

Evolución térmica de distintas masas de agua a lo largo del estadio isotópico marino 7 basada en el Mg/Ca de la concha de los foraminíferos planctónicos

Thermal evolution of different water masses during Marine Isotope Stage 7 based on planktonic foraminifer shell Mg/Ca

Beatriz González-Mora y Francisco Javier Sierra

Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. Plaza de la Merced, s/n. 37008 Salamanca. mora@usal.es, sierra@usal.es.

ABSTRACT

Mg/Ca measurements have been performed on tests from the planktonic foraminifers *Globigerinoides ruber* (white) and *Globigerina bulloides* in samples from ODP site 977A in the Alboran Sea (Western Mediterranean) in order to estimate their calcification temperatures between 250 and 190 ka and therefore, analyse the evolution of different water masses in the Alboran Sea during that time. The results obtained are similar to the sea surface temperatures estimated by other methods in previous studies carried out in the same core. All substages in marine isotope stage 7 are well defined in the paleotemperature estimates, excepting substage 7.2 which is not recognized in *Globigerina bulloides*. Warm substages were characterized by strong seasonality and thermal stratification of the water column. By contrast, less pronounced seasonality and basin stratification seem to have prevailed during cold substages.

Key words: Mg/Ca paleothermometry, Planktonic foraminifers, Geochemistry, Alboran Sea, Marine Isotope Stage 7.

Geogaceta, 45 (2008), 91-94
ISSN: 0213683X

Introducción

La temperatura es uno de los parámetros que controlan la densidad de las masas de agua y, por lo tanto, su movimiento. Por este motivo, la estimación de las paleotemperaturas del agua superficial en un área determinada es muy importante para la reconstrucción de las corrientes que afectaron a esa zona.

La paleotermometría basada en la relación Mg/Ca de la concha de diferentes organismos carbonatados es una técnica muy reciente utilizada para estimar temperaturas de calcificación de dichos organismos, ya que la incorporación de Mg²⁺ en la concha de determinados organismos está condicionada por la temperatura del agua en la que vivió el individuo, de forma que la relación Mg/Ca de la concha aumenta al aumentar la temperatura del agua (Chave, 1954).

Una de las ventajas principales de este método es que, aplicado en muestras mono-específicas, puede proporcionar información sobre la temperatura del agua a diferentes profundidades dentro de la columna de agua, dependiendo de la ecología de la especie utilizada, e incluso en diferentes situaciones oceanográficas,

ya que los análisis se pueden realizar en especies más o menos superficiales, en especies características de zonas de *upwelling*, en especies que proliferan en situaciones oligotróficas, etc.

El mar de Alborán es la cuenca más occidental del Mediterráneo; la primera que recibe las aguas atlánticas y, por eso, la que mayor influencia atlántica tiene. Está situada entre las costas españolas de Cádiz, Málaga y Almería, y el norte de África, y se conecta con el Atlántico a través del estrecho de Gibraltar, que tiene unos 15 km de ancho, abriéndose al resto del Mediterráneo hacia el este. Esta cuenca posee la mayor acumulación de depósitos neógenos y cuaternarios de todo el Mediterráneo Occidental (Comas *et al.*, 1996) y la topografía del fondo es bastante compleja, con varias subcuencas, crestas y *seamounts* debido a los continuos episodios tectónicos que ha sufrido.

En esta cuenca se distribuyen verticalmente tres masas de agua cuyo patrón de circulación está fuertemente controlado por el intercambio de aguas que se produce en el estrecho de Gibraltar (Millot, 1999). Los 220 metros más superficiales corresponden al Agua Atlántica Modificada, que fluye hacia el este a través del

mar de Alborán, aumentando su espesor en la parte más meridional. Esta masa de agua va siendo modificada en su camino hacia el este debido a la mezcla de aguas y al intercambio de calor con la atmósfera. Se caracteriza por su baja temperatura y su baja salinidad. Entre los 220 y los 1100 m se encuentran el Agua Intermedia Levantina, parcialmente modificada a lo largo de su recorrido desde su formación en la cuenca oriental, y el Agua Densa del Tirreno. Estas aguas intermedias son la componente principal del Agua Saliente Mediterránea (*Mediterranean Outflow Water*) que, una vez en océano abierto, se extiende hacia el norte y el oeste, llegando incluso al mar de Noruega y al Caribe, en forma de lentes de agua cálida y salina a profundidades entre los 600 y los 2500 m.

