOI es de un 13,7% (pasando de 25,5% a 11,8% de LOI) en la cota 995 cm. A partir de aquí, los valores se recuperan ligeramente hasta la cota 935 (15% LOI), punto en el que se inicia la doble uve con los mínimos señalados y un máximo central a 15,8% de LOI en 905 cm. El último tramo de recuperación la LOI y que cierra la gran uve abierta de este periodo se prolonga desde 891 cm (11,2% LOI) hasta la cota 845 cm (26,2% LOI) en lo que es una recuperación del 15% de LOI.

Cronológicamente, la gran uve abierta tiene los máximos de LOI en 11.513 y 10.309 años cal BP, mientras que existen tres mínimos relativos en 11.383, 10.925 y 10.689 años cal BP (en 995, 921 y 891 cm respectivamente) y tres máximos relativos situados en los extremos superiores de la doble uve de 11.011, 10.805 y 10.557 años cal BP (935, 905 y 875 cm respectivamente).

LOI-5) Una profunda y rápida oscilación de LOI dibuja una uve cerrada y creciente entre 845 y 815 cm (26,2% y 31,6% de LOI) y una base en la cota 831 cm (9,2% de LOI). Es un episodio breve que abarca unos 250 años, entre los 10.309 y 10.062 años cal BP y la base del mínimo en 10.194 años cal BP.

LOI-6) Para terminar la secuencia en el inicio del Holoceno, la LOI describe una gran U, con un máximo de LOI de 31,6% (hacia el año 10.062 cal BP, cota 815 cm) y una base en 741 cm con un 17% de LOI, en lo que es la segunda mayor caída (14,5%) del período analizado. Este punto se sitúa alrededor de 9.389 años cal BP. El final de la U en la cota 665 cm tiene un 27% de LOI (año 8.669 cal BP).

4.4. Polen y paisaje

El análisis de componentes principales ha permitido obtener un factor 1 para CMB que explica el 40,88% de los casos y para EST el 50,74%. Se ha relacionado este factor con el estrés de la vegetación, ya sea consecuencia de la temperatura y/o la precipitación. El factor 2 para CMB explica el 22% y para EST el 24,8% de los casos. Se ha relacionado este segundo factor con la presencia de taxones mesófilos y, por lo tanto, a la disponibilidad hídrica del entorno (Figura 4).

Los datos del factor 1 de CMB y EST indican una tendencia creciente hacia el paisaje arbóreo de *Pinus*, sobre todo a partir de la cota 1.011 cm (11.500 cal BP) de CMB en detrimento del paisaje abierto de estépicas, tal y como se puede observar en las curvas de *Ar-*

temisia de CMB y EST (Figuras 5 y 6). A su vez los paisajes abiertos de CMB y EST se caracterizan por los mismos taxones (Factor 1 valores negativos, por ejemplo: *Ephedra*, Poaceae, *Artemisia*, Chenopodiaceae) que contrastan siempre con un paisaje forestal formado por *Pinus*. Es notable el carácter pionero de *Salix* en ambientes abiertos (Figura 4).

Pinus tiene un comportamiento inversamente proporcional a la presencia de especies mesófilas como *Betula* y *Corylus*, que junto con Poaceae son las especies principales del Factor 2 de CMB y EST y que tienen una representación irregular a lo largo de todo el periodo analizado.

Los datos de polen de CMB indican cómo, en general, los picos de LOI se corresponden con situaciones forestales arbóreas (Factor 1 valo-

