

# Potencial paleoclimático de la cueva helada A294 (Macizo de Cotiella, Pirineos, Huesca)

*Palaeoclimate potential of A294 ice cave (Cotiella massif, Pyrennes, Huesca)*

Carlos Sancho<sup>1</sup>, Anchel Belmonte<sup>1</sup>, Jerónimo López-Martínez<sup>2</sup>, Ana Moreno<sup>3</sup>, Miguel Bartolomé<sup>1,3</sup>, Mikel Calle<sup>1</sup> y Pablo Santolaria<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España. [csancho@unizar.es](mailto:csancho@unizar.es)

<sup>2</sup> Departamento de Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, España.

<sup>3</sup> Departamento de Procesos Geoambientales y Cambio Global, Instituto Pirenaico de Ecología, C.S.I.C., Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza, España.

## ABSTRACT

The A294 is a small ice cave (2238 m.a.s.l.) located in the Cotiella karstic massif in the Spanish central Pyrenees. The bottom of the cave houses an ice deposit of almost 10 meters thick. Most of the ice comes from freezing of the snow that enters through the cave entrance. Its structure shows a stratified ice with many inner debris layers including many vegetal remnants. Radio-carbon calibrated age of the lower section of the deposit ranges from 5516±70 to 3808±104 y BP, and as a consequence it is one of the oldest subsurface ice deposits known so far in Europe. Highest rates of ice accumulation identified in the deposit are related to cold Middle Holocene stages at global scale. Isotopic data ( $\delta^{18}O$  and  $\delta^2D$ ) variability points to centennial/decadal alternating thermal stages. Ice caves are revealed as potential high resolution records of recent climate change in the Pyrenees.

**Key-words:** Ice cave, climate change, Holocene, Pyrenees.

## RESUMEN

La cueva A294 es una pequeña cavidad localizada en el macizo karstificado de Cotiella a 2238 m.s.n.m. en el sector central surpirenaico. El fondo de la cueva alberga un depósito de hielo de casi 10 m de espesor que procede de la transformación de nieve introducida en el interior. El hielo presenta una estructura estratificada con capas de clastos internos que incluyen gran cantidad de restos vegetales. La edad de radiocarbono calibrada de la sección inferior del depósito oscila entre 5516±70 y 3808±104 años BP, de manera que este registro de hielo es uno de los más antiguos referenciados en Europa en el ámbito subterráneo. Las mayores tasas de acumulación detectadas en el depósito coinciden con momentos fríos durante el Holoceno medio a escala global. La variabilidad de los datos isotópicos ( $\delta^{18}O$  y  $\delta^2D$ ) parece indicar una alternancia secular o de décadas en la temperatura. Se confirma el potencial de las cuevas con hielo del Pirineo como registros de alta resolución de cambios climáticos recientes.

**Palabras clave:** Cueva helada, cambio climático, Holoceno, Pirineos.

Geogaceta, 52 (2012), 101-104.  
ISSN 2173-6545

Fecha de recepción: 13 de febrero de 2012

Fecha de revisión: 26 de abril de 2012

Fecha de aceptación: 25 de mayo de 2012

## Introducción

En el ámbito de las Sierras Interiores pirenaicas, la karstificación generalizada del sustrato calcáreo y una altitud que supera los 2000 m s.n.m. favorecen la presencia de depósitos de hielo en algunas cavidades. Aunque su existencia se conoce desde hace décadas, la atención científica que han recibido hasta el momento ha sido escasa (López-Martínez y Freixes, 1989).

El término cueva helada (*ice cave*) se refiere a una cavidad natural que contiene un volumen significativo de hielo permanente. Este hielo puede aparecer, de manera general, por congelación de un volumen de agua infiltrada en una cueva y/o por transformación de nieve acumulada al pie de la entrada. También son frecuentes los espe-

leotemas de hielo (Ford y Williams, 2007).