Las aguas atlánticas al entrar en el mar de Alborán describen un giro anticiclónico casi permanente en la cuenca occidental y un circuito menos estable en la parte oriental, pero que normalmente es también anticiclónico (Parrilla y Kinder, 1987). En general, la persistencia, posición media, intensidad y forma de estos giros está determinada por la coexistencia y mezcla de las aguas atlánti-

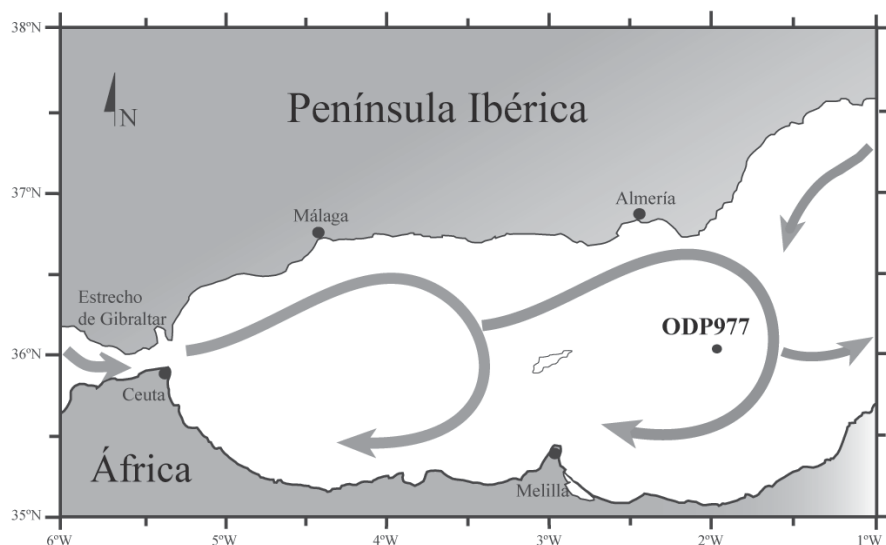


Fig. 1.- Situación del sondeo ODP977 ($36^{\circ} 01.907' N$, $1^{\circ} 57.319' W$) en el mar de Alborán (Mediterráneo occidental) y esquema de la circulación oceánica superficial (Parrilla y Kinder, 1987).

Fig. 1.- Location of core ODP site 977 ($36^{\circ} 01.907' N$, $1^{\circ} 57.319' W$) in the Alboran Sea (Western Mediterranean) and scheme of the oceanic surface circulation (Parrilla and Kinder, 1987).

cas y mediterráneas, las variaciones en el intercambio de aguas en el estrecho de Gibraltar, la topografía y el efecto de rotación de la Tierra (Heburn y La Violette, 1990).

Material y métodos

Las muestras estudiadas pertenecen al sondeo ODP977, extraído en la cuenca oriental de Alborán al sur del Cabo de Gata, a mitad de camino entre las costas española y argelina, a una profundidad de 1984 m, durante la expedición 161 del *Ocean Drilling Program* en 1996 (Fig. 1). Se ha realizado un muestreo sistemático de alta resolución (5 cm) con el fin de observar la evolución de la temperatura a diferentes profundidades dentro de la columna de agua a lo largo del estadio isotópico marino 7.

En cada muestra se separaron unos 15 gramos de sedimento seco que se lavaron con un tamiz de 63 μm de luz de malla, despreciando la fracción menor. A continuación, se secaron las muestras en la estufa y se separaron en dos fracciones, utilizando un tamiz de 150 μm . Se han separado 40 individuos en cada muestra dentro de la fracción de 250-300 μm , 20 de los cuales pertenecían a la especie *Globigerinoides ruber* (alba), mientras los otros 20 correspondían a la especie *Globigerina bulloides*. Todas las muestras han sido limpiadas inicialmente con peróxido de hidrógeno, metanol y ultrasonidos. Posteriormente, las cámaras de las diferentes conchas fueron fragmentadas con la ayuda de dos placas de vidrio

de forma que la limpieza posterior fuera más efectiva.

El protocolo de limpieza utilizado antes del análisis fue el de Barker *et al.* (2003) que consiste en hacer una extracción repetida de arcillas con agua ultrapura desionizada, disolver la materia orgánica con 250 ml de una solución de H_2O_2 al 1% tamponada con un compuesto alcalino, extraer las partículas extrañas con un pincel y una lupa binocular, lavar en ácido con 250 ml de HNO_3 0,001M para eliminar restos de los compuestos utilizados en la limpieza y, justo antes de analizar las muestras en el espectrómetro, disolver éstas en HNO_3 0,075M, centrifugarlas y transferirlas a viales limpios.

