

Interpretación y correlación de registros paleoclimáticos cuaternarios

Interpretation and correlation of Quaternary paleoclimatic records

MARIO MORELLÓN¹, ANA MORENO², JUANA VEGAS³, PILAR MATA³ Y BLAS VALERO-GARCÉS²

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Facultad de Ciencias, Universidad de Cantabria, Av. de los Castros s/n, 39005 Santander (Cantabria). E-mail: mario.morellon@unican.es

² Departamento de Procesos Geoambientales y Cambio Global, Instituto Pirenaico de Ecología – CSIC, Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza. E-mail: amoreno@ipe.csic.es; blas@ipe.csic.es

³ Departamento de Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas, 23, 28002, Madrid. E-mail: j.vegas@igme.es, p.mata@igme.es

Resumen El análisis multidisciplinar de archivos naturales de cambio climático (sondeos de hielo, sedimentos lacustres y marinos, espeleotemas, etc.) han permitido reconstruir las principales variaciones en la temperatura y las condiciones hidrológicas del planeta registradas a lo largo del período Cuaternario (últimos 2.58 millones de años). Muchas de estas reconstrucciones paleoclimáticas están disponibles en bases de datos de agencias gubernamentales y organizaciones científicas y constituyen un recurso didáctico excepcional para que el alumnado de Ciencias de la Tierra comprenda el alcance del Cambio Global actual en el contexto de la variabilidad climática natural y sus variaciones espacio-temporales. Esta actividad propone interpretar y comparar varias series de datos paleoclimáticos reales basadas en diferentes indicadores y recuperadas en distintas latitudes con la ayuda de gráficos sencillos y un cuestionario tipo.

Palabras clave: Archivos naturales, Cambio Global, Correlación, Cuaternario, Paleoclimatología.

Abstract *The multidisciplinary analysis of natural climate change archives (ice cores, lacustrine and marine sediments, speleothems, etc.) have allowed to reconstruct the main variations in temperature and hydrological conditions recorded during the Quaternary period (last 2.58 million years). Many of these reconstructions are available online in databases of government agencies and scientific organizations and constitute an exceptional didactic resource for Earth Sciences students in order to understand the extent of current Global Change in the context of natural climate variability and its spatial-temporal variations. This activity aims to interpret and compare several series of real paleoclimatic data based on different proxies and recovered at different latitudes, using simple plots graphic representations and a test.*

Keywords: *Natural archives, Global Change, correlation, Quaternary, Paleoclimatology.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La Paleoclimatología o estudio de los cambios climáticos ocurridos en la Tierra durante el pasado constituye una herramienta didáctica fundamental para proporcionar a los estudiantes de Ciencias de la Tierra una base científica adecuada que les permita comprender y valorar de una forma independiente la problemática actual del Cambio Global. Además, el estudio del clima en la historia de la Tierra y del Cuaternario en particular, aparece en el currículo oficial en la asignatura de Geología y Ciencias de la Tierra y del Medioambiente de 2º de Bachillerato. Por otro lado, es imprescindible conocer la llamada

“variabilidad climática natural” a diferentes escalas temporales y su impacto en el pasado en diferentes regiones para poder contextualizar la magnitud del cambio climático actual y valorar sus potenciales consecuencias a corto, medio y largo plazo en diferentes zonas del planeta.

La actividad propuesta consiste en interpretar y comparar series de datos paleoclimáticos reales, obtenidas a partir de una selección de los diferentes tipos de archivos naturales que se han descrito previamente en este monográfico sobre el Cuaternario (sondeos de hielo, espeleotemas, sedimentos marinos y lacustres, etc., Moreno et al., 2017). Las series propuestas se han obtenido en diferentes zonas del planeta, para obser-

var una variabilidad espacial suficiente, y el intervalo temporal de las series escogidas debe ser lo suficientemente extenso como para identificar varios ciclos desde el último periodo interglacial.