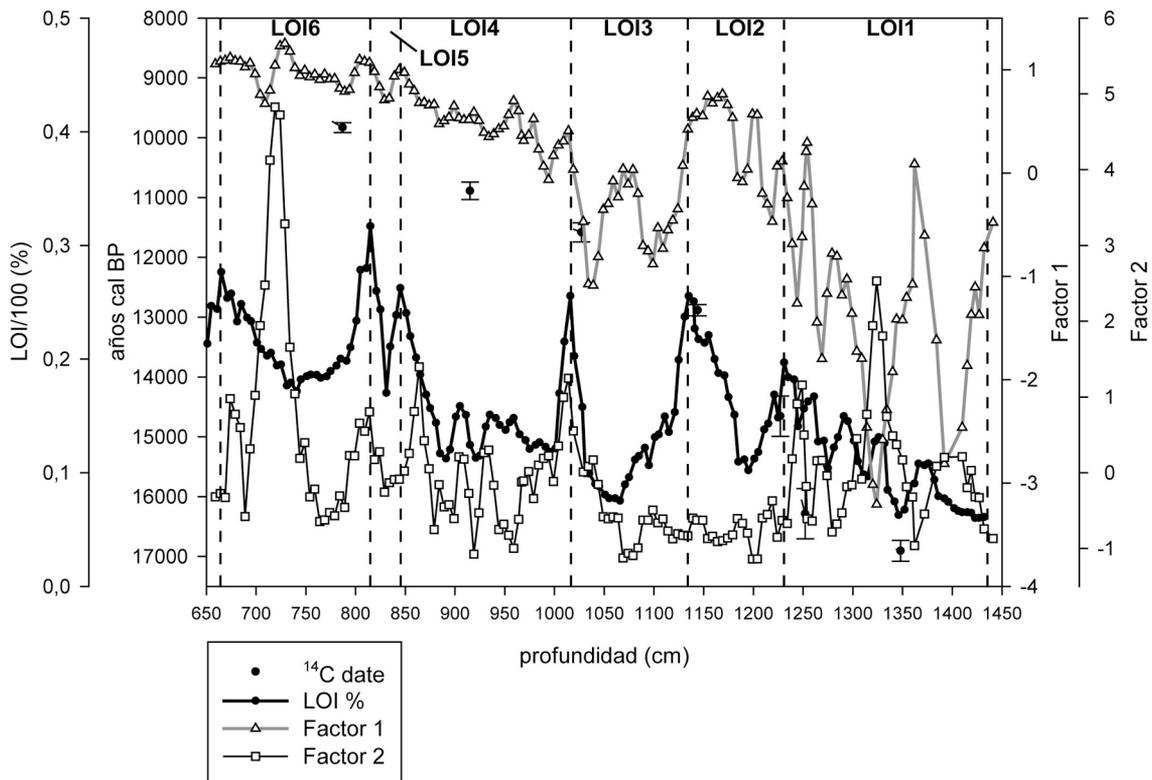


Figura 4. Análisis de factores de CMB y EST.
Figure 4. Factor analysis of CMB and EST.

res positivos) que se explican sobre todo por porcentajes elevados de *Pinus* (Figuras 5).

En CMB se observa que el contenido en materia orgánica del lago no siempre depende de la presencia de planifolios de hoja caduca, tal y como se puede observar entre la profundidad 750 y 700 cm, donde la LOI cae y el factor 2 aumenta. Siendo, únicamente entre la cota 1.000 y 1.030 cm, donde el pico de LOI se corresponde claramente con un incremento del Factor 2 (Figura 5).

5. Discusión

El contenido en materia orgánica del CMB es sensible al funcionamiento real de la cuenca y depende tanto de las condiciones climáticas como biológicas del entorno inmediato. Por ello, el contenido en materia orgánica del lago depende tanto de la biomasa que recibe como del hecho que ésta se pueda o no transformar en materia mineral. Si relacionamos la temperatura con la descomposición (a más temperatura mayor descomposición de materia orgánica) y la humedad con la acumulación (a más humedad más producción vegetal) parecería que una disminución de la temperatura y el aumento del nivel freático haría aumentar el volumen de la hipoxia y provocaría la disminución de la descomposición, lo que a su vez, favorecería la acumulación de materia orgánica (Crawford *et al.*, 2003). En cambio, si coinciden condiciones de baja temperatura y humedad la materia orgánica disminuye (Julià y Luque, 2006).

Las 6 fluctuaciones descritas por la LOI se corresponden con otros tantos periodos cronológicos descritos por diversos autores con una marcada influencia climática del sistema. LOI1 es coincidente con Heinrich 1, es decir, GS-2a; LOI2 coincide con el Bölling (GI-1e y GI-1d, fase de caída de la materia orgánica) y el Alleröd (GI-1c, GI-1b y GI-1a, fase de recuperación de la curva) con una clara inflexión a partir de GI-1d; LOI3 indica el Dryas Reciente o GS-1 (caída de los valores) y la salida de este evento; la inflexión de LOI4 coincide con el

ciclo de Bond-8 y la recuperación Holocena; LOI5 es coincidente con Bond-7 y LOI6 también tiene un mínimo en Bond-6 (Walker *et al.*, 1999; Bond *et al.*, 2001; Jalut y Turu, 2006; Jalut *et al.*, 2010).

