

Deformaciones neógenas y diapirismo arcilloso en el sector nororiental del prisma de acreción del Golfo de Cádiz

Neogene deformations and shale diapirism in the northeastern sector of the accretionary wedge of the Gulf of Cadiz

Ilsón Nunes-Rubim, Álvaro Carrión-Torrente y José Luis Sánchez-Roldán

Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Campus de Fuentenueva, 18071, Granada, España.
 inrubim@yahoo.com.br, alvct91@gmail.com, sanchezroldanj@gmail.com

ABSTRACT

The Gulf of Cádiz is situated over the Eurasian-African plate boundary, which is characterized by an oblique NW-SE convergence. This work examines the deformation of the sedimentary cover on the northeastern sector of the accretionary wedge of the Gulf of Cadiz (AWGC), characterized by shale and salt diapirs. We analyze the distribution of shale diapirs and their relationship with structures affecting the supra-AWGC sedimentary sequence from the Middle Miocene to present. Using commercial multi-channel 2D seismic lines and four oil wells, we have identified three seismic-stratigraphic units above the PAGC (Pleistocene, Pliocene and Middle-Upper Miocene). It is presented a structural map with growth normal faults associated down-slope with SSW-NNE shale diapirs and troughs. The overall structure is probably formed by a left-lateral transpression deformation since the Middle Miocene with gravitational gliding above the AWGC.

Key-words: Accretionary wedge, Gulf of Cádiz, shale diapirs, Neogene, Gibraltar Arc.

RESUMEN

El Golfo de Cádiz se encuentra sobre el límite de las placas Euroasiática y Africana, caracterizado por un régimen de convergencia oblicua NO-SE. En este trabajo se estudia la deformación de la cobertera sedimentaria sobre el sector nororiental del prisma de acreción del Golfo de Cádiz (PAGC), caracterizado por intrusiones de diapiros arcillosos y salinos. Este estudio analiza la distribución de los diapiros arcillosos y su relación con estructuras que afectan al relleno sedimentario suprayacente, desde el Mioceno Medio hasta el presente. Utilizando líneas sísmicas multicanal comerciales 2D y cuatro sondeos petrolíferos, se han identificado tres unidades sismoestratigráficas sobre el PAGC (Pleistoceno, Plioceno y Mioceno Medio-Superior). Se presenta un mapa estructural con fallas normales de crecimiento asociadas pendiente abajo con diapiros arcillosos y cubetas sinclinales SSO-NNE, según un régimen de deformación desde el Mioceno Medio de transpresión izquierda y deslizamiento gravitacional sobre el PAGC.

Palabras clave: Prisma de acreción, Golfo de Cádiz, diapirismo arcilloso, Neógeno, Arco de Gibraltar.

Geogaceta, 62 (2017), 27-30
 ISSN (versión impresa): 0213-683X
 ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 31 de enero de 2017
 Revisión: 26 de marzo de 2017
 Aceptación: 26 de abril 2017

Introducción

Ya sea por su localización estratégica en el extremo suroccidental de la Península Ibérica, o por su compleja evolución geológica, el Golfo de Cádiz ha sido objeto de diversos estudios durante las últimas décadas, con objetivos tanto académicos como exploratorios (e.g., Maldonado *et al.*, 1999). Este interés se ha visto acrecentado por los indicios obtenidos a lo largo de campañas exploratorias que indican un sistema petrolífero activo, con potenciales acumulaciones de hidrocarburos (HC) en sedimentos turbidíticos de edad Messiniense (Ramos *et al.*, 2015).

El rasgo geológico principal es el prisma de acreción del Golfo de Cádiz (PAGC), con una cobertera sedimentaria de edad Mioceno

Medio a actual (e.g., Maldonado *et al.*, 1999, Medialdea *et al.*, 2004). En este contexto la deformación de la sucesión sedimentaria sobrepuesta al PAGC está controlada no sólo por los esfuerzos regionales, sino también por factores locales asociados a la dinámica del propio prisma y de los diapiros asociados.