El estudio de cuevas heladas presenta un alto potencial paleoclimático (Holmlund *et al.*, 2005; Luetscher *et al.*, 2007; Stoffel *et al.*, 2009) siempre y cuando sea posible establecer modelos de edad precisos que permitan referenciar cronológicamente los indicadores climáticos contenidos, básicamente isotópicos (Yonge y MacDonald, 1999) o polínicos (Feurdean *et al.*, 2011). Aunque recientemente han aparecido diversos registros de cuevas heladas datados mediante radiocarbono aplicado sobre restos vegetales (Stoffel *et al.*, 2009; Hercman *et al.*, 2010), no resulta habitual superar los 2 ka BP de antigüedad.

En este trabajo se presentan los primeros datos cronológicos e isotópicos obtenidos en una cueva helada española. Por otro

lado, las edades apuntan a que quizás se trate de uno de los registros más antiguos datado en la literatura internacional.

## Marco geológico y geomorfológico

La cueva A294 (2238 m s.n.m.) se localiza en la base del Circo de Armeña, dentro del Macizo de Cotiella incluido en el sector central surpirenaico (Fig. 1). Desde el punto de vista geológico, este macizo, perteneciente a la Unidad Surpirenaica Central, está formado por calizas del Cretácico superior superpuestas a calizas y margas terciarias (Fig. 2). El fondo del circo glaciar polilobulado de Armeña, libre de hielo en la actualidad, se encuentra altamente karstificado con campos de dolinas y lapiaz ge-

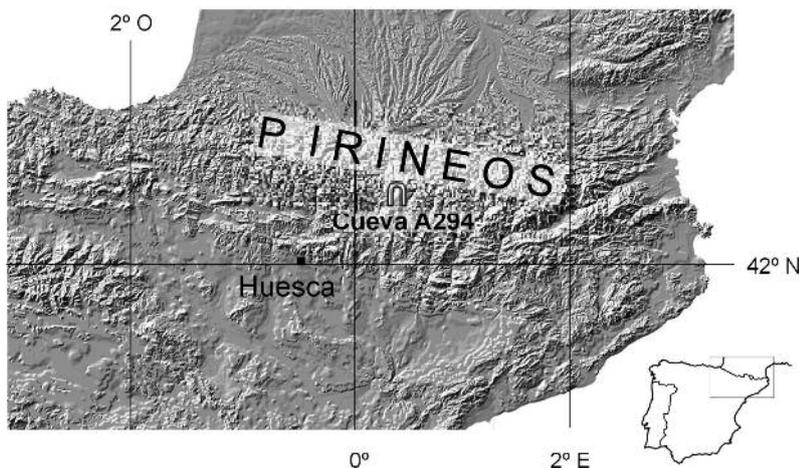


Fig. 1.- Localización de la cueva helada A294 en los Pirineos.

Fig. 1.- Location of A294 ice cave in the Pyrenees.

neralizados. Existen numerosas simas que comunican con un sistema endokárstico complejo. En lo que respecta al clima, el macizo se encuentra en la zona de transición entre influencia atlántica y mediterránea. En el pico de Cotiella (2.912 m.s.n.m.) la temperatura media anual estimada es -2,7 °C y la precipitación alcanza casi los 2.000 mm anuales. El macizo presenta una cubierta de nieve casi continua entre noviembre y junio.

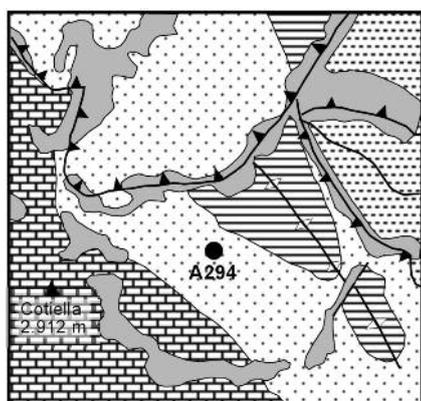


Fig. 2.- Esquema geológico del circo de Armeña (Macizo de Cotiella).

Fig. 2.- Geological scheme of Armeña cirque (Cotiella massif).