Desde un punto de vista de la vegetación, el factor 1 de CMB se ha relacionado con el estrés que sufre la vegetación, ya sea causado por la temperatura y/o la precipitación, porque durante los periodos fríos y secos los paisajes de estas zonas eran abiertos dominados por *Artemisia* y *Ephedra* y *Salix*. En este sentido, hemos considerado *Salix* como un arbusto rastrero, exponente de paisajes vegetales mucho más fríos y áridos que los dominados por *Pinus*. Por eso, de un paisaje claramente estépico en el primer caso se pasaría en determinadas fases a una estepa arbolada de pinos. En este sentido y relacionándolo con aspectos climáticos, los mayores porcentajes de *Artemisia* se corresponden con LOI1 y LOI3, es decir GS-2a y GS-1, tal y como se observa en las figuras 3 y 5 y los paroxismos fríos de ambos periodos. De los datos de *Artemisia* y del factor 1 de CMB se desprende que tanto durante los interestadios Bölling y Alleröd (LOI2), como a partir del inicio del Holoceno (a partir de LOI4) las temperaturas nunca fueron tan bajas como en LOI1 y LOI3. La tendencia de temperatura a partir del Dryas Reciente (final LOI3) está claramente al alza.

Por otra parte el factor 2 de CMB responde a la presencia de taxones mesófilos (*Corylus*, *Betula*) y, por lo tanto, a la disponibilidad hídrica del entorno. La humedad, ya sea ambiental o edáfica, es importante para la presencia significativa de estas especies. Su aparición indica la presencia clara del elemento arbolado y por lo tanto de la posibilidad de pequeñas parcelas de bosque y un paso más en la dinámica de la sucesión vegetal dejando atrás la estepa arbolada. En este sentido los datos apuntan que el contenido en materia orgánica no depende de la presencia de planifolios de hoja caduca, tal y como se puede observar entre la profundidad

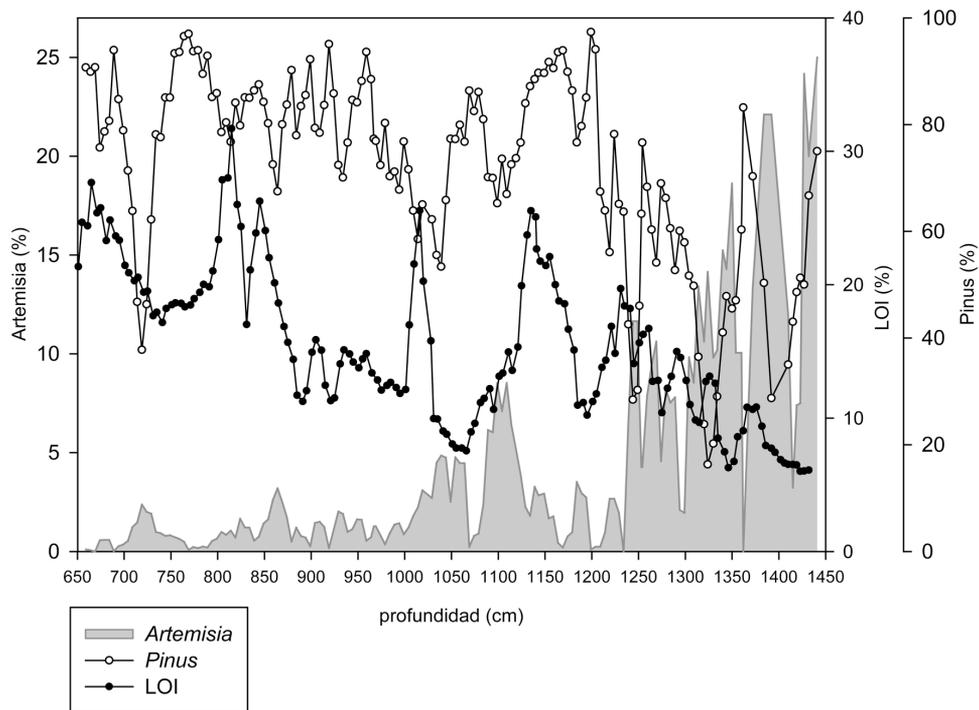
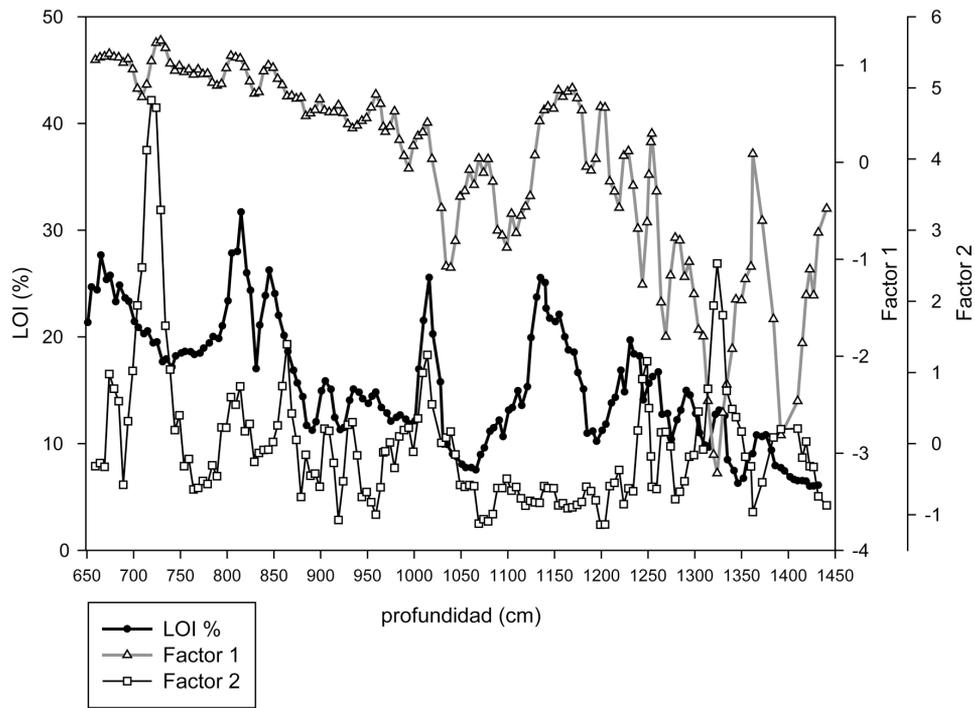