Diapirismo Arcilloso

El factor desencadenante para el desarrollo del diapirismo arcilloso se da cuando la presión de fluidos intersticiales supera a la presión litostática. Por ello, cualquier proceso que modifique la relación entre ambos esfuerzos influye en el diapirismo. La distribución geográfica de los diapiros arcillosos está controlada por el contexto geológico aunque

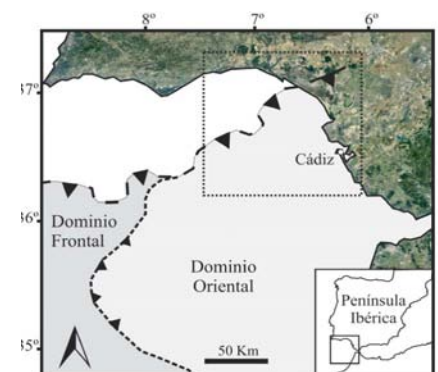


Fig. 1 - Dominios tectónicos del PAGC en el sector NE del Golfo de Cádiz (Medialdea *et al.*, 2004) y posición del área estudiada (recuadrado con puntos). Ver figura en color en la web

Fig. 1 – Tectonic domains of Accretionary Wedge of the Gulf of Cadiz (AWGC) (Medialdea *et al.*, 2004) and position of the studied area (dotted square). See color figure in the web.

se conoce que el principal mecanismo de accionamiento de diapiros está asociado a sistemas contractivos (e.g., Dimitrov, 2002). En situaciones de este tipo, la sobrecarga causada por las láminas cabalgantes eleva la presión de poros en las capas subyacentes, desequilibrando el sistema y promoviendo el ascenso de la capa fuente arcillosa. Este proceso permite la migración de fluidos hasta la superficie, dando lugar a volcanes de fango (VF; e.g., Kopf, 2002; Somoza et al., 2003).

Existe una estrecha relación entre diapirismo arcilloso y distintos elementos del sistema petrolífero (Kopf, 2002). Además de relacionados a potenciales rocas madre, constituyen barreras efectivas de permeabilidad, por lo que influyen tanto en rutas de migración como en posibles trampas.

Contexto Geológico

Desde el inicio de la formación del Arco de Gibraltar, en el Paleógeno Superior, el Golfo de Cádiz se ve condicionado por una convergencia N-S entre las placas Euroasiática y Africana. Esta convergencia ha rotado gradualmente hacia una transpresión NO-SE desde el Mioceno Medio hasta la actualidad (e.g., Maldonado et al., 1999; Zitellini et al., 2009). Maldonado et

al. (1999) sugieren que el emplazamiento del PAGC se inicia justo antes del Tortonense Superior, dado que sedimentos de esta edad se encuentran tanto bajo como sobre el PAGC. Esto no excluye que haya movimientos anteriores de edad Mioceno Inferior-Medio. Los datos de GPS indican en el límite N del PAGC un desplazamiento hacia el O de $1,8 \pm 0,8$ mm / año (Serpelloni et al., 2007).

El área estudiada (Fig. 1) se sitúa en el sector NE del PAGC en el Golfo de Cádiz. El relleno sedimentario está constituido aquí por un importante acúmulo de arcillas y margas datadas desde el Paleógeno hasta la actualidad, localmente mezcladas con materiales mesozoicos procedentes de los paleo-márgenes infrayacentes de las cadenas Béticas y Rif (Maldonado et al., 1999).

Diversas estructuras diapíricas salinas y arcillosas han sido caracterizadas previamente, en relación con la dinámica y evolución del PAGC (Somoza et al., 2003; Fernández-Puga et al., 2007; Medialdea et al., 2009).

Datos y Metodología

Los perfiles sísmicos y datos de sondeos utilizados en este trabajo han sido obtenidos junto al Archivo Técnico de

Hidrocarburos (ATH). Considerando la localización y calidad de los datos, se han seleccionado 23 líneas sísmicas 2D no migradas (en tiempo doble). Además, se han utilizado datos de 4 sondeos petrolíferos, elegidos por su posición e información disponible (Fig. 2B).