El primer objetivo es que el alumnado observe cómo los cambios climáticos reconstruidos operan a diferentes escalas temporales y siguen unos patrones de ciclicidad relacionados con las variaciones en la radiación solar recibida por la Tierra. En segundo lugar, la comparación simultánea de reconstrucciones paleoclimáticas, procedentes de diferentes latitudes, permite observar las variaciones espaciales de estas oscilaciones y ver cómo algunos de estos cambios son incluso opuestos durante un periodo concreto (ej. “bipolar see-saw”) (Blunier and Brook, 2001). Por último, otra finalidad importante de esta actividad consiste en identificar la/s variable/s climática/s (volumen de hielo, temperatura, precipitaciones) que nos proporcionan los diferentes tipos de archivos naturales a estudiar y la importancia de combinarlas para conseguir reconstruir, de la forma más completa posible, el clima del pasado. De forma complementaria, esta experiencia permitirá valorar el papel que juegan las corrientes oceánicas y atmosféricas en el transporte de calor y humedad en el planeta y la configuración del sistema climático. De hecho, la revista “Enseñanza de las Ciencias de la Tierra” ha publicado trabajos con experiencias complementarias a la que aquí se describe como Martín-Chivelet y Muñoz-García (2015).

MATERIAL NECESARIO

Las reconstrucciones paleoclimáticas pueden descargarse de forma sencilla y gratuita de diferentes bases de datos gestionadas por agencias gu-

bernamentales y organizaciones científicas. La más amplia y comúnmente utilizada es la de la “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA) de Estados Unidos, que alberga más de 1200 series de datos procedentes de diversas zonas del planeta: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data> (Fig. 1A). En la sección “Paleoclimatology Data” podemos encontrar varios buscadores que nos permitirán encontrar los registros atendiendo al tipo de archivo natural (“Paleoclimatology Datasets”) (Fig. 1B). Este buscador proporciona también un mapa interactivo o un archivo kmz (“paleo.kmz”) que puede abrirse con Google Earth® en el que encontraremos los registros representados en función del tipo de archivo natural. Alternativamente, podemos utilizar “Search All Paleoclimatology”, que permite encontrar cualquier registro introduciendo otros criterios en distintos campos de búsqueda (autor del registro, título de la publicación, latitud/longitud e intervalo temporal que cubre la serie) a través de la búsqueda avanzada (“Advanced Search”). Desde los buscadores de NOAA podemos acceder también a la base de datos proporcionada por “Pangaea” (<https://www.pangaea.de/>), que también alberga un gran número de registros paleoclimáticos.

Los archivos pueden descargarse en formato de texto (.txt) y pueden convertirse fácilmente a hojas de cálculo de Microsoft Excel o equivalente en software libre, desde las que podremos representar gráficamente los registros seleccionados para poder trabajar sobre las gráficas en el aula. Por último, se recomienda también proporcionar un cuestionario con una serie de preguntas sobre el significado de los cambios climáticos representados en las gráficas para llamar la atención del alumnado sobre aspectos concretos de los mismos (ver Tabla 1).

Fig. 1. A. Vista de la página web que alberga las bases de datos de registros paleoclimáticos de la “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA). B. Imagen del buscador general de estos registros.

A

NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION
NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION
Formerly the National Climatic Data Center (NCDC)... more about NCDC

Home Climate Information Data Access Customer Support Contact About

Home > Data Access > Paleoclimatology > Paleoclimatology Datasets

Many of our online systems will be unavailable on Saturday, September 10 from 8:00 AM - 10:00 AM ET. We apologize for this inconvenience.

Quick Links

- Land-Based Station
- Satellite
- Radar
- Model
- Weather Balloon
- Marine / Ocean
- Paleoclimatology
- Datasets
- Borehole
- Climate Forcing
- Climate Reconstruction
- Coral and Sclerosponge
- Fauna
- Fire History
- Historical
- Ice Core
- Insect
- Lake Level Reconstruction
- Loess and Eolian Dust
- Paleoclimate Modeling
- Lake
- Paleoceanography
- Plant Macrofossil
- Pollen
- Speleothem
- Tree Ring

Paleoclimatology Datasets

Borehole, Cave, Coral, Fauna, Fire History, Forcing, Historical, Ice Cores, Insect, Lake, Lake Levels, Loess, Paleo Modeling, Paleoccean, Plant Macros, Pollen, Reconstructions, Tree-ring

These links provide access to descriptive information and explanatory notes, maps, searches, visualizations, and more. The data cover the globe, and while most span the last few millennia, some datasets extend back in time 100 million years. Most of the data are time series of geophysical or biological measurements and some include reconstructed climate variables such as temperature and precipitation.