### La cavidad A294

La cueva A294 constituye un fondo de saco formado por una sala de dimensiones reducidas (40 m de anchura y 22 m de altura) conectada a una entrada circular, de casi 30 m<sup>2</sup>, mediante un pozo subvertical (Fig. 3). En el fondo de la cueva se aloja un depósito de hielo, con un volumen estimado de 250 m<sup>3</sup>, conectado a la entrada por una rampa de hielo cubierta de nieve. Sobre la superficie plana de la masa de hielo se desarrollan espeleotemas estacionales. En un lateral del cuerpo de hielo aparece una pared extraplomada, que permite observar la estratigrafía del depósito (Fig. 4). El espesor total observado se aproxima a los 10 m, si bien no se ha alcanzado la base del hielo.

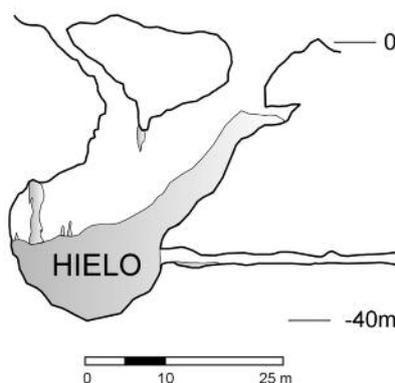


Fig. 3.- Sección transversal de la cueva A294 mostrando la geometría del depósito de hielo.

Fig. 3.- Ice cave A294 vertical cross section showing the shape of the ice deposit.

En el fondo de la cavidad la temperatura media anual es -1,34 °C. Los valores medios de invierno y verano son -4,32 °C y

0,74 °C, respectivamente. Durante el invierno se produce la entrada de aire frío, mientras que en verano la circulación se detiene y prevalecen las condiciones generales de fusión. Las observaciones cualitativas periódicas indican un rápido retroceso del volumen del depósito de hielo, más acentuado en la base.



Fig. 4.- Tramo superior del depósito de hielo, rampa de alimentación de nieve y entrada de la cavidad A294.

Fig. 4.- Upper stretch of the ice deposit, snow feeding ramp and A294 ice cave entrance.

### Metodología

Aprovechando el lateral expuesto del depósito de hielo se ha estudiado su estructura y se ha levantado un perfil descriptivo en el que situar las muestras extraídas, tanto de restos vegetales, como de hielo. Se seleccionaron 8 muestras de restos vegetales que han sido datadas mediante radiocarbono en el Laboratorio de Radiocarbono de la Universidad de Zurich. El muestreo de hielo se realizó mediante una corona de acero de 1,5 cm de diámetro y 5 cm de longitud adaptada a un taladro. Se extrajeron 22 microtestigos cuya composición isotópica ( $\delta^{18}O$  y  $\delta^2D$ ) ha sido analizada en el Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad Autónoma de Madrid. Los resultados se expresan como VSMOW en ‰.

### El registro de hielo

El afloramiento del depósito de hielo acumulado en el fondo de la cueva A294 alcanza los 9,25 m de espesor, si bien tiene que ser algo superior debido a que no se observa el contacto basal con la roca. La estructura del depósito es compleja y está formada por paquetes estratigráficos separados por superficies curvas, remarcadas por niveles de clastos internos de la cavidad en los que son frecuentes restos vegetales (es-

pículas de pino, hojas y fragmentos de pequeñas ramas). El hielo presenta un aspecto interno laminado.

Se ha estudiado una sección de 3,6 m de espesor de la masa de hielo (Fig. 5). De base a techo las edades calibradas de radiocarbono son 5.516±70, 4.963±105, 4.674±96, 4.535±112, 4.322±100, 4.280±133, 4.248±111 y 3.807±104 años BP. Destaca la total consistencia estratigráfica de las edades obtenidas. El modelo de edad (Fig. 6) permite diferenciar dos fases con baja tasa de acumulación de hielo (0,04-0,05 cm/año) separadas por un periodo en el que la tasa aumenta hasta 0,37 cm/año.