La concentración existente en cada muestra tras su limpieza y disolución se modificó de forma que la concentración de Ca^{2+} fuera de aproximadamente 60 ppm. La calibración de la intensidad fue realizada siguiendo lo establecido por De Villiers *et al.* (2002) con el fin de limitar el «efecto matriz» en los análisis posteriores. El análisis de los elementos menores fue realizado con *Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry* (ICP-AES; Varian Vista AX CCD *simultaneous*) en la Universidad de Cambridge según se describe en De Villiers *et al.* (2002).

El modelo de edad utilizado es el elaborado por Martrat *et al.* (2004). Para su elaboración se correlacionó la curva $\delta^{18}O_{G.bulloides}$ del sondeo ODP977 con la curva normalizada de Martinson *et al.* (1987) reconociendo un total de seis ni-

veles de referencia (*pointers*) que coinciden con máximos, mínimos o puntos de cambio de tendencia en ambas curvas.

Ecología de las especies

Globigerinoides ruber (alba) es una especie espinosa con simbiontes que prolifera en aguas cálidas oligotróficas, habitualmente estratificadas (Bé, 1977). Es una especie que habita en las aguas superficiales (primeros 50 m de la columna de agua). En el mar de Alborán es más abundante hacia finales de verano.

Globigerina bulloides es una especie espinosa sin simbiontes, característica de situaciones de *upwelling*, que suele indicar periodos de alta fertilidad. Se desarrolla mejor a 50-100 m de profundidad, aunque puede encontrarse a mayor profundidad ya que no está restringida a la zona fótica al no poseer simbiontes (Hemleben *et al.*, 1989). En el mar de Alborán esta especie presenta mayor abundancia relativa en primavera-verano.

Resultados

Según el modelo de edad utilizado, el tramo estudiado comprende el intervalo entre 245 y 120 ka, es decir, el estadio isotópico marino (*Marine Isotope Stage*, MIS) 7.

Uno de los inconvenientes de este método de estimación de paleotemperaturas es la disolución que ha podido afectar a las muestras, ya que la calcita con mayor relación Mg/Ca es más sensible a la disolución. Por lo tanto, si las muestras están parcialmente disueltas, el valor de la relación Mg/Ca será más bajo que el inicial y habrá una subestimación de la temperatura de calcificación de los organismos.

En este caso, las muestras no han sufrido disolución importante ya que varios periodos con alto índice de fragmentación coinciden con intervalos en los que las conchas son muy pesadas, lo contrario de lo que debería suceder si la disolución hubiera afectado a las muestras de forma significativa.

Por otro lado, el segundo problema de este método es la persistencia de minerales secundarios (contaminación) o arcillas tras la limpieza de las muestras, lo que podría causar una sobreestimación de los resultados. Para evaluar el posible nivel de contaminación existente en las muestras utilizadas se comparó la relación Mg/Ca con los valores de Al/Ca, Fe/Ca y Mn/Ca, los cuales indican presencia de arcillas y/o minerales autígenicos, que habitualmente incluyen Mg en su compo-

sición, pero no se observó ningún tipo de correlación entre dichas relaciones, lo que implica que la pequeña contaminación persistente en las muestras no controla las variaciones en la relación Mg/Ca de las muestras estudiadas.

Para la estimación de paleotemperaturas mediante este método se utilizan ecuaciones de calibración basadas en muestras actuales. En el mar de Alborán se han recogido muy pocas muestras superficiales por lo que no es posible obtener una buena calibración regional Mg/Ca-temperatura para las especies que se han utilizado en este trabajo. Por este motivo, hemos tenido que utilizar ecuaciones de calibración definidas en otras áreas en estudios anteriores. En el caso de *Globigerina bulloides*, hemos utilizado la ecuación específica de Elderfield y Ganssen (2000), basada en *core tops* recogidos en un transecto del Atlántico Norte (32-62°N). Hemos elegido esta ecuación porque el mar de Alborán es una cuenca que durante gran parte del Pleistoceno ha tenido una gran influencia de las aguas nortatlánticas. Por otro lado, para la especie *Globigerinoides ruber* (alba) se ha utilizado la ecuación de Anand *et al.* (2003) (asumiendo A constante, 250-350 m). Esta calibración fue realizada con sedimentos de trampas colocadas durante 6 años en el mar de los Sargazos, cuyo rango de temperaturas (18 a 26°C) es parecido al de la capa de mezcla de verano del mar de Alborán, donde prolifera *Globigerinoides ruber* (alba).