- Tools for All Profiles
 - Data Search: Access a free text search of our entire study archive.
 - Contributing Data: Read general information on contributing data to our archive.
 - Most Recent Contributions: Access a list of the most recent contributions to our archive.
 - Paleoclimatology Data Download Area: Download Paleoclimatology datasets from our FTP site.
 - Interactive Map: Select study locations by region, proximity to a point, or text-based attributes.
 - Google Earth File: Locate and download paleoclimatology studies using a Google Earth map interface. Google Earth must be installed to view this resource.

B

NOAA NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER
NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION

Home Climate Information Data Access Customer Support About NCDC

Home > Data Access > Paleoclimatology

Search All Paleoclimatology - Advanced Search

Use this form to limit your search by: Investigator, Archive, and more.
(Note: Please avoid using the browser "Refresh" and "Back" buttons as they may cause unexpected results.)

Additional Searches... (Search by: Recent Contributions, All Paleoclimatology, Proxy - Corals, Ice Cores, Tree Rings, etc.)

Archive: [NOAA-NDAC and Pangaea]

Note: The Investigator and Title fields can be searched using partial strings. Logical Operators, and wildcards such as "*" are NOT valid.

Investigator Last (Family Name): _____

Title: _____

Enter Latitudes and Longitudes to bound your search:

Northernmost: [90.00] Southernmost: [-90.00]
Westernmost: [-180.00] Easternmost: [180.00]

Enter Altitude values to bound your search (Enter negative values for altitudes below mean sea level.):

Minimum Altitude: _____ m Maximum Altitude: _____ m

Enter Years to bound your search (0 cal yr BP equals 1950AD, -60 cal yr BP equals 2010AD):

Earliest Year: _____ cal yr BP (Earliest Year in WDC Archive is 60000000 cal yr BP.)
Most Recent Year: _____ cal yr BP (Most Recent Year in WDC Archive is -60 cal yr BP.)

User defined bounds: Overlap any portion of matching datasets Are entirely overlapped by matching datasets Overlap entire matching datasets

Recent Contributions ... [Search] [Reset] [Help]

USA.gov
Ready
Department of Commerce > NOAA > NESDIS > NCDC

About NCEC
 Employment
 About NCDC
 Privacy
 FOIA
 Information Quality
 Disclaimer
 Department of Commerce
 NOAA
 NESDIS

Tabla 1. Ejemplo de cuestionario resuelto propuesto para esta experiencia que puede proporcionarse como orientación para interpretar y analizar los registros paleoclimáticos.