Figura 5. Análisis de factores, LOI y vegetación de CMB.
Figure 5. Factor analysis, LOI and vegetation of CMB.

750 y 700 cm. Hecho que ocurre únicamente entre la cota 1.000 y 1.030 cm donde el pico de LOI se corresponde claramente con un incremento del Factor 2 (Figura 5).

El hecho que la LOI tenga un comportamiento diferenciado entre la cota 1.231 y 1.135 cm (LOI2; interstadio Bölling/Alleröd) se puede explicar por las diferencias de temperatura del factor 1. Este factor indica una tendencia al alza general durante todo el período y por lo tanto, una tendencia a la mejora de la temperatura que favorecería el pinar. Sin embargo, inicialmente, existen caídas del Factor 1 y repuntes de *Artemisia* que se pueden relacionar con descensos acusados de la temperatura y la precipitación de corta duración. Desde un punto de vista polínico (Factor 1 y *Pinus*, Figura 5) y según algunas descripciones clásicas (Ingolfsson *et al.*, 1997) ambos episodios podrían relacionarse cronológicamente con el Dryas Antiguo o *Oldest Dryas* (transición H1 y GI-1e) y Dryas Medio o *Older Dryas* (GI-1d) (Figura 3). Además, la recuperación de *Pinus* a partir del Alleröd es coincidente con las descripciones hechas para la vertiente norte por Jalut y Turu (2006) y significa el cambio hacia un paisaje estépico con arbolado más o menos denso.

Asimismo, las condiciones de humedad caen drásticamente durante toda esta fase, tal y como se observa en el Factor 2 de CMB. Temperatura irregular y menos humedad, incluso tiempo seco, tal y como indican los caducifolios, provocarían el descenso de la LOI durante el Bölling (primera parte de LOI2, Figura 5). En cambio, temperatura al alza de forma regular con la misma humedad supondría un incremento de la LOI, aunque el paisaje fuera de coníferas, tal y como se observa en el Alleröd en la segunda parte de LOI2 (Figura 5).