En relación con los análisis isotópicos del hielo ( $\delta^{18}O$  y  $\delta^2D$ ), de los cuales se presenta aquí una interpretación preliminar, se observa, en primer lugar, un excelente ajuste a la línea de agua meteórica (Fig. 7). Por otro lado, los datos isotópicos presentan una alta variabilidad (Fig. 8). El valor medio de  $\delta^{18}O$  es -9,93 ‰ VSMOW, con un máximo de -8,01 ‰ y un mínimo de -9,93 ‰. Por otro lado, el valor medio de  $\delta^2D$  es -69,67 ‰ VSMOW, con -55,8 ‰ y -81,7 ‰ como valores máximo y mínimo. La evolución temporal de estos valores muestra cierta organización. Así, entre 5.516 y 4.963 años BP y entre 4.248 y 3.807 años BP, coincidiendo con las fases de menor tasa de acumulación de hielo, los valores tienden a ser más ligeros. Sin embargo, mayor interés presenta el período intermedio (entre 4.674 y 4.280 años BP) con una tasa alta de acumulación de hielo, en el que alternan los valores más pesados y más ligeros. Destacan, dos picos con los valores isotópicos más pesados del registro a 4.350 y 4.800 años cal. BP.

### Discusión y perspectivas futuras

El mecanismo de formación del hielo de la cavidad A294 es la congelación de nieve introducida por el viento a través de la entrada de la cueva. A la vez se incorporarían restos vegetales que han sido utilizados para controlar la edad del depósito de hielo. Estos restos se concentran en niveles con abundancia de gelifractos internos que separan unidades estratigráficas. En la sección del depósito estudiada, los límites entre unidades suelen presentar geometrías curvas superpuestas. Aparecen como consecuencia de cambios espaciales de la zona de acumulación preferente, dentro de la cavidad,

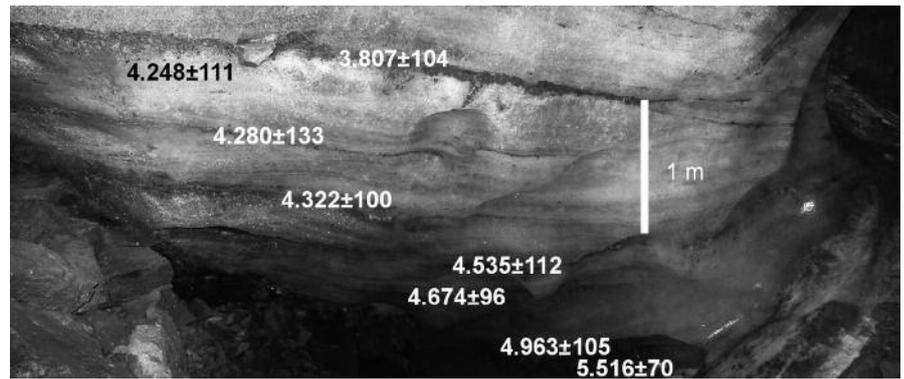


Fig. 5.- Tramo del depósito de hielo estudiado con indicación de las muestras datadas  
Fig. 5.- Studied stretch of the ice deposit indicating the obtained dated.

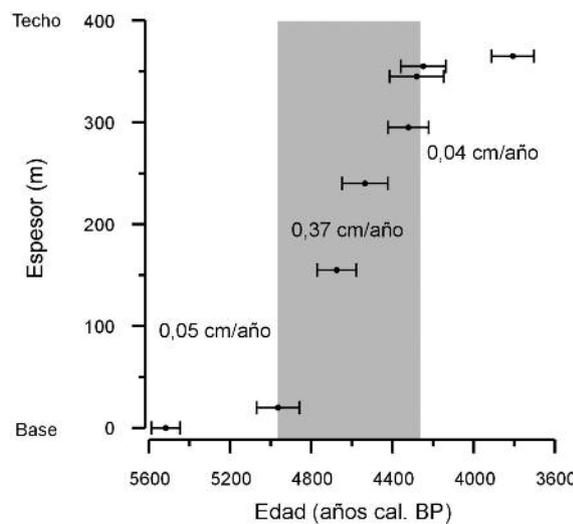


Fig. 6.- Modelo de edad y distribución de fases con diferente tasa de acumulación de hielo.  
Fig. 6.- Depth-age model showing three stages of different ice accumulation rate.