La razón por la que existen intervalos en los que no se han realizado análisis en la especie *Globigerinoides ruber* (alba) es que, al tratarse de una especie templado-cálida, su abundancia durante determinados periodos fríos disminuye considerablemente y no es posible encontrar en las muestras individuos suficientes como para llevar a cabo la medición de la relación Mg/Ca en las conchas.

El patrón descrito por las temperaturas de calcificación estimadas para *Globigerinoides ruber* (alba) y *Globigerina bulloides* a lo largo del periodo estudiado presenta ciertos rasgos similares, principalmente la tendencia seguida por ambas curvas cuyos máximos de temperatura se registran al principio de los subestadios cálidos 7.5 y 7.3, que paulatinamente descienden hasta alcanzar los valores más bajos durante los subestadios fríos 7.4 y 7.2. Durante el subestadio cálido 7.1, la similitud entre ambos patrones no es tan clara, ya que en *Globigerinoides ruber* (alba), las mayores temperaturas se registran hacia la mitad del subestadio, mientras en *Globigerina bulloides* la tem-

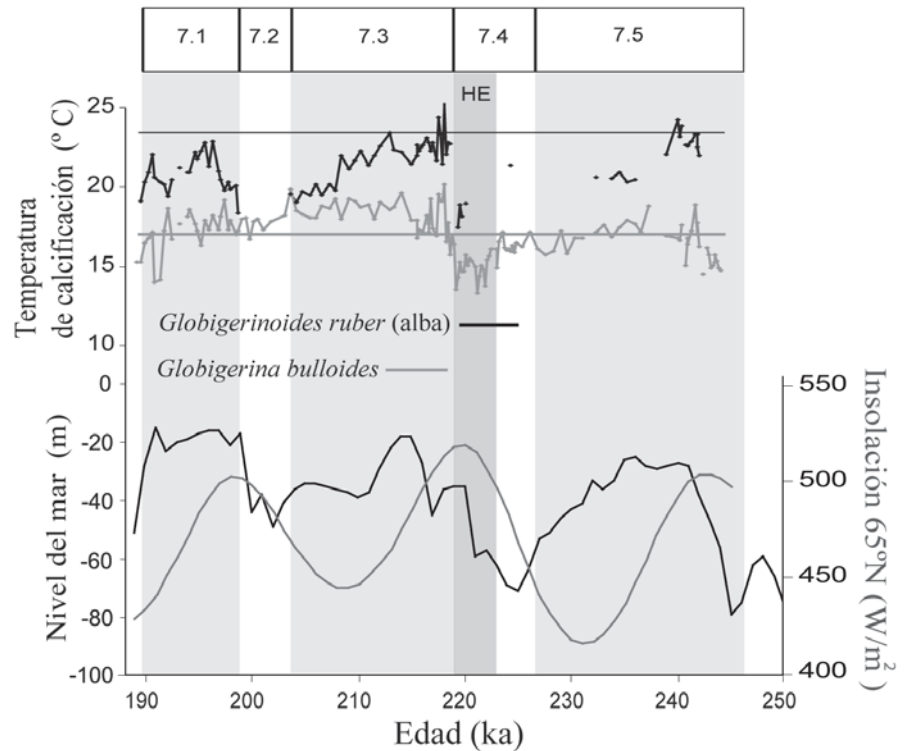


Fig. 2.- Evolución de paleotemperaturas en el mar de Alborán durante el estadio isotópico marino 7 basada en la relación Mg/Ca medida en la concha de *Globigerina bulloides* y *Globigerinoides ruber* (alba), comparada con la curva del nivel del mar (Shackleton, 2000) y la insolación de verano en el Hemisferio Norte (65°N).

*Fig. 2.- Evolution of paleotemperatures in the Alboran Sea during marine isotope stage 7 based on Mg/Ca ratio in shells of *Globigerina bulloides* and *Globigerinoides ruber* (alba), compared with sea-level curve (Shackleton, 2000) and Northern Hemisphere summer insolation (65°N).*

peratura de calcificación se mantiene prácticamente constante desde el final del subestadio 7.3 hasta el final del 7.1.