En el mismo sentido, la caída de la LOI entre la cota 1.135 y 1.061 cm se ha correlacionado con el Dryas Reciente (Younger Dryas en Figura 3), según la cronología. El Factor 1 indica que la transformación del paisaje fue significativa. El Dryas provocó el paso de un paisaje

forestal arbóreo a un paisaje mucho más abierto y dominado por estépicas. El Factor 1 también indica como las condiciones ambientales del Dryas Reciente pudieron no ser las mismas durante todo el período, ya que primero LOI y Factor 1 se comportan igual, mientras que en un segundo momento el Factor 1 se recupera a pesar de que la LOI sigue cayendo (Figura 5). Si fue una cuestión de temperatura lo que provocó la recuperación de la vegetación forestal, no tuvo incidencia en la transformación de la materia orgánica. Si fue la disponibilidad hídrica, no fue suficiente para provocar la recuperación de los taxones mesófilos. Lo que sí sorprende es que la LOI indique un solo episodio y la vegetación señale dos, permitiendo plantear la hipótesis que el Dryas Reciente pudo tener dos fases desiguales.

Los datos también reflejan como la recuperación del Dryas Reciente se caracteriza por un aumento de los Factores 1 y 2, un proceso que a su vez favorece la LOI. Así, la transición desde el Dryas Reciente al Holoceno no sería un único proceso homogéneo, caracterizado por un incremento regular de temperatura y precipitación. A pesar de que el Factor 1 tiene una tendencia lineal mucho más marcada que el resto de indicadores utilizados, sus pequeñas oscilaciones coinciden con cambios mucho más evidentes en la curva de LOI. El Factor 2 sigue un patrón mucho más irregular y presenta grandes oscilaciones que no afectan la LOI. Durante este período se observan oscilaciones importantes de la LOI, lo que parece indicar cambios en la temperatura del entorno.

Los datos de Estanilles permiten debatir igualmente sobre el clima que acompaña las distintas fases descritas a partir del Dryas Reciente. De este modo se confirma como la vegetación propia de los espacios abiertos y fríos es dominada por *Artemisia* y ésta reacciona de forma inversamente proporcional a *Pinus*. El Factor 1 de EST se puede relacionar con un ambiente frío y seco. Un análisis detallado de la Figura 6 muestra como inicial-