Se ha elegido una línea sísmica que pasa por el pozo Cádiz Mar Profundo C-1 para calibrar la sismoestratigrafía de la zona de estudio (Fig. 2A). Según los informes bioestratigráficos se han individualizado tres unidades, de edades Pleistoceno, Plioceno y Mioceno Medio-Superior. Los datos micropaleontológicos indican sedimentos del tránsito entre el Mioceno Medio al Superior en los últimos 612 m del pozo. De esta forma, por la interpretación sísmica y dada la profundidad final del pozo (2946 m, Fig. 2A), se plantea que la unidad más antigua sobre el PAGC es del Mioceno Medio-Superior.

Interpretación Estructural

La malla de perfiles interpretados (Fig. 2C) y la correlación estratigráfica ha permitido levantar un mapa estructural sintético (Fig. 3). Este mapa muestra las estructuras

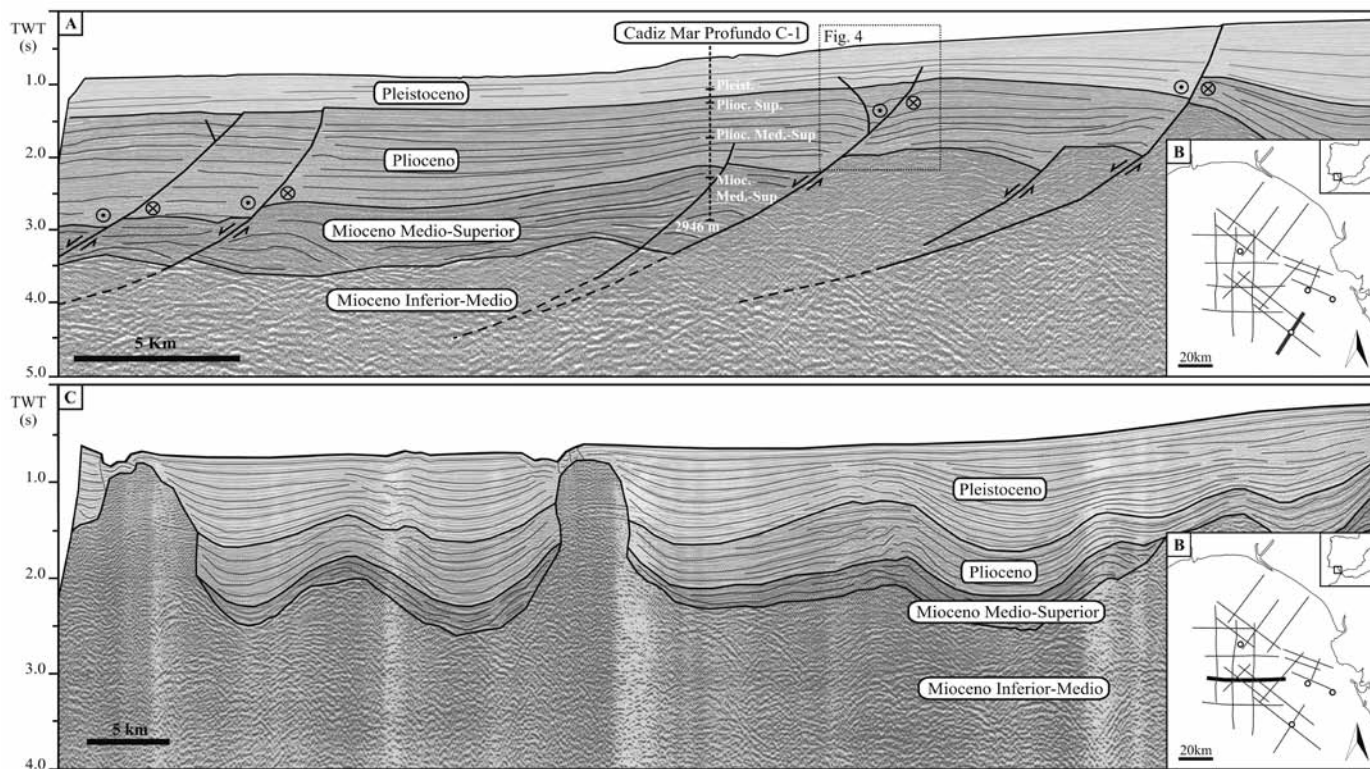


Fig. 2 - Líneas sísmicas interpretadas (A y C) y posicionamiento de las líneas y pozos (círculos) empleados en este estudio (B). El recuadrado en (A) señala la posición de la Fig. 4. La sismoestratigrafía utilizada procede de los datos del pozo contenido en la línea sísmica (A).

Fig. 2 – Seismic lines interpreted (A and C) and position map with the seismic lines and wells used for this study (B). The rectangle in (A) marks the position of Fig. 4. The seismo-stratigraphy in this study corresponds to the data from the well shown in (A).

a unos 2 seg de profundidad, diferenciándose los tipos de fallas y las culminaciones de los cuerpos diapíricos, junto a los VF encontrados y otros ya estudiados por autores previos (Somoza *et al.*, 2003; Fernández-Puga *et al.*, 2007; Medialdea *et al.*, 2009). Las estructuras cartografiadas afectan a una sucesión sedimentaria de unos 3000 m de espesor, datadas desde el Mioceno Medio hasta la actualidad (Fig. 2C).