<p>¿Durante los últimos 120.000 años ha habido algún momento más cálido que el actual en la Tierra? De acuerdo con el sondeo de hielo NGRIP de Groenlandia y el sondeo marino MD95-240 de la Fig. 2, no se han dado condiciones tan cálidas o incluso más cálidas a las actuales desde hace 120.000 años, coincidiendo con el “estadio marino isotópico MIS 5e” o también denominado “interglaciario Eemiano”.</p>
<p>¿Crees que el clima de la Tierra puede cambiar rápidamente (acorde a la escala temporal para el Cuaternario, últimos 2,58 millones de años)? Señala algunos ejemplos en las gráficas y el sentido de los mismos (calentamiento o enfriamiento) Sí, en las gráficas de la Fig. 2 se aprecian numerosos eventos de cambio climático abrupto, especialmente en la tendencia del calentamiento, que se han producido en el transcurso de décadas y que son seguidos de una forma sistemática por enfriamientos más graduales de varios cientos de años, aproximadamente. Esta sucesión de calentamientos rápidos-enfriamientos progresivos se denominan “Ciclos de Dansgaard-Oeschger” (ciclos D-O)</p>
<p>¿Qué duración aproximada tienen los periodos cálidos y fríos que se observan en las gráficas? Los ciclos más cortos de enfriamiento-calentamiento, caracterizados por las terminaciones abruptas descritas en la respuesta anterior (ciclos D-O) tienen una duración aproximada de unos 1500 años, aunque algunos pueden extenderse algo más. Por encima de estos ciclos cortos podemos identificar periodos cálidos y fríos de una duración más variable (que se conocen como estadios isotópicos marinos, MIS por sus siglas en inglés), de entre 15.000 y 30.000 años de duración aproximadamente. Actualmente nos encontramos en un periodo cálido (Holoceno) que se denomina el MIS 1. Además podemos ver cómo las condiciones cálidas que experimenta el planeta en los últimos 11.800 años se produjeron también hace unos 120.000 años, por lo que podemos interpretar que este sería el ciclo cálido-frío de mayor duración que podemos encontrar y que correspondería a la alternancia entre periodos glaciares e interglaciares.</p>
<p>¿Cómo será el clima durante los próximos... 100, 1.000 y 10.000 años? Realizar una estimación del tipo de cambios esperados para cada escala temporal. De acuerdo con los ciclos y periodicidades observadas en las gráficas, se esperaría que, en condiciones naturales, el clima de nuestro planeta se enfriará gradualmente, con condiciones similares a las actuales durante los próximos 100 y 1000 años. En los próximos 100.000 años el planeta estaría en condiciones de tipo glacial (ciclo frío).</p>
<p>¿Son similares las variaciones climáticas representadas por los cuatro registros en diferentes zonas? Si es así, ¿qué registros “encajan más” y se pueden correlacionar entre sí? Los registros marinos y de hielo reproducen variaciones climáticas muy similares en cuanto a su periodicidad, intensidad y duración.</p>
<p>¿Existen diferencias significativas entre los dos sondeos de hielo recuperados en los polos norte (NGRIP) y sur (Byrd)? La correlación de los registros de la Antártida y Groenlandia muestra que hay una relación inversa entre las temperaturas de los dos polos. Después de que el calentamiento asociado al final de cada ciclo D-O se produce en Groenlandia, las temperaturas en la Antártida alcanzan su máximo (esto ocurre con un retraso de unos 200 o 300 años). Este retraso es importante porque indica que las temperaturas de ambos polos durante un ciclo D-O tienen una conexión oceánica, no atmosférica. Después, las temperaturas bajan simultáneamente en ambos polos, pero las temperaturas en la Antártida alcanzan su mínimo antes y comienzan a subir de nuevo en los dos polos para comenzar un nuevo ciclo.</p>
<p>¿Qué registro o registros reflejan cambios climáticos más globales y cuáles muestran cambios más locales? Los sondeos de hielo y marinos reflejan variaciones casi simultáneas y muy parecidas entre sí en cuanto a intensidad, duración y ciclicidad, y por lo tanto reflejan una señal climática más global, mientras que el registro continental del Lago de Monticchio reproduce este patrón a grandes rasgos pero presenta oscilaciones distintas si nos fijamos en periodos de tiempo más cortos, que corresponden a cambios más locales, ocurridos dentro del continente.</p>
<p>¿Crees que un solo registro puede reflejar todas las variaciones climáticas experimentadas por el planeta? No, como se deduce de las respuestas anteriores, necesitamos combinar varios registros para comprender el papel de las conexiones atmósfera - océano - continente en la transmisión de los cambios climáticos y las variaciones que se producen entre ellos y a diferentes latitudes.</p>
<p>En general, ¿con qué condiciones de precipitación (áridas o húmedas) coinciden los periodos glaciares e interglaciares en las latitudes medias? En general los periodos interglaciares (más cálidos) se corresponden con condiciones más húmedas y los periodos glaciares (más fríos) con una mayor aridez en zonas continentales de latitudes medias, de acuerdo con el registro del lago de Monticchio.</p>
<p>El registro del sondeo de Monticchio muestra la variación de las condiciones hidrológicas con los ciclos climáticos. ¿Con qué otro registro paleoclimático se correlaciona mejor? ¿Por qué crees que es así? Este registro continental se parece más al del sondeo NGRIP recuperado en Groenlandia, cerca del Polo Norte. Los cambios en las condiciones climáticas que se producen en Europa Occidental están fuertemente influenciados por variaciones en la intensidad de las corrientes marinas que se producen en el Atlántico Norte y éstas a su vez por el aumento o disminución en el volumen de hielo de los glaciares de Groenlandia. Así, las aguas frías y más densas de las zonas polares se hunden en un proceso llamado “formación de aguas profundas” y viajan en profundidad hacia el Atlántico Sur donde afloran hacia zonas más superficiales y vuelven hacia el norte transportando calor y humedad hacia Europa Occidental (Circulación Meridional de Retorno del Atlántico). Cuando se produce un calentamiento muy abrupto, la fusión repentina de grandes masas de hielo en Groenlandia aporta una gran cantidad de agua dulce en el sistema, disminuyendo la formación de aguas profundas y deteniendo durante un tiempo la Circulación Meridional de Retorno y con ella el transporte de calor y humedad a Europa Occidental, que puede llegar a provocar el retorno a condiciones frías de tipo glacial en el continente. Por este motivo, el clima en Europa está estrechamente relacionado con las condiciones en Groenlandia y el Atlántico Norte.</p>