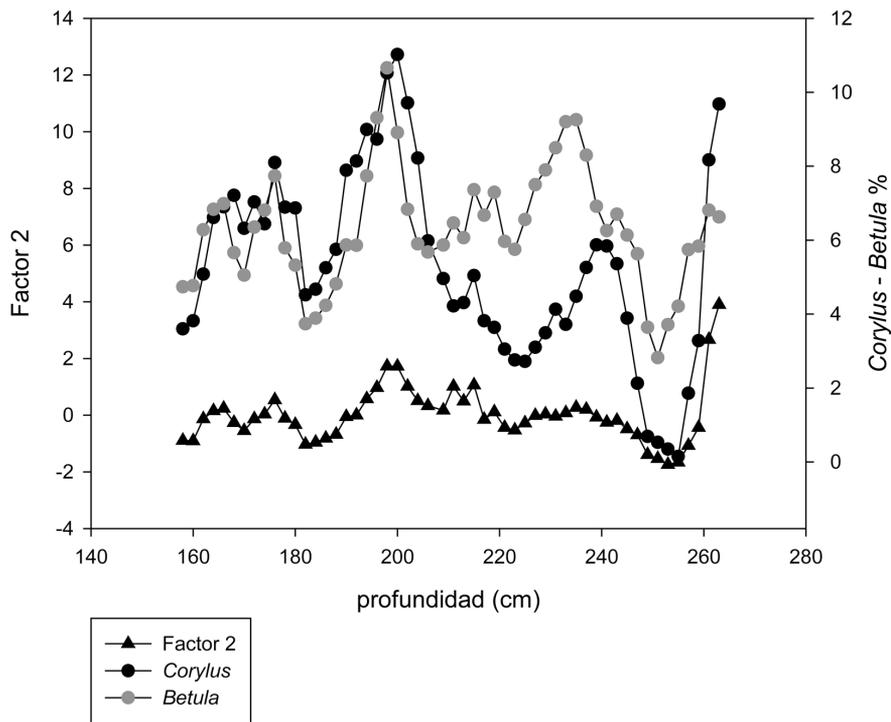
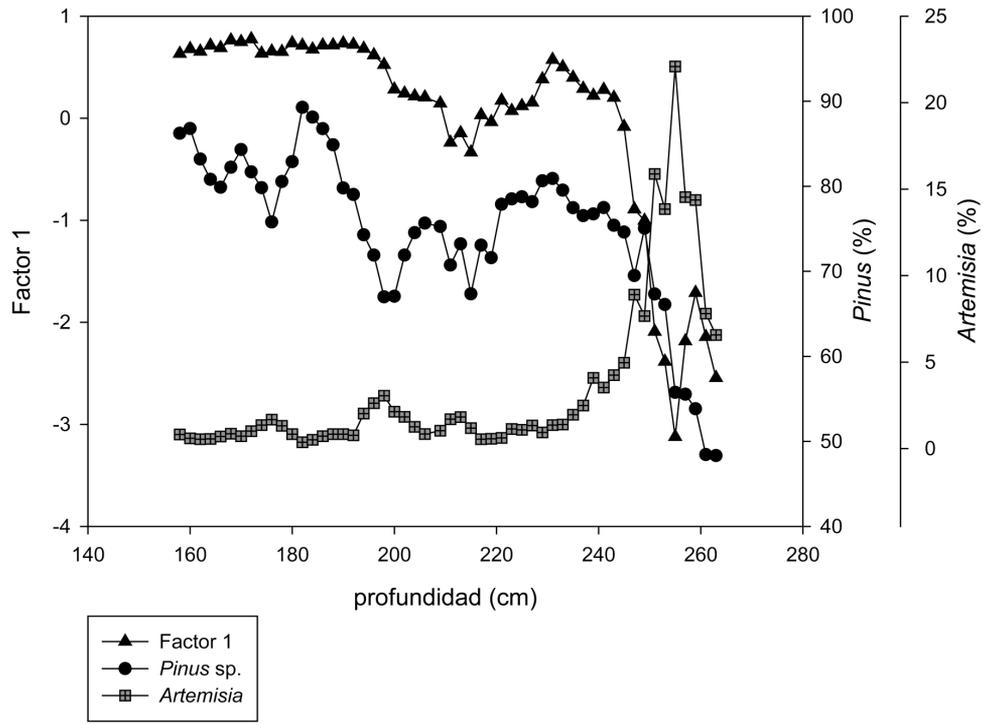


Figura 6. Análisis de factores y vegetación de EST.
 Figure 6. Factor analysis and vegetation of EST.

mente en la secuencia y de forma anterior al Dryas Reciente *Pinus* coloniza las zonas altas que hasta entonces habían estado dominadas por *Betula* y *Corylus*. Un incremento de *Pinus*, que en CMB ocurre con anterioridad temporal quizás por la diferencia de altura de ambos sitios (CMB a 1.821 m y EST a 2.247 m). Una vez *Pinus* ya se ha establecido en altura es cuando reacciona de forma negativa a la presencia de *Artemisia*. Así, inicialmente *Pinus* coloniza ambientes fríos y compite con elementos mesófilos, aunque una vez establecido existe una dinámica de estrés climático que se observa netamente con la representación de la Figura 6 de EST. El límite del bosque parece establecerse en altitud en EST con anterioridad a los 9.000 años cal BP, hecho que está refrendado por la presencia de carbones de *Pinus* con distintos niveles edáficos a estas cotas durante los inicios del Holoceno (Cunill, 2010). En el Factor 2 de EST (Figura 6), representado por *Corylus* y *Betula*, la humedad parece tener un papel destacado teniendo en cuenta la autoecología de estos taxones. Igual que en CMB, los datos indican que hay episodios áridos que coinciden con momentos de frío intenso tal y como ocurre durante el Dryas Reciente. Hay que tener en cuenta que durante estos episodios los recursos de agua no sólo vienen regulados por las precipitaciones, sino por la disponibilidad hídrica del suelo.

La llegada del Holoceno permite la colonización progresiva de nuevas especies como *Quercus*, tanto caducifolios como perennifolios, además de *Tilia*. El paisaje forestal aumenta en biodiversidad arbórea, evidenciándose la respuesta del paisaje vegetal a unas condiciones más húmedas y templadas.