Existen otras diferencias claras entre los registros de ambas especies. La más significativa es el rango de temperatura de calcificación de cada especie, de forma que en el caso de *Globigerinoides ruber* (alba) el rango de temperaturas observado a lo largo del MIS 7 es de 17,4 a 25,3 °C, casi 8 °C de amplitud térmica. Hay que tener en cuenta que este rango de temperaturas es menor que el real puesto que las medidas de Mg/Ca de esta especie se reducen a los intervalos cálidos. Por el contrario, el rango de temperatura de calcificación de *Globigerina bulloides* está entre 13 y 20°C, por lo tanto, la amplitud térmica de esta especie es de 7 grados a lo largo del MIS7. De esta observación se obtiene que la especie más superficial, *Globigerinoides ruber* (alba), calcifica dentro de un rango mayor de temperatura del agua.

En los registros de ambas especies se distinguen los diferentes subestadios isotópicos, salvo en el caso del subestadio frío 7.2, en el que *Globigerina bulloides* no registra descenso en la temperatura del agua sino que la temperatura de calcifica-

ción permanece alrededor de 17 °C desde la parte final del subestadio 7.3 hasta prácticamente todo el subestadio 7.1. Por otro lado, durante los periodos cálidos, la temperatura de calcificación registrada por *Globigerina bulloides* es estable, mientras en *Globigerinoides ruber* (alba) ésta disminuye paulatinamente a medida que avanza el subestadio.

Las paleotemperaturas obtenidas a partir de estas dos especies durante los subestadios cálidos son muy similares al registro de temperatura del agua superficial basado en las alquenonas para el mismo sondeo (Martrat *et al.*, 2004), especialmente en el caso de *Globigerinoides ruber* (alba).

Interpretación

En este tipo de estudios cada especie registra las variaciones de temperatura a lo largo del tiempo de la masa de agua en la que se desarrolla. Por lo tanto, la masa de agua más cálida es aquella en la que prolifera *Globigerinoides ruber* (alba), que se corresponde con la capa de mezcla de verano según Pujol y Vergnaud-Grazzini (1995). Este estudio sugiere que las aguas superficiales del mar de

Alborán se encontraron a mayor temperatura que en la actualidad (línea negra en fig.2) al comienzo de los subestadios isotópicos 7.5 y 7.3. La gran amplitud térmica observada en esta especie se debe al hecho de que la capa de mezcla de verano en la que habita es muy delgada y cualquier pequeño aumento en las precipitaciones o anomalía térmica causaría un gran impacto en ella, en comparación con otras masas de agua de mayor espesor. El máximo en la temperatura de calcificación de esta especie se registra tras el máximo de insolación de verano en el Hemisferio Norte con un desfase de 1-4 ka, coincidiendo con el máximo interglacial.

Por otro lado, *Globigerina bulloides* presenta menor variabilidad que *Globigerinoides ruber*, aunque el patrón general es parecido. La masa de agua registrada por *Globigerina bulloides* es una mezcla entre la capa superficial de final de primavera/principio de verano y las aguas más profundas que ascienden hasta niveles más superficiales (50-100 m) durante esos meses (Hernández-Almeida *et al.*, 2005). En el registro obtenido en este estudio, el rasgo más significativo de *Globigerina bulloides* es el pequeño rango de temperatura observado; incluso los subestadios 7.3, 7.2 y 7.1 no se distinguen. Este hecho es debido probablemente a que *Globigerina bulloides* es una especie estenotópica (Skinner y Elderfield, 2005), lo que significa que selecciona mucho su hábitat y ante condiciones menos favorables podría haber migrado dentro de la columna de agua buscando condiciones más óptimas para su crecimiento. Otra hipótesis para la estabilidad observada durante el subestadio 7.2 podría ser el desplazamiento de las situaciones de *upwelling* a meses más cálidos coincidiendo con ese periodo. La razón por la que en el subestadio 7.4 no ocurre lo mismo en el registro de esta especie es que, en esos momentos, tuvo lugar un posible evento Heinrich en el Hemisferio Norte (Gonzalez-Mora *et al.*, 2008), caracterizado por un enfriamiento muy acusado de las aguas, que no permitió a *Globigerina bulloides* encontrar zonas con temperaturas más óptimas, viéndose obligada a desarrollarse bajo esas condiciones de frío extremo.