Diapiros de lodo

En las líneas sísmicas los cuerpos diapíricos se caracterizan por unas facies sísmicas caóticas, con abundantes difracciones internas y una reflectividad difusa en el contacto con la cobertera sedimentaria. En general, los diapiros tienen una geometría cónica, simétrica (Fig. 2C). No obstante, localmente son asimétricos, con paredes al O de mayor buzamiento. Lo que se interpreta como coherente con el movimiento hacia el O del PAGC y de la convergencia actual NO-SE.

En el dominio O de la zona estudiada los diapiros arcillosos presentan una dirección preferente NNE-SSO, formando estructuras subparalelas al límite N del PAGC. Algunas de estas paredes arcillosas corresponden con las crestas diapíricas del Guadalquivir y de Cádiz descritas por Fernández-Puga *et al.* (2007; Fig. 3). Algunos diapiros llegan localmente a la superficie del fondo marino (Fig. 2C), formando campos de VF. En el NE del área estudiada, los diapiros presentan menor relieve y están alineados según la dirección NNO-SSE. En este caso su ascensión parece estar asociada al bloque de muro de fallas gravitacionales orientadas NO-SE.

Fallas Normales

Las fallas normales caracterizadas se encuentran predominantemente en el sector E de la zona estudiada. Presentan orientación NNO-SSE y buzamiento hacia el O (*i.e.*, hacia la cuenca). Algunas son fallas activas ya que cortan sedimentos hasta al fondo marino (Fig. 2A). Muchas de las fallas son sin-sedimentarias, con actividad desde el Plioceno, ya que las sucesiones de Pliocuaternarias se engruesan hacia las fallas. Algunas fallas presentan carácter lístrico, cuya terminación subhorizontal se produce dentro de la sección arcillosa del PAGC (Mioceno Inferior-Medio), constituyendo la capa fuente del diapirismo arcilloso.