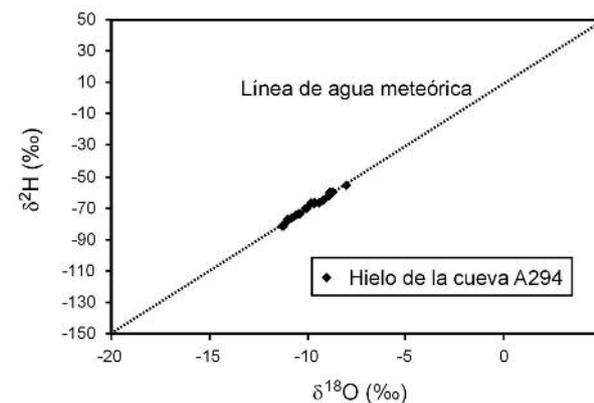


Fig. 7.- Posición isotópica de las muestras de hielo de la cueva A294 respecto a la línea de agua meteórica.  
Fig. 7.- Isotopic projection of A294 ice samples related to meteoric water line.

durante las fases de agradación sucesivas. Evidentemente, los niveles de clastos marcan episodios de hiatos sedimentarios, si bien es necesario valorar la posibilidad de fusión que conllevaría la aparición de niveles amalgamados. En este caso, aparecerían edades diferentes dentro de un mismo nivel o se observarían puntos de fusión diferencial que disturbarían la geometría regular de las superficies, circunstancias que no han sido evidenciadas. Por tanto, en principio, es

posible descartar la existencia de fases de fusión importantes. Como consecuencia, es posible utilizar el espesor de hielo y las edades obtenidas para calcular tasas de formación del mismo.

Desde el punto de vista paleoclimático, el ajuste de los valores isotópicos del hielo ( $\delta^{18}O$  y  $\delta^2D$ ) a la línea de agua meteórica se interpreta en términos de respuesta directa a la precipitación en forma de nieve, de manera que la señal isotópica del hielo es un

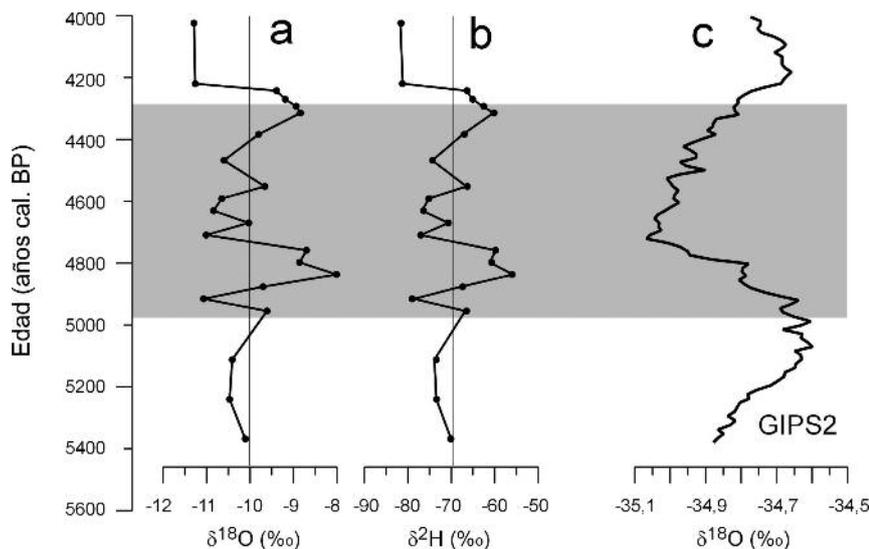


Fig. 8.- Variación de los valores isotópicos del hielo de la cueva A294 (a y b) y comparación con los datos del sondeo GIPS2 en Groenlandia para el mismo periodo (c). El rectángulo gris corresponde a la fase con mayor tasa de acumulación de hielo (ver figura 6).

Fig. 8.- Variability of A294 ice isotopic signature (a and b) and comparison to the Greenland GIPS2 ice-core data for the same period (c). Note that grey rectangle marks the highest ice accumulation period (see figure 6).

reflejo directo de la señal atmosférica reinante. Este ajuste permite, además, descartar un fraccionamiento isotópico relacionado con procesos de fusión y congelación del registro de hielo (Yonge y MacDonald, 1999). Por otro lado, es conveniente establecer las relaciones entre la señal isotópica de la precipitación nival actual y de los niveles superiores de neviza-hielo del talud de entrada, de cara a valorar isotópicamente los procesos de transformación (May *et al.*, 2011; Kern *et al.*, 2011).