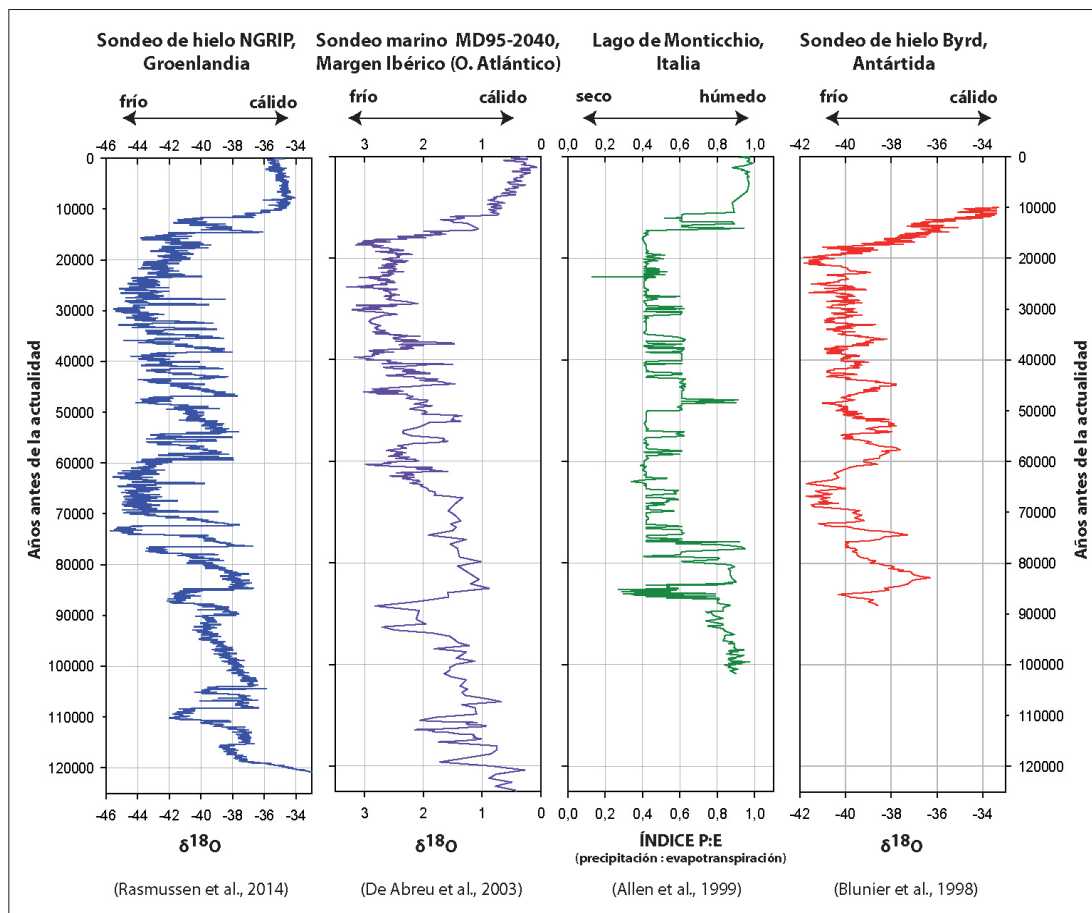


Fig. 2. Figura de correlación entre los registros paleoclimáticos a analizar y comparar en esta experiencia.