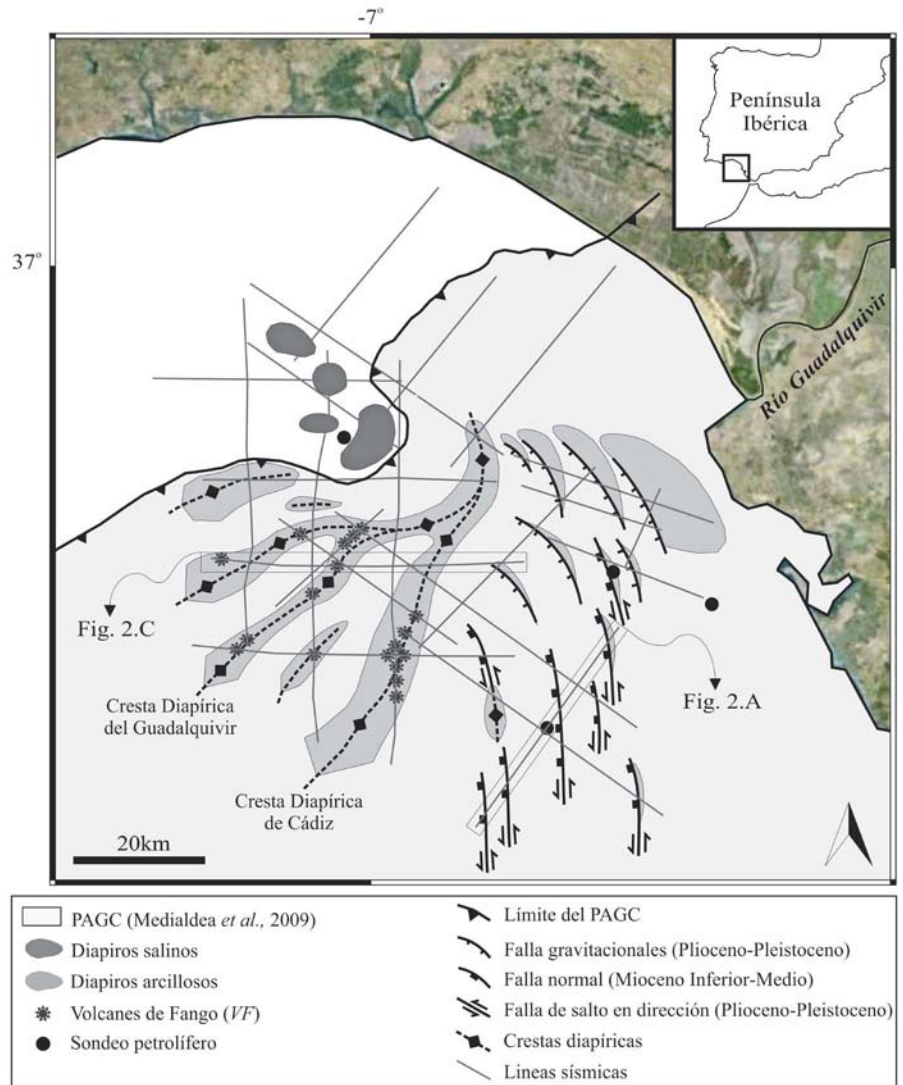


Fig. 3 – Mapa estructural a unos 2 segundos de profundidad en el sector NE del PAGC. Se incluyen como referencia los nombres de las crestas diapíricas (Fernández-Puga *et al.*, 2007). Ver figura en color en la web
 Fig. 3 – Structural map of the NE sector of the AWGC at approximately 2 s depth. It is included for reference the name of the shale diapirs culminations (Fernández-Puga *et al.*, 2007). See color figure in the web.

Fallas de Salto en Dirección

Se ha identificado una componente oblicua asociada al movimiento normal de algunas de las fallas N-S en la porción ESE de la zona estudiada. Estas fallas se caracterizan en los perfiles sísmicos por su alto buzamiento y por cambios laterales de espesor de las capas sedimentarias (Fig. 4). Se interpreta que estas estructuras representan una migración lateral de depocentros, con una componente de salto en dirección (*e.g.*, Noda, 2013).

Considerando la irregular distribución y espaciado de las líneas sísmicas utilizadas, no ha sido posible precisar la geometría tridimensional de las fallas, ni determinar con seguridad la cinemática del movimiento. Sin embargo, según la arquitectura y las rela-

ciones geométricas