Si comparamos ambos registros, se observa un gradiente entre ambas especies que puede ser relacionado con la estacionalidad de las aguas. Los mayores gradientes indican momentos de estacionalidad más marcada que tuvieron

lugar justo después del máximo de insolación de verano en el Hemisferio Norte. Este gradiente fue disminuyendo gradualmente hasta el final de los subestadios cálidos, cuando alcanzó los valores más bajos, de forma que en estos momentos la temperatura del agua en mayo y a finales de verano eran prácticamente iguales. Durante los periodos de mayor estacionalidad, la existencia de una capa de mezcla de verano más cálida podría provocar una estratificación de la columna de agua relativamente intensa durante parte del año, mientras en los periodos con estacionalidad menos marcada, la capa de mezcla de verano alcanzaría temperaturas más bajas y causaría menor estratificación en la columna de agua durante un corto periodo del año.

Conclusiones

Este trabajo confirma la utilidad de la paleotermometría de Mg/Ca aplicada en foraminíferos planctónicos para caracterizar diferentes masas de agua.

Parece que las dos especies de foraminíferos planctónicos utilizadas, *Globigerinoides ruber* (alba) y *Globigerina bulloides* han mantenido su hábitat a lo largo del tiempo, al menos durante los últimos 250 ka.

El registro obtenido sugiere que hubo periodos con mayor estacionalidad en el mar de Alborán en los que pudo existir mayor estratificación de la columna de agua pocos ka después de los máximos de insolación de verano en el Hemisferio Norte registrados durante el MIS7. Esta situación fue cambiando gradualmente hasta llegar a un momento en el que el calentamiento de las aguas superficiales durante el verano era considerablemente menor, de forma que la estratificación estacional fue mucho más débil.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos GRACCIE (CONSOLIDER-INGENIO CSD 2007-00067), CGL 2005-00642/BTE, CGL2008-05560 y REN 2003-08642-CO2/CLI del Ministerio de Educación y Ciencia, por el proyecto GR34 financiado por la Junta de Castilla y León, y por la beca FPU del Ministerio de Educación y Ciencia concedida a Beatriz González Mora (AP20033094). Agradecimientos al *Integrated Ocean Drilling Program* por haber proporcionado las muestras.

Referencias

- Anand, P., H. Elderfield, y M.H. Conte, (2003). *Paleoceanography* 18, 10.1029/2002PA00846.
- Barker, S., Greaves, M. y Elderfield, H. (2003). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4, 8407, doi:10.1029/2003GC000559.
- Bé, A.W.H., (1977). *Oceanic Micropaleontology Vol. I*, Academic Press, 360 p.
- Chave, K.E. (1954). *Journal of Geology*, 62, 266-283.
- Comas, M.C., Zahn, R., Klaus, A., *et al.* 1996. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, 161: College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- De Villiers, S., Graves, M. y Elderfield, H. (2002). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3, doi:10.1029/2001GC000169.
- Elderfield, H. y Ganssen, G. (2000). *Nature*, 405, 442-445.
- Gonzalez-Mora, B., Sierro, F.J. y Schönfeld, J. (2008). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9, Q10016, doi:10.1029/2007GC001906.
- Heburn, G. W. y La Violette, P. E. (1990). *Journal of Geophysical Research*, 95, 1599-1613.
- Hemleben, C.H., Spindler, M. y Anderson, O.R. (1989). *Modern Planktonic Foraminifera*. Springer-Verlag New York Inc., 365 p.
- Hernández-Almeida, I., M.A. Bárcena, F.J. Sierro, J.A. Flores, y A. Calafat, (2005). *Geogaceta*, 38, 183-186.
- Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., Imbrie, J., Moore, T. C. y Shackleton, N. J. (1987). *Quaternary Research*, 27, 1-29.
- Martrat, B., Grimalt, J. O., Lopez-Martinez, C., Cacho, I., Sierro, F. J., Flores, J. A., Zahn, R., Canals, M., Curtis, J. H. y Hodell, D. A. (2004). *Science*, 306, 1762-1765.
- Millot, C. (1999). *Journal of Marine Systems*, 20, 423-442.
- Parrilla, G. y Kinder, T. H. (1987). *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 4, 133-165.
- Pujol, C. y Vergnaud-Grazzini, C. (1995). *Marine Micropaleontology*, 25, 187-217.
- Shackleton, N. J., (2000). *Science*, 289, 1897 - 1902.
- Skinner, L. C., y Elderfield, H., (2005). *Paleoceanography*, 20, PA1015, DOI:10.1029/2004PA001058.