CONCEPTOS BÁSICOS NECESARIOS

Para el desarrollo de esta práctica es necesario que el alumnado posea previamente algunos conocimientos básicos sobre el estudio del clima de la Tierra, al nivel del currículo de la asignatura de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente de segundo curso de Bachillerato, que incluyen el estudio del clima en diferentes latitudes y el papel de las dinámicas atmosféricas y oceánicas en el mismo. En esta asignatura se aborda también la problemática del calentamiento global en el contexto de los cambios climáticos del Cuaternario (existencia de ciclos glaciares e interglaciares, tipos de archivos naturales de cambio climático disponibles), que pueden complementarse con el material expuesto en este monográfico. Las interpretaciones individuales de los indicadores para cada tipo de registro (como son los isótopos estables en sondeos de hielo y sondeos marinos, por ejemplo) y determinadas teleconexiones climáticas (monzones, “bipolar see-saw”) pueden requerir conocimientos algo más avanzados de geoquímica y climatología, que pueden completarse con el material didáctico gráfico proporcionado en libros específicos sobre docencia en Paleoclimatología (Ruddiman, 2001) y en otros trabajos específicos publicados en esta revista (Martín-Chivelet y Muñoz-García, 2015).

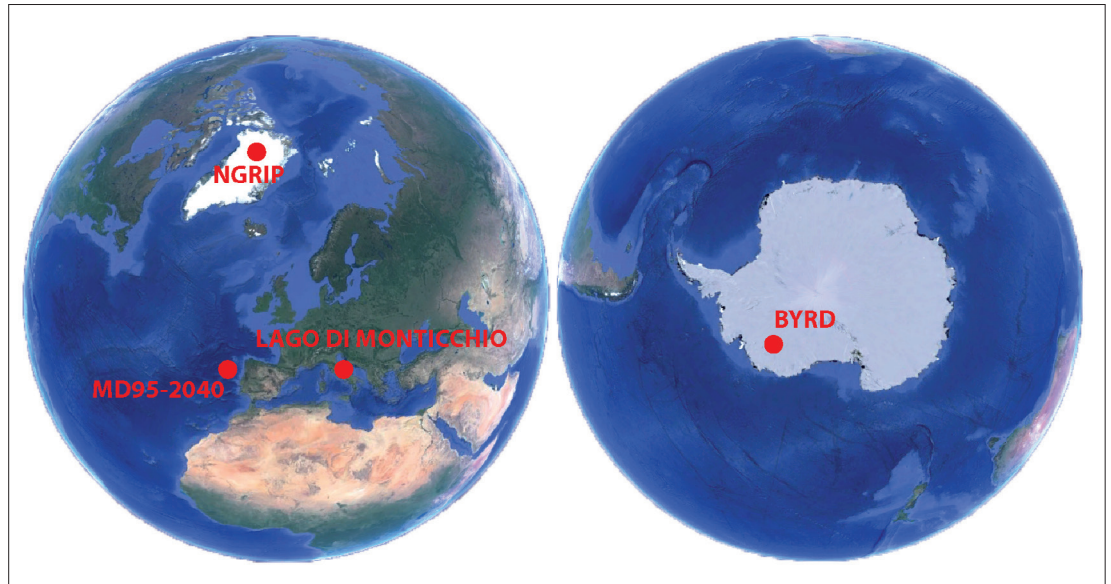
DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD

Esta actividad puede llevarse a cabo individualmente, en grupos o de forma simultánea por

todos los estudiantes de la clase. El personal docente proporcionará una serie de gráficas representando la escala temporal en el eje de ordenadas, situando el momento actual en la parte superior, y los diferentes “proxies” o indicadores de cada registro en el eje de abscisas. En función de los conocimientos previos de Paleoclimatología, se recomienda facilitar la interpretación de estos “proxies” completando las gráficas con etiquetas que indiquen su significado (ej., más cálido – más frío, más húmedo – más seco). También, es recomendable ordenar las gráficas proporcionadas en función de la localización de los mismos, por ejemplo a lo largo de un gradiente latitudinal o altitudinal, para facilitar las interpretaciones espaciales que se llevarán a cabo posteriormente y escoger registros con diferente extensión temporal y resolución para destacar la importancia de combinar diferentes tipos de archivos.