6. Conclusiones

- El contenido en materia orgánica del paleolago de CMB es el reflejo de los tres tipos de paisajes del entorno inmediato (estépico, estépico con arbolado más o menos denso y comunidades boscosas) y su situación climática.

- La LOI en este sistema lacustre funciona como un buen termoindicador, porque a partir del tipo de paisaje vegetal se puede deducir si la temperatura favorecía las especies frías. Los resultados del Factor 1 de CMB y EST indican que las caídas de LOI de CMB se pueden asociar con una situación de estrés provocada por el descenso de las temperaturas.

- Las oscilaciones de la LOI en este sistema lacustre no responde de una manera clara al comportamiento de la disponibilidad hídrica del entorno. A diferencia del polen la LOI no es un buen hidroindicador en CMB.

- La LOI confirma los periodos Bölling y Alleröd como unos interestadios con una tendencia al aumento de la temperatura. Si bien inicialmente, la caída de la LOI indicaría cierta irregularidad de las temperaturas, lo cierto es que a lo largo del interestadial se constata el cambio de un paisaje formado por caducifolios a un paisaje de *Pinus* y, por lo tanto, de una menor humedad.

- El Dryas Reciente se caracteriza por elevados valores de *Artemisia*, *Ephedra* y *Chenopodiaceae*, los cuáles definen un paisaje estépico (y frío), que sustituye las anteriores formaciones forestales. El único taxón arbóreo importante de este episodio es *Pinus*, el cual forma, junto con las especies descritas anteriormente, una estepa arbolada en la mitad de este periodo.

- La entrada del Holoceno marca la recuperación de *Betula* y *Corylus*, ya que la humedad parece tener un papel destacado, factor que también favorece la colonización de *Quercus*. Al mismo tiempo, existe un pleno funcionamiento límnic con episodios con una notable productividad primaria.

Agradecimientos

Gran parte de estos estudios han sido posible gracias a la financiación de distintos proyec-

tos: Grup de Geografia Aplicada (2009 SGR 0106) y Grup de Recerca Palinològica (2009 SGR 1102) de la Generalitat de Catalunya. También, gracias a los proyectos del MICINN del Estado Español “Los paisajes de las áreas de montaña. Patrones de gestión y de ocupación del territorio” (CSO2009-08271, subprograma GEOG) y “Cambios tecno-culturales y de paisaje en la transición Pleistoceno-Holoceno en las zonas de influencia mediterránea de la Península Ibérica” (HAR2008-01984/HIST). F. Burjachs y I. Expósito pertenecen al Grup de Recerca Reconegut “2009 SGR 813”; J.M. Soriano y A. Pèlachs al “2009 SGR 106” y R. Pérez-Obiol al “2009 SGR 1102”, de la Generalitat de Catalunya. R. Cunill ha gozado de una beca FI de la Generalitat de Catalunya.