Por otro lado, desde el punto de vista temporal, la etapa con una tasa más alta de acumulación de hielo tiene lugar entre 4.963 y 4.280 años cal. BP, coincidiendo con una etapa de condiciones frías a escala global, tal y como muestran los valores isotópicos del sondeo GIPS2 en Groenlandia (Grootes *et al.*, 1993) (Fig. 8). Esta circunstancia se traduciría, a escala regional, en precipitaciones importantes en forma de nieve. De manera adicional la señal isotópica demuestra también la existencia de variaciones climáticas térmicas a escala de

centenares/décadas de años, confirmando la alta sensibilidad de las cuevas heladas de este tipo a los cambios climáticos de alta frecuencia (Stoffel *et al.*, 2009). Destacan dos repuntes de tendencia hacia temperaturas más benignas a 4.350 y 4.800 años cal. BP. Toda esta información va a permitir avanzar en la propuesta de un modelo de evolución paleoclimática para el Holoceno medio en el sector central pirenaico, escasamente desarrollado hasta el momento (Pèlachs *et al.*, 2011).

## Conclusiones

Se estudia por primera vez, en España, una cueva de hielo con fines paleoclimáticos. Aunque se trata de una valoración preliminar, este estudio parece indicar, que se trata de uno de los registros datados más antiguos referenciados en la literatura internacional. A la vez, confirma el potencial de la cueva de hielo A294 como un registro de alta resolución de cambios climáticos durante el Holoceno en el sector central pire-

naico, que es necesario validar con investigaciones futuras.

## Agradecimientos

Este trabajo es una contribución del Proyecto CGL2009-10455/BTE (Ministerio de Ciencia e Innovación-FEDER) y del Grupo de Investigación Paleoaambientes del Cuaternario del Gobierno de Aragón-Universidad de Zaragoza. Los autores agradecen la colaboración de Ramón Queralto, Carles Pons y Alberto Bosque, durante el trabajo de campo, y de Eduardo Bartolomé, en el diseño del soporte técnico para el muestreo. Los autores agradecen los comentarios realizados por dos revisores anónimos.

## Referencias

- Feurdean, A., Persoiu, A., Pazdur, A. y Onac, B.P. (2011). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 165, 1-10.
- Ford, D.C. y Williams, P.W. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley and Sons, 562 p.
- Grootes, P.M., Stuiver, M., White, J.W.C., Johnsen, S. y Jouzel, J. (1993). *Nature*, 366, 552-554.
- Herman, H., Gasiorowski, M., Gradzinski, M. y Kicinska, D. (2010). *Geochronometria*, 36, 31-38.
- Holmlund, P., Onac, B.P., Hansson, M., Holmgren, K., Mörth, M., Nyman, M. y Persoiu, A. (2005). *Geografiska Annaler*, 87A, 193-201.
- Kern, Z., Fórizs, I., Pavuza, R., Molnár, M. y Nagy, B. (2011). *The Cryosphere*, 5, 291-298.
- López-Martínez, J. y Freixes, A. (1989). *El karst en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Monografía, 4, 131-144.
- Luetscher, M., Bolius, D., Schwikowski, M., Schotterer, U. y Smart, P.L. (2007). *Journal of Glaciology*, 53, 374-384.
- May, B., Spötl, C., Wagenbach, D., Dublyansky, Y. y Liebl, J. (2011). *The Cryosphere*, 5, 81-93.
- Pèlachs, A., Julià, R., Pérez-Obiol, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Cunill, R. y Catalán, J. (2011). *The Holocene*, 21, 95-104.
- Stoffel, M., Luetscher, M., Bollschweiler, M. y Schlatter, F. (2009). *Quaternary Research*, 72, 16-26.
- Yonge, C.J. y MacDonald, W.D. (1999). *Boreas*, 28, 357-362.