En la Fig. 2 se aporta un ejemplo del material que se puede proporcionar para el ejercicio. Se han seleccionado cuatro gráficas en total que representan cuatro registros paleoclimáticos, ordenados latitudinalmente de Norte (izquierda) a Sur (derecha): el sondeo de hielo de Groenlandia NGRIP (Rasmussen et al., 2008), el sondeo marino MD95-2040 en el margen ibérico (de Abreu et al., 2003), el registro de polen del Lago de Monticchio en Italia (Allen et al., 1999), y por último el sondeo de hielo Byrd recuperado en la Antártida (Blunier and Brook, 2001). El intervalo temporal seleccionado es 0 – 120.000 años de calendario antes de la actualidad. Se recomienda también proporcionar

Fig. 3. Situación de los registros paleoclimáticos a analizar y correlacionar en esta experiencia.



un mapa con la localización de los registros a interpretar (Fig. 3).

A continuación, se entregará al alumnado un cuestionario (Tabla I) con preguntas para dirigir su atención hacia aspectos concretos de las gráficas, relacionados tanto con la interpretación individual de cada registro como de las relaciones espacio-temporales que pueden inferirse entre ellos. Entre las cuestiones que se recomiendan incluir destacan las siguientes: i) preguntas dirigidas a la comparación entre la temperatura actual y la máxima equivalente más reciente y si el ritmo de calentamiento actual es equivalente a otros registrados en el pasado, para ayudar los participantes a valorar la magnitud del cambio climático actual (preguntas 1-2); ii) cuestiones sobre ciclicidades registradas en el pasado y su proyección hacia el futuro (preguntas 3-4); iii) preguntas sobre la variabilidad espacial de los cambios climáticos y la diferente respuesta al mismo de los diferentes tipos de registros (preguntas 5-10).

CONCLUSIONES

La correlación de series de datos paleoclimáticos cuaternarios de diferentes registros y zonas geográficas permite reconstruir la magnitud y frecuencia de los principales cambios experimentados en el planeta y su variabilidad temporal y espacial. Este ejercicio permite al alumnado valorar la magnitud y rapidez del calentamiento global actual y contextualizar estos cambios en el marco de la variabilidad climática natural. La actividad propuesta permite conocer el tipo de información proporcionada por cada tipo de archivo natural y la importancia de combinarlos para comprender los cambios climáticos del pasado.

AGRADECIMIENTOS

Esta actividad se ha desarrollado en el marco de los proyectos de investigación HYVARMED

CGL2013-42645-P y OPERA CTM2013-48639-C2-1-R, financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad, CLAM 533S/2012 (Organismo Autónomo de Parques Naturales), y SINGER IGME-2419 (Instituto Geológico y Minero de España). Los autores agradecen las sugerencias y comentarios de la editora adjunta de esta revista, Esperanza Fernández.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, J.R.M., Brandt, U., Brauer, A., Hubbertens, H., Huntley, B., Keller, J., Kraml, M., Mackensen, A., Mingram, J., Negendank, J.F.W., Nowaczyk, N.R., Oberhänsli, H., Watts, W.A., Wulf, S., Zolitschka, B. (1999). Rapid environmental changes in southern Europe during the last glacial period. *Nature*, 400, 740-743.
- Blunier, T. y Brook, E.J. (2001). Timing of Millennial-Scale Climate Change in Antarctica and Greenland During the Last Glacial Period. *Science*, 291, 109-112.
- de Abreu, L., Shackleton, N.J., Schönfeld, J., Hall, M.A., Chapman, M.R. (2003). Millennial-scale oceanic climate variability off the Western Iberian margin during the last two glacial periods. *Marine Geology*, 196, 1-20.
- Martín-Chivelet, J. y Muñoz-García, M.B. (2015). Estratigrafía de isótopos de oxígeno y la reconstrucción de los cambios climáticos del pasado. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23(2), 160-170.
- Moreno, A., Colmenero, E., Morellón, M., Valero, B., Mata, P. (2017). Descifrando el clima de los últimos 2,58 Ma. ¿Cómo, dónde y por qué? Registros Continentales y Marinos. *Enseñanza de Ciencias de la tierra*, en prensa.
- Rasmussen, S.O., Seierstad, I.K., Andersen, K.K., Biegler, M., Dahl-Jensen, D., Johnsen, S.J. (2008). Synchronization of the NGRIP, GRIP, and GISP2 ice cores across MIS 2 and palaeoclimatic implications. *Quaternary Science Reviews*, 27, 18-28.
- Ruddiman, W.F. (2001). *Earth's climate past and future*. Freeman and Company, New York (USA). ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 15 de septiembre de 2016 y aceptado definitivamente para su publicación el 2 de diciembre de 2016.