Bibliografía

- Bal, M.-C.; Pèlachs, A.; Pérez-Obiol, R.; Julià, R.; Cunill, R. (2011). Fire history and human activities during the last 3300 cal yr BP in Spain's Central Pyrenees: the case of the Estany de Burg. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 300, 179-190.
- Bond, G.; Kromer, B.; Beer, J.; Muscheler, R.; Evans, M.N.; Showers, W.; Hoffmann, S.; Lotti-Bond, R.; Hajdas, I.; Bonani, G. (2001). Persistent solar influence on North Atlantic Climate during the Holocene. *Science*, 294, 2130-2136.
- Crawford, R.M.M.; Jeffree, C.E.; Rees, G. (2003). Paludification and forest retreat in northern oceanic environments. *Annals of Botany*, 91, 213-226.
- Cunill, R. (2010). *Estudi interdisciplinari de l'evolució del límit superior del bosc durant el període holocènic a la zona de Plaús de Boldís-Montarenyo, Pirineu central català*. Tesis doctoral, Universidad Autònoma de Barcelona, Bellaterra, 146 pp.
<http://www.tdx.cat/handle/10803/4995>
- Cunill, R.; Soriano, J.M.; Bal, M.-C.; Pèlachs, A.; Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21 (4-5), 373-384.
- Danzeglocke, U.; Jöris, O.; Weninger, B., (2010). *CalPal-2007online*.
<http://www.calpal-online.de/> accessed 2010-03-25
- Dean, W.E. (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, 242-248.
- Goeury, C.; Beaulieu, J.-L. de (1979). À propos de la concentration du pollen à l'aide de la liqueur de Thoulet dans les sédiments minéraux. *Pollen et Spores*, XXI (1-2), 239-251.
- González-Sampériz, P.; Valero, B.; Moreno, A.; Jalut, G.; García, J.M.; Martí, C.; Delgado, A.; Navas, A.; Otto, T.; Dedoubat, J.J. (2006). Climate variability in the Spanish Pyrenees during the last 30,000 yr revealed by the El Portalet sequence. *Quaternary Research*, 66, 38-52.
- Heiri, O.; Lotter, A.F.; Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25, 101-110.
- ICC (2010). *Atles geològic de Catalunya*. Institut Geològic Catalunya, Institut Cartogràfic Catalunya, Generalitat Catalunya, Barcelona, 463 pp.
- Ingólfsson, O.; Björck, S.; Hafliðason, H.; Rundgren, M. (1997). Glacial and climatic events in Iceland reflecting regional north Atlantic Climatic Shifts during the Pleistocene-Holocene transition. *Quaternary Science Review*, 16, 1135-1144.
- Jalut, G.; Turu, V. (2006). La végétation des Pyrénées françaises lors du dernier épisode glaciaire et durant la transition Glaciaire-Interglaciaire (Last Termination). En: *Els Pirineus i les àrees circumdants durant el Tardiglacial. Mutacions i filiacions tecno-culturals, evolució paleoambiental (16000-10000 BP)* (O. Mercada, coord.), Institut d'Estudis Cereants. Puigcerdà, 129-149.
- Jalut, G.; Turu, V.; Dedoubat, J.J.; Otto, T.; Ezquerria, J.; Fontugne, M.; Belet, J.M.; Bonnet, L.; García de Celis, A.; Redondo-Vega, J.M.; Vidal-Romaní, J.R.; Santos, L. (2010). Palaeoenvironmental studies in NW Iberia (Cantabrian range): Vegetation history and synthetic approach of the last deglaciation phases in the western Mediterranean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297 (2), 330-350.
- Julià, R.; Luque J.A. (2006). Climatic changes vs. catastrophic events in lacustrine systems: A geochemical approach. *Quaternary International*, 158, 162-171.
- Moore, P.D.; Webb, J.A.; Collinson, M.E. (1991). *Pollen Analysis*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 216 pp.
- Ninyerola, M.; Pons, X.; Roure, J.M. (2000). A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, 20, 1823-1841.
- Pèlachs, A.; Nadal, J.; Soriano, J.M.; Esteban, A. (2007). Holocene environmental history and the human impact in the Pyrenees. *Contributions to Science*, 3, 423-431.
- Pèlachs, A.; Julià, R.; Pérez-Obiol, R.; Soriano, J.M.; Bal, M.C.; Cunill, R.; Catalán, 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.

- Pérez-Obiol, R.; Julià, R. (1994). Climatic Change on the Iberian Peninsula Recorded in a 30,000-Yr Pollen Record from Lake Banyoles. *Quaternary Research*, 41, 91-98.
- Pérez-Obiol, R.; Bal, M.-C.; Pèlach, 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 (4-5), 385-396.
- Pla, S.; Catalán, J. (2005). Chrysophyte cysts from lake sediments reveal the submillennial winter/spring climate variability in the northwestern Mediterranean region throughout the Holocene. *Climate Dynamics*, 24, 263-278.
- Poblet, J. (1991). *Estructura herciniana i alpina del vessant sud de la zona axial del Pirineu central*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, Barcelona, 604 pp.
- Reille, M. (1992). *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord*. Laboratoire de Botanique historique et Palynologie, Marseille, 543 pp.
- Reille, M. (1998). *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord, Supplément 2*. Laboratoire de Botanique historique et de Palynologie, Marseille, 521 pp.
- Vizcaíno, A. (2003). *Geología glacial de la Coma de Burg (Pirineu Central)*. Trabajo final de carrera de Geología, Universitat de Barcelona, Barcelona, documento inédito.
- Walker, M.J.C.; Björck, S.; Lowe, J.J.; Cwynar, L.; Johnsen, S.; Knudsen, K.-L.; Wohlfarth, B.; INTIMATE group (1999). Isotopic 'events' in the GRIP ice core: a stratotype for the Late Pleistocene. *Quaternary Science Reviews*, 18, 1143-1150.