

LA CRISIS DE SALINIDAD DEL MESSINIENSE

The Messinian salinity crisis

Jesús Miguel Soria (*)

RESUMEN

La crisis de salinidad del Messiniense es un acontecimiento mayor en la evolución del Mediterráneo que se caracteriza por la precipitación de evaporitas tanto en sus llanuras abisales como en las cuencas marginales. Las evaporitas están compuestas principalmente por yeso, anhidrita y halita, indicando unas condiciones de depósito marinas extremadamente someras. A raíz del hallazgo de evaporitas en las llanuras abisales se derivó la hipótesis de cuenca profunda desecada, según la cual durante el Messiniense se produjo una caída del nivel del mar de más de 1500 metros. Como consecuencia de tal descenso del nivel del mar en el Mediterráneo se excavaron profundos cañones erosivos en sus márgenes, en coincidencia con los principales sistemas de drenaje (ríos Ródano y Nilo). La crisis de salinidad tuvo su origen por el cierre de las vías marinas (pasillos Bético y Rifeño) que comunicaban el Mediterráneo y el Atlántico. La edad del inicio de la crisis, cuando comienza la precipitación de las evaporitas, se ha establecido en torno a los 5.9 millones de años. La crisis termina definitivamente con la reinundación del Mediterráneo a la base del Plioceno, cuya causa fue la apertura de una nueva vía marina (el Estrecho de Gibraltar) que no existía ni durante ni anteriormente a la crisis de salinidad.

ABSTRACT

The Messinian salinity crisis is a major event during the Mediterranean evolution, and is characterized by evaporite precipitation, both in the abyssal Mediterranean plains as well as in the marginal basins. The evaporites are mainly composed of gypsum, anhydrite and halite, reflecting an extremely shallow-marine depositional context. The discovery of evaporites in the abyssal plains gave way to the proposal of the desiccated deep basin hypothesis, which considers a sea-level fall, at least of 1500 metres, during the Messinian. As a consequence of such a sea-level fall in the Mediterranean, deep erosional canyons were carved in its margins, coinciding with the main drainage systems (Rhône and Nile rivers). The origin of the salinity crisis was the closure of the seaways (Betic and Rif corridors) connecting the Atlantic and Mediterranean domains. The age of the onset of the crisis, when the first evaporites precipitated, has been established at ca. 5.9 Ma. The crisis ended definitively when the Mediterranean was reflooded at the base of Pliocene. The cause of this event was the opening of a new seaway (Gibraltar Strait), which was originated after the salinity crisis.

Palabras clave: Messiniense, crisis de salinidad, Mediterráneo.

Keyword: Messinian, salinity crisis, Mediterranean.

INTRODUCCIÓN

El 13 de octubre de 1970 estaba prevista la partida del buque oceanográfico Glomar Challenger desde el puerto de Lisboa. Se iniciaba la campaña de geología marina conocida como Leg 13 (Ryan *et al.*, 1973), realizada en el marco del Deep Sea Drilling Project, para investigar el subsuelo marino del Mediterráneo. La superstición de la marinería no escapó a la coincidencia de partir un día 13 para hacer una campaña denominada Leg 13, teniendo en la memoria el cercano desastre del Apolo 13. Fue por ello que el Glomar Challenger salió de puerto en la madrugada del día 14 de octubre para iniciar una aventura científica que terminó con uno de los hallazgos más fascinantes de la geología marina hasta el momento. Fue el descubrimiento de evaporitas en el subsuelo de las llanuras abisales del Mediterráneo.

El Glomar Challenger es un buque de perforación de 11000 toneladas (Fig. 1). En los años 70 era el único capaz de penetrar 1000 metros de fondo en 6000 metros de agua. Iba dotado de un sistema de posicionamiento dinámico que le permitía permanecer estable durante la perforación, además de estar localizado vía satélite. En definitiva, era el buque más avanzado para hacer un sondeo profundo en el fondo marino.

A bordo del Glomar Challenger el equipo científico estaba liderado por Kenneth J. Hsü (un polifacético geólogo de Zurich) y William B. Ryan (geofísico de Nueva York). Junto a éstos participaron otros investigadores, entre los cuales se encontraban Wladimir Nesteroff, un sedimentólogo de la Sorbona, y Maria B. Cita, especialista en micropaleontología de Universidad de Milán. Todos estos

(*) Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante, Apdo. Correos 99, 03080 Alicante

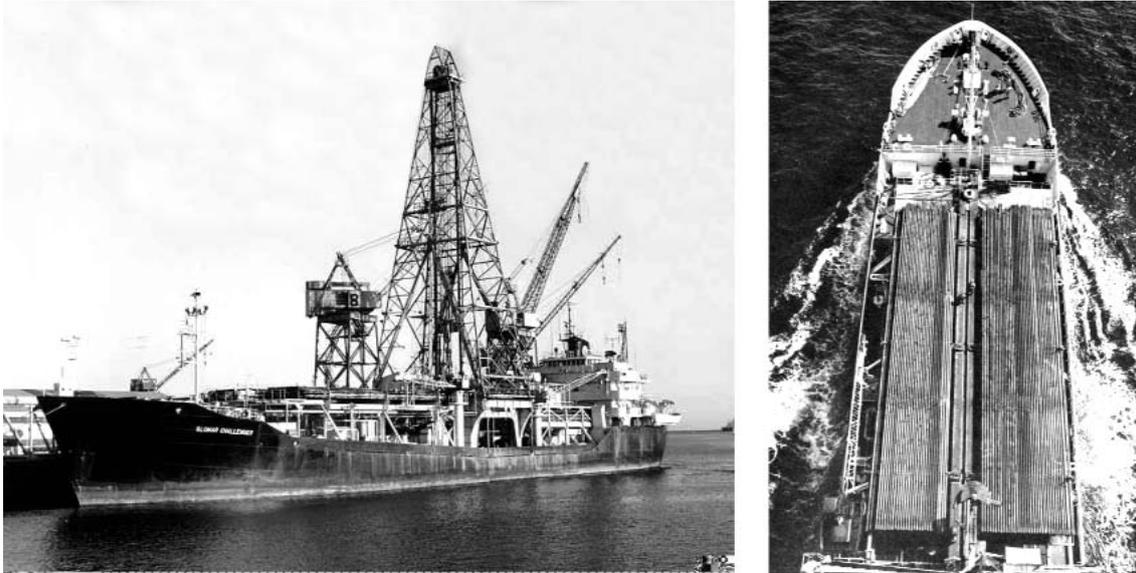


Fig. 1. El buque oceanográfico Glomar Challenger, con el cual se perforaron por primera vez las evaporitas del Messiniense en las llanuras abisales del Mediterráneo. (Fotografías tomadas de Hsü, 1983).

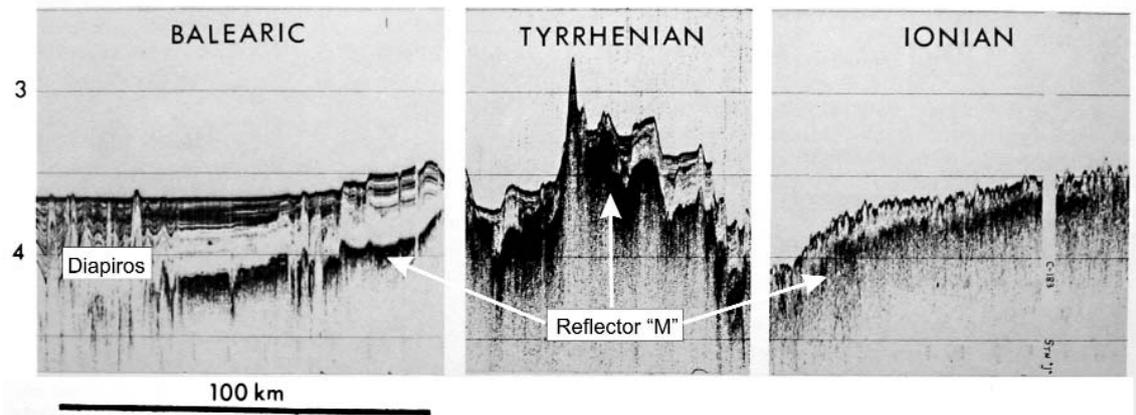


Fig. 2. Perfiles sísmicos en tres cuencas del Mediterráneo (Balear, Tirrena y Jónica) realizados con el buque Robert Conrad, donde se muestra tanto la expresión del reflector M como las estructuras diapíricas que ascienden desde tal reflector. (Tomado de Hsü et al., 1973b).

investigadores han jugado un papel esencial en el desarrollo de las ideas que se derivaron del hallazgo de las evaporitas en el subsuelo del Mediterráneo, aspecto que será tratado en los párrafos siguientes.

El Leg 13 inició la investigación del Mediterráneo para resolver ciertas incógnitas que habían surgido de la observación de perfiles sísmicos previamente realizados por los buques Robert Conrad, Calypso y Amazon. En estos perfiles, a los que W.B. Ryan dedicaba su labor de investigación, se reconocía un intenso y extenso reflector sísmico - conocido como reflector M- , a partir del cual ascendían estructuras perforantes que asemejan a los diapiros de sal (Fig. 2). ¿Qué significaba ese reflector y tales estructuras?. Esa es la principal cuestión que se resolvió durante el Leg 13.

El día 28 de agosto el Glomar Challenger se posicionó sobre la llanura abisal del sur de las Islas

Balears y se inició la perforación del pozo 124. Durante la perforación, cuando aparentemente se había alcanzado el reflector M, los operadores del barco detectaron que la velocidad de penetración del sondeo se redujo de varios metros por minuto a un metro por hora. Una vez recuperados los testigos del sondeo, los operadores alertaron a K.J. Hsü y W.B. Ryan de que habían encontrado la “columna de Atlantis”, dado que los testigos extraídos asemejaban en miniatura a columnas de mármol, imaginativamente procedentes del continente perdido bajo el océano. Esa era la evidencia que se necesitaba para identificar la naturaleza del reflector M. La “columna de Atlantis” fue analizada y resultó estar compuesta por anhidrita y estromatolitos (Hsü, 1983)(Fig. 3), dos tipos de sedimentos que actualmente se encuentran en llanuras costeras de clima árido. El Leg 13 perforó evaporitas en cinco puntos

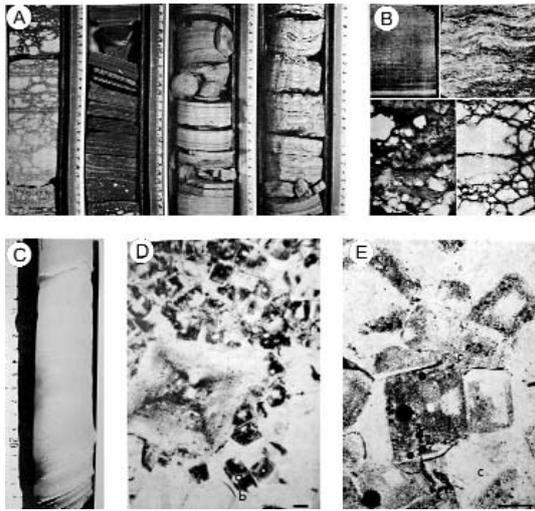


Fig. 3. Testigos de evaporitas perforadas durante el Leg 13. A: la "columna de Atlantis", compuesta por anhidrita y estromatolitos, fue el primer registro de evaporitas en el fondo del Mediterráneo. B: litofacies más típicas perforadas: dolomicrita laminada (superior izquierda), estromatolito (superior derecha) y anhidrita nodular (inferior). C: testigo de halita. D y E: halita vista al microscopio. (Fotografías tomadas de Hsü, 1983 y Friedman, 1973).

más aparte del pozo 124, tanto en el Mediterráneo occidental como oriental, con la particularidad de detectar depósitos de halita en algunos de ellos (Nesteroff, 1973; Friedman, 1973; Hsü *et al.*, 1973 a y b). Estos hallazgos, que supusieron la primera prueba de existencia de evaporitas en el Mediterráneo, indujeron a plantear que este mar quedó desecado con aguas muy someras en sus llanuras abisales (Hsü *et al.*, 1977). ¿En qué momento ocurrió tal acontecimiento? Las evaporitas en sí mismas no contienen fósiles que permitan su datación, pero las margas infrayacentes son ricas en fósiles de foraminíferos planctónicos. Las determinaciones realiza-

das por M.B. Cita (Hsü, 1983) permitieron precisar una edad Messiniense. Fue a partir de este momento cuando se emitió la hipótesis de la desecación del Mediterráneo durante el Messiniense y cuando se generalizó el concepto de crisis de salinidad del Messiniense.

El término crisis de salinidad del Messiniense no surgió del Leg 13. Fue en el estudio que realizó Selli (1960) en Sicilia para la definición del neostrototipo Messiniense, cuando se acuñó tal término como "el rasgo más característico del Messiniense en todo el Mediterráneo y que se caracteriza en Italia, esencialmente, por una ambiente hipersalino y por precipitación de evaporitas". La importancia del Leg 13 radica tanto en que la crisis de salinidad fue demostrada en las partes abisales del Mediterráneo como en que supuso el estímulo para la publicación de más de un millar de trabajos de investigación sobre este acontecimiento.

Recién realizado el Leg 13 tuvo lugar la primera controversia sobre el significado de la crisis de salinidad. Se plantearon dos hipótesis o modelos interpretativos: "cuenca profunda – agua somera" y "cuenca somera – agua somera". El primero de ellos, también conocido como modelo de cuenca profunda desecada (Hsü *et al.*, 1973b), sostiene que el Mediterráneo era una cuenca marina de más de 1500 metros de profundidad antes de la crisis, lo que supone una caída del nivel del mar de enorme magnitud para explicar las evaporitas registradas en sus partes abisales. En otras palabras, este modelo visualiza que el fondo del Mediterráneo quedó como un desierto a 1500 metros por debajo del nivel del mar global (Hsü, 1983)(Fig. 4). El segundo modelo (Nesteroff, 1973) presenta que el Mediterráneo era una cuenca relativamente somera, del orden de 200 a 600 metros de profundidad, antes de la crisis, lo que supone que la caída del nivel del mar que dio origen a las evaporitas fue de mucho menor valor.

El modelo de cuenca profunda era congruente con las síntesis de evolución tectónica de la cuenca

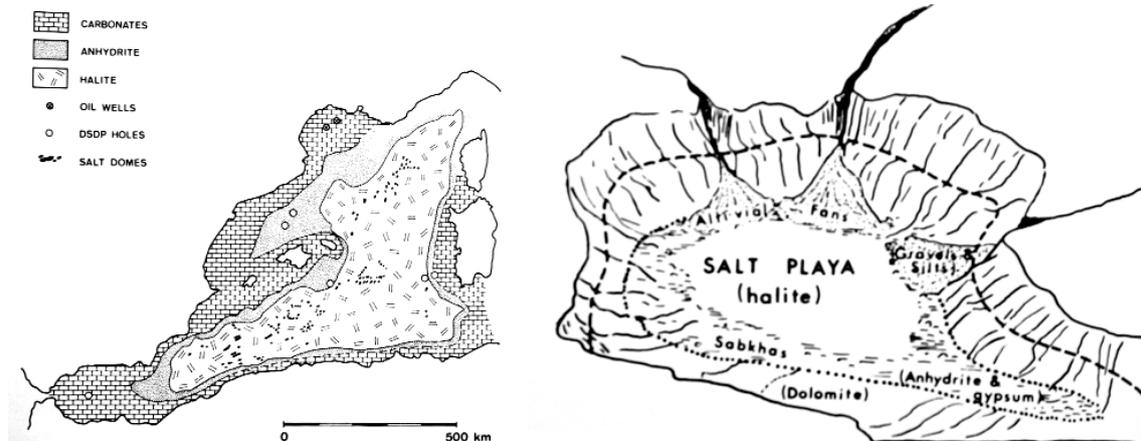


Fig. 4. Izquierda: primer modelo de distribución de evaporitas en el centro del Mediterráneo (Cuenca Balear) en el que se muestra que la halita precipitó en las partes más profundas, allí donde se localizan los diapiros de sal. Derecha: representación de la cuenca desecada, con halita en el centro y cañones erosivos en los márgenes. (Esquemas tomados de Hsü *et al.*, 1973).

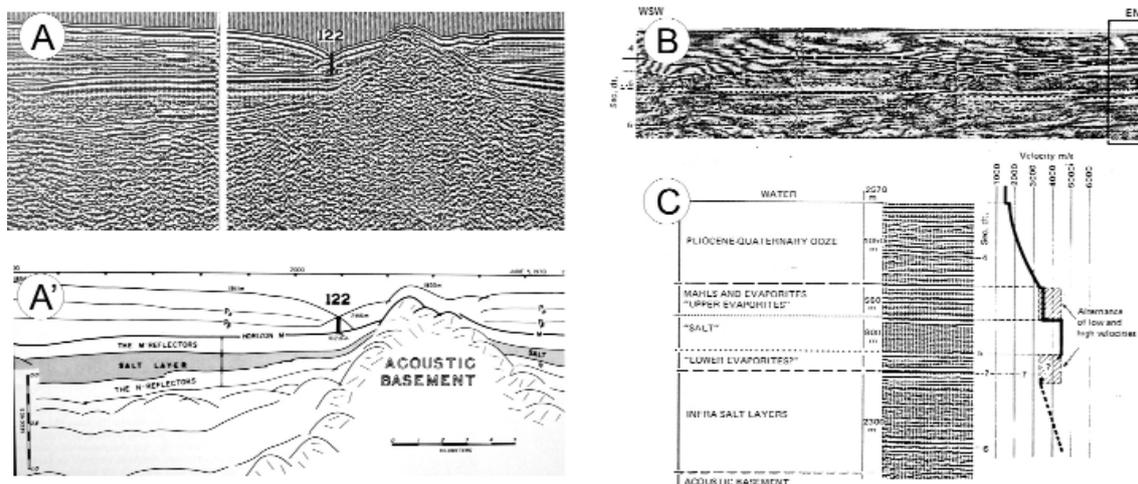


Fig. 6. A: utilización de perfiles sísmicos para inferir la sucesión completa y geometría de las evaporitas (salt layer) en el centro del Mediterráneo. B y C: ejemplo de perfil con la estimación del espesor de evaporitas. (Montadert et al., 1978).

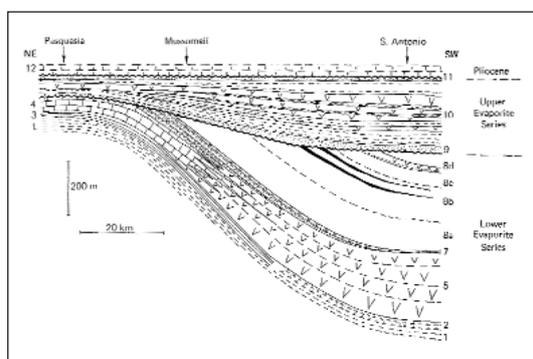


Fig. 7. Estratigrafía de las Evaporitas Inferiores y Superiores en Sicilia (Decima y Wezel, 1973) donde está expresada la discontinuidad que separa ambas unidades.

Sicilia, las evaporitas del Messiniense han sido reconocidas en numerosas pequeñas cuencas, actualmente emergidas y mayoritariamente localizadas en los márgenes del Mediterráneo. Son las llamadas cuencas marginales, en contraposición a las cuencas centrales. En estas cuencas marginales, como son las del sureste de España, norte de Argelia, Italia, Grecia, Creta y Chipre, las evaporitas están compuestas mayoritariamente por yeso (Fig. 8). El hecho de que en ningún sitio del Mediterráneo exista continuidad entre las evaporitas marginales y centrales hace difícil y controvertida la asignación de las primeras a las evaporitas Inferiores o Superiores.

DEPOSITOS PRE-EVAPORÍTICOS (TRIPOLI) Y POST-EVAPORÍTICOS (LAGO MARE)

La sucesión estratigráfica que se reconoce en Sicilia puede servir para ilustrar el tipo de sedimentos anteriores y posteriores a las evaporitas depositadas en las cuencas centrales del Mediterráneo. La

clásicas secciones de Sicilia, ya descritas por Selli (1960) y Decima y Wezel (1973), muestran que los depósitos pre-evaporíticos (por debajo de las Evaporitas Inferiores) son margas marinas con diatomitas, habitualmente conocidas como "Trípoli"; por encima de las Evaporitas Superiores la secuencia del Messiniense termina con margas y arenas con foraminíferos bentónicos y ostrácodos que indican unas condiciones de agua dulce o de baja salinidad, que son referidas como episodio "Lago Mare" (Hsü et al., 1977). Estos depósitos terminales del Messiniense han sido registrados en sondeos de las cuencas centrales tanto del Mediterráneo oriental como occidental, indicando que el episodio Lago Mare afectó a todo el Mediterráneo.

En lo que se refiere a las cuencas marginales, en todas ellas existe un notable paralelismo con las unidades reconocidas en Sicilia. Los depósitos pre-evaporíticos están compuestos por margas ricas en organismos planctónicos, que forman ciclos bien definidos con diatomitas y sapropeles (Krijgsman et al., 1999). Los depósitos post-evaporíticos están representados por sedimentos del episodio Lago Mare, si bien en ocasiones muestran intercalaciones de depósitos marinos (Rouchy y Caruso, 2006).

LA SUPERFICIE EROSIVA

La caída del nivel del mar que dio origen a las evaporitas de las cuencas centrales dejó en exposición subaérea a una gran parte del Mediterráneo, momento en el que se inicia la formación de una superficie erosiva generalizada, que en el registro estratigráfico se expresa por la denominada discontinuidad del Messiniense. Esta discontinuidad está representada en Sicilia separando las Evaporitas Inferiores de las Evaporitas Superiores y refleja el momento de extrema desecación del Mediterráneo. ¿Por qué se sitúa el climax de la desecación y la discontinuidad del Messiniense entre ambas unidades evaporíticas? Al respecto Hsü et al. (1977) pro-

ponen una interesante explicación, que se sintetiza a continuación. Las Evaporitas Inferiores representan un episodio de desecación parcial, dado que el gran espesor de sales precipitadas requiere un aporte continuo de agua marina para su posterior transformación, por evaporación, en salmueras y evaporitas; cuando cesó este aporte marino, el nivel de las salmueras cayó drásticamente quedando totalmente desecado y expuesto el Mediterráneo en sus partes más profundas, originándose la superficie erosiva del Messiniense. Fue este el momento en el que los ríos excavaron profundos cañones erosivos en las plataformas marinas y en que se formaron acumulaciones de depósitos clásticos en las partes profundas del Mediterráneo. Tras esta etapa erosiva, una nueva entrada de agua marina inundó la cuenca desecada, dando origen a las Evaporitas Superiores, en parte recicladas de las Evaporitas Inferiores previamente acumuladas, en parte nuevamente formadas por repetidos episodios de aporte de agua marina y de evaporación.

Salvo en Sicilia, que como se ha indicado anteriormente se asume como una cuenca central del Mediterráneo, en ninguna de las restantes cuencas profundas, actualmente sumergidas, se ha reconocido directamente la discontinuidad correspondiente a la fase erosiva del Messiniense. Recordemos que todos los sondeos realizados durante los legs 13 y 42A solamente han penetrado la parte alta de las Evaporitas Superiores, sin alcanzar el límite con las Evaporitas Inferiores.

En las cuencas marginales, la posición estratigráfica de la superficie erosiva del Messiniense ha sido objeto de controversia. Es cierto que en ninguna de estas cuencas se dispone de un registro similar al de Sicilia, donde las evaporitas Inferiores y Superiores están claramente separadas por la discontinuidad del Messiniense. Una de las cuencas marginales que sirve para ilustrar la polémica en torno a la posición estratigráfica de la discontinuidad del Messiniense es la de Sorbas, en Almería. Para algunos autores, como Riding *et al.* (1999), es-

ta discontinuidad se sitúa a la base de las evaporitas, en coincidencia con una marcada superficie erosiva que las separa de las margas marinas pre-evaporíticas (Fig. 8). Según esta propuesta, tal superficie erosiva debería corresponder a las Evaporitas Inferiores precipitadas en el centro del Mediterráneo, mientras que las evaporitas marcarían la reinundación, post-desecación, que caracteriza las Evaporitas Superiores. Esta propuesta ha sido discutida por Fortuin *et al.* (2000), quienes presentan un modelo alternativo. Para estos autores la discontinuidad correlativa a la desecación del Mediterráneo se localiza en el seno de los depósitos post-evaporíticos del Messiniense, lo que implica, de un lado que las evaporitas de la cuenca de Sorbas son equivalentes a las Evaporitas Inferiores, y de otro lado que las Evaporitas Superiores estarían representadas en Sorbas por depósitos no evaporíticos.

Aparte de las dos propuestas arriba indicadas, otros autores presentan alternativas diferentes basadas en parte en otras cuencas del Mediterráneo. En particular, Clauzon *et al.* (1996) y Martínez del Olmo (1996 a y b) sostienen que la superficie erosiva del Messiniense está modelada directamente sobre las evaporitas de las cuencas marginales. Si bien estos autores coinciden en la posición estratigráfica de las evaporitas, ambos difieren en el significado de la superficie erosiva. Para Clauzon *et al.* (1996) tal superficie es el registro de una caída de nivel del mar del orden de 1500 metros que dio origen a la desecación del Mediterráneo, mientras que para Martínez del Olmo (1996 b) la caída del nivel del mar no excedió los 200 metros, sin desecación del Mediterráneo. Otros estudios recientes, como los realizados por Soria *et al.* (2005) en la cuenca del Bajo Segura (Alicante), han argumentado la existencia de dos superficies erosivas generadas a consecuencia de caídas del nivel del mar durante el Messiniense. Una está localizada a la base de las evaporitas, en coincidencia con la propuesta realizada por Riding *et al.* (1999) para la cuenca de Sorbas. La otra se sitúa a techo de las evaporitas y del



Fig. 8. A: vista panorámica del centro de la Cuenca de Sorbas (Almería) donde se observan una superficie erosiva (discontinuidad del Messiniense) a la base de las evaporitas. B: detalle de los cristales de yeso que forman las evaporitas.

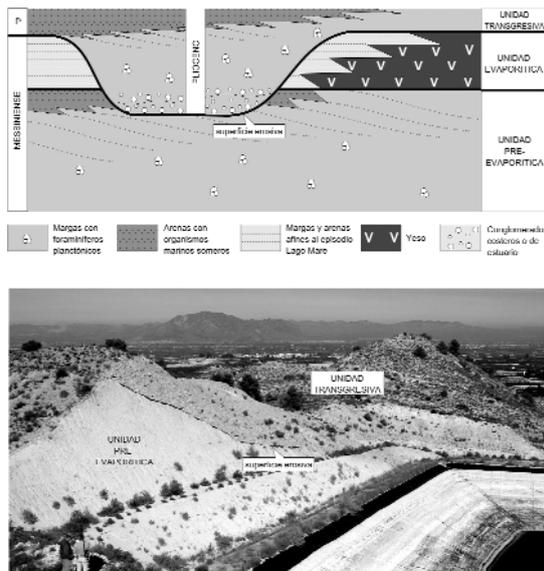


Fig. 9. Esquema estratigráfico de la Cuenca del Bajo Segura. Nótese la existencia de dos discontinuidades (dibujadas en línea gruesa), localizadas a la base y techo de las evaporitas. La última se caracteriza por su franco carácter erosivo, como lo evidencia el profundo valle encajado que está relleno por depósitos del Plioceno.

episodio Lago Mare, de similar forma que se sostiene en los modelos de Clauzon *et al.* (1996) y Martínez del Olmo (1996 a y b). Esta última superficie erosiva presenta profundos valles encajados que están rellenos de depósitos marinos del Plioceno (Fig. 9), los cuales serán descritos en el apartado siguiente.

FINAL DE LA CRISIS: LA REINUNDACIÓN DEL PLIOCENO

Los registros de los sondeos realizados durante los legs 13 y 42A demuestran que tanto las Evaporitas Superiores como los depósitos del episodio Lago Mare están cubiertos por sedimentos marinos profundos del Plioceno inferior. De igual forma, en Sicilia se ha reconocido que sobre los depósitos Lago Mare reposan margas marinas del Plioceno, clásicamente conocidas como “Trubi”. Este cambio fue la clave para que Hsü *et al.* (1977) propusieran que el final de la crisis de salinidad ocurrió con la reinundación del Plioceno, cuando una nueva entrada de agua marina relleno completamente el Mediterráneo, adquiriendo la salinidad que actualmente presenta.

En la mayoría de las cuencas marginales, como ocurre en las cuencas de sureste de España (Níjar, Vera y Bajo Segura) la reinundación del Plioceno está registrada por margas marinas ricas en organismos planctónicos. En el caso concreto de la cuenca del Bajo Segura, se dispone de un buen registro que sirve para ilustrar como se produjo la reinundación (Caracuel *et al.*, 2004; Soria *et al.*, 2005). En una primera etapa, recién entrado el mar en la cuenca,

se implantaron ambientes costeros sobre la superficie erosiva modelada a techo de las evaporitas y de los depósitos Lago Mare. Estos ambientes costeros son mayoritariamente playas, si bien lo más significativo es la formación de estuarios allí donde se habían generado valles fluviales encajados. En otra segunda etapa, cuando el nivel del mar progresó en su ascenso, tuvo lugar una rápida profundización, cambiando los ambientes costeros a marinos francos dominados por fauna y flora planctónica. En este momento se rellenan completamente los valles encajados, así como la mayor parte de la cuenca fue ocupada por el mar.

CAUSAS Y EDAD DEL INICIO Y FINAL DE LA CRISIS

Durante el Mioceno superior el Mediterráneo mantuvo una comunicación con el Atlántico a través de dos vías marinas -pasillos Bético y Rifeño- localizadas en el interior de las cordilleras Bética y Rifeña (Jolivet *et al.*, 2006) (Fig 10). Como consecuencia del levantamiento post-orogénico de ambas cordilleras tales pasillos se fueron cerrando progresivamente, hasta el punto de que el Mediterráneo quedó completamente aislado del Atlántico. Fue este el momento en el que Mediterráneo quedó en déficit hidrológico; la evaporación no fue compensada con entrada de agua atlántica y descendió en nivel del mar, iniciándose la crisis de salinidad. El cierre de ambas vías marinas, como causa de la crisis, no fue simultáneo; primero ocurrió en el pasillo Bético a finales del Tortoniense, o posiblemente a inicios del Messiniense, y después en el pasillo Rifeño a mediados del Messiniense. Por criterios biostratigráficos y magnetostratigráficos se ha determinado que el inicio de las precipitación evaporítica en Sorbas, Sicilia y Grecia ocurrió a los 5.9 millones de años, terminando a los 5.5 millones de años (Hilgen *et al.*, 1995; Krijgsman *et al.*, 1999). Durante este lapso de tiempo debió existir una entrada intermitente de agua atlántica hacia el Mediterráneo, seguida de episodios de desecación, necesaria para precipitar el gran volumen de evaporitas (más de 1 millón de km³) registradas en el centro del Mediterráneo. Según estiman Rouchy y Saint Martin (1992) una sola desecación generaría una secuencia evaporítica de no más de 30 metros de espesor.

La crisis de salinidad termina con la reinundación del Mediterráneo como consecuencia de la apertura de una nueva vía marina -el Estrecho de Gibraltar- en el arco Bético-Rifeño (Fig 10). Originalmente, en los estudios derivados del Leg 13 se consideró que el Estrecho de Gibraltar fue un pasillo erosivo con cataratas en la vertiente mediterránea causado por la diferencia de nivel de base respecto al Atlántico. Estudios recientes sobre la evolución del Mar de Alborán sostienen que dicho estrecho se abrió por causas tectónicas locales, en concreto por la actuación de fallas de salto en dirección de orientación E-O en la parte occidental de Alborán (Campillo *et al.*, 1992).

CONSIDERACIONES FINALES

La crisis de salinidad del Messiniense representa un acontecimiento de notable interés para ilustrar cambios ambientales excepcionales tanto en el dominio Mediterráneo como a escala global. Si bien su importancia ha sido considerada mayoritariamente en los aspectos puramente científicos, algunos estudios han enfocado su tratamiento en campo de la divulgación geológica (Maldonado, 1978; Riba, 1981; Hsü, 1883). Este evento, asumiendo que fue consecuencia de una caída del nivel del mar del orden de 1500 metros, debe ser contemplado como una excepción a las oscilaciones eustáticas, cuyo rango alcanza como mucho 400 metros. El enorme volumen de evaporitas precipitadas (más 1 millón de km³) en el centro del Mediterráneo redujo en un 6% la salinidad del océano global, lo cual cambió las condiciones de vida marina antes y después de la crisis (Hsü, 2001). Durante el lapso temporal en el cual el Mediterráneo quedó desecado (ca. 400000 años) el clima tuvo necesariamente que verse alterado, al tiempo que se crearon nuevas vías de migración de organismos terrestres entre África y Europa. La cuenca mediterránea desecada ocupó un área de 2,5 millones de km², representado un escenario sin ejemplos comparables en la actualidad. La incógnita sobre la naturaleza de la mayor parte de las evaporitas del centro del Mediterráneo aún está pendiente de resolver. Esto constituye un reto para la comunidad científica, dado que las claves para conocer el significado real de la crisis de salinidad se encuentran dentro de la secuencia evaporítica detectada por geofísica en las llanuras abisales del Mediterráneo. Interesa señalar que varios grupos de investigación están planteando diversas alternativas para la perforación completa de las evaporitas abisales en el marco del Integrated Ocean Drilling Program (IODP). Habrá que esperar hasta esta futura actuación para dar un salto sustancial en el progreso de los conocimientos sobre este singular evento que acaeció en el Mediterráneo hace 6 millones de años.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos de investigación BTE2003-05047 y CGL2007-65832. Agradezco a los Drs. Pedro Alfaro y David Brusi su interés por este tema, así como por la corrección del manuscrito original y por las sugerencias aportadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Campillo, A.C., Maldonado, A. y Mauffret, A. (1992). Stratigraphic and Tectonic Evolution of the Western Alboran Sea: Late Miocene to Recent. *Geo-Marine Letters*, 12, 165-172.
- Caracuel, J.E., Soria, J.M. y Yébenes, A. (2004). Early Pliocene transgressive coastal lags (Bajo Segura Basin, Spain): a marker of the flooding after the Messinian salinity crisis. *Sedimentary Geology*, 169, 121-128.
- Clauzon, G., Suc, J.P., Gautier, F., Berger, A. y Loutre, M.F. (1996). Alternate interpretation of the Messinian salinity crisis: Controversy resolved?. *Geology*, 24, 4, 363-366.

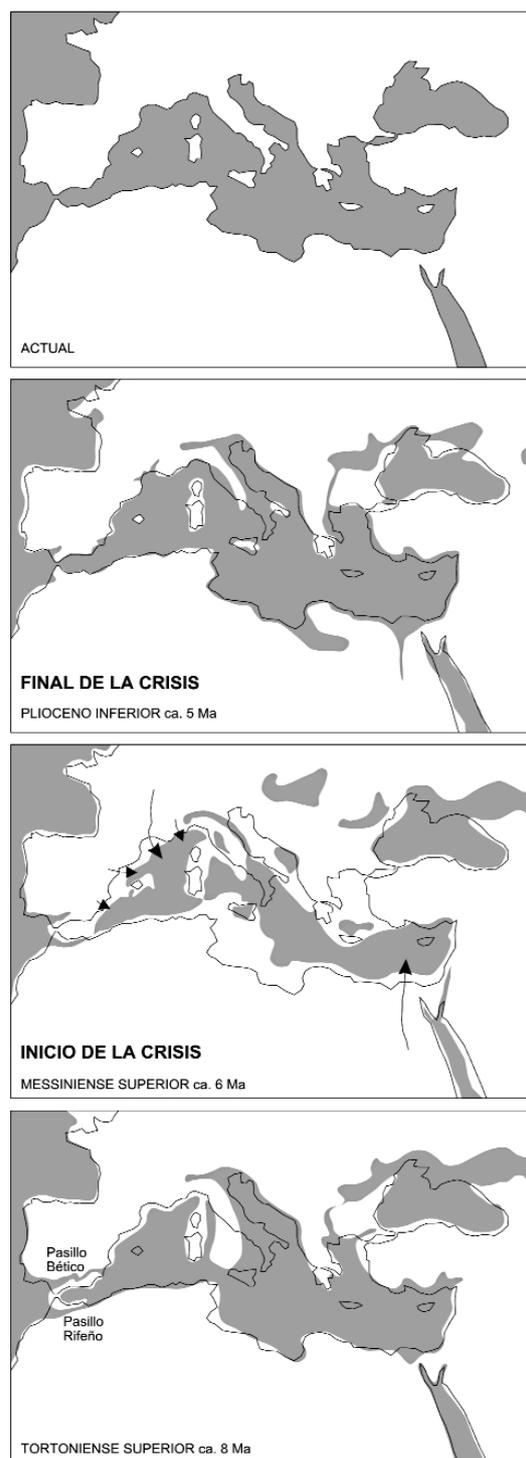


Fig. 10. Evolución paleogeográfica del Mediterráneo desde el Mioceno superior (simplificado de Jolivet et al., 2006). El inicio de la crisis de salinidad tuvo lugar como consecuencia del cierre de los pasillos Bético y Rifeño, cuando el Mediterráneo quedó aislado del Atlántico; en este momento se labraron cañones erosivos en los márgenes (indicados como flechas). El final de la crisis se produjo por la apertura del Estrecho de Gibraltar, quedando el Mediterráneo inundado por aguas atlánticas y con una fisiografía similar a la actual.

- Decima, A. y Wezel, F.C. (1973). Late Miocene evaporites of the central Sicilian basin, Italy. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 13, II, 1234-1240. US Govt. Printing Office, Washington.
- Fortuin, A., Krijgsman, W., Hilgen, F.J. y Sierro, F.J. (2000). Late Miocene Mediterranean desiccation: topography and significance of the "Salinity Crisis" erosion surface on-land in southeast Spain: Comment. *Sedimentary Geology*, 133, 167-174.
- Friedman, G.M. (1973). Thin-section petrography of the Mediterranean evaporites. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 13, II, 695-713. US Govt. Printing Office, Washington.
- Hilgen, F.J., Krijgsman, W., Langereis, C.G., Lourens, L.J., Santarelli, A. y Zachariasse, W.J. (1995). Extending the astronomical (polarity) time scale into the Miocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 136, 495-510.
- Hsü, K.J., Cita, M.B. y Schreiber, B.C. (1973a). Petrography of a halite sample from hole 134 - Balearic Abyssal Plain. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 13, II, 708-711. US Govt. Printing Office, Washington.
- Hsü, K.J. (1983). *The Mediterranean was a desert. A voyage of the Glomar Challenger*. Princeton University Press, 197 p.
- Hsü, K.J. y otros 9 autores (1977). History of the Mediterranean salinity crisis. *Nature*, 267, 399-403.
- Hsü, K.J. y otros 11 autores (1978). *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 42A, 1249 p. US Govt. Printing Office, Washington.
- Hsü, K.J., Cita, M.B. y Ryan, W.B.F. (1973b). The origin of the Mediterranean evaporites. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 13, II, 1203-1221. US Govt. Printing Office, Washington.
- Hsü, K.J. (2001). Gaia and the Mediterranean Sea. *Scientia Marina*, 65, 133-140.
- Jolivet, L., Augier, R., Robin, C., Suc, J.P. y Rouchy, J.M. (2006). Lithospheric-scale geodynamic context of the Messinian salinity crisis. *Sedimentary Geology*, 188-189, 9-33.
- Krijgsman, W., Hilgen, F.J., Raffi, I., Sierro, F.J. y Wilson, D.S. (1999). Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis. *Nature*, 400, 652-655.
- Maldonado, A. (1978). El estancamiento de las aguas en el Mar Mediterráneo. *Investigación y Ciencia*, 23, 32-44.
- Martínez del Olmo, W. (1996a). *Depositional sequences in the Gulf of Valencia Tertiary basin*. In: Tertiary basin of Spain: The Stratigraphic Record of Crustal Kinematics (Friend, P.F. and Dabrio, C.J., eds). World and Regional Geology, Series 6. Cambridge University Press, Cambridge, p. 55-67.
- Martínez del Olmo, W. (1996b). Yesos de margen y turbidíticos en el Messiniense del Golfo de Valencia: una desecación imposible. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 9 (1-2), 97-112.
- Montadert, L., Letouzey, J., Mauffret, A. (1978). Messinian event: seismic evidence. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 42A, II, 1037-1050. US Govt. Printing Office, Washington.
- Nesteroff, W.D. (1973). Mineralogy, petrography, distribution, and origin of the Messinian Mediterranean evaporites. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 13, II, 673-693. US Govt. Printing Office, Washington.
- Riba, O. (1981). Canvis de nivell i de salinitat de la Mediterrània occidental durant el Neogen i el Quaternari. *Treb. Inst. Cat. Hist. Nat.*, 9, 45-62.
- Riding, R., Braga, J.C. y Martín, J.M. (1999). Late Miocene Mediterranean desiccation: topography and significance of the "Salinity Crisis" erosion surface on-land in southeast Spain. *Sedimentary Geology*, 123, 1-7.
- Rouchy, J.M. y Caruso, A. (2006). The Messinian salinity crisis in the Mediterranean basin: A reassessment of the data and an integrated scenario. *Sedimentary Geology*, 188-189, 35-67.
- Rouchy, J.M. y Saint Martin, J.P. (1992). Late Miocene events in the Mediterranean as recorded by carbonate-evaporite relations. *Geology*, 20, 629-632.
- Ryan, W.B.F. (1976). Quantitative evaluation of the deep of Western Mediterranean before, during and after the Late Miocene salinity crisis. *Sedimentology*, 23, 791-813.
- Ryan, W.B.F. y otros 9 autores (1973). *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 13, I-II. US Govt. Printing Office, Washington.
- Selli, R. (1960). Il Messiniano *Mayer-Eymar* 1867. Proposta di un neostatotipo. *Giornale di Geologia*, 28, 1-33.
- Soria, J.M., Caracuel, J.E., Yébenes, A., Fernández, J. y Viseras, C. (2005). The stratigraphic record of the Messinian salinity crisis in the northern margin of the Bajo Segura Basin (SE Spain). *Sedimentary Geology*, 179, 225-247. ■

Fecha de recepción del original: 10 mayo 2007.
Fecha de aceptación definitiva: 20 julio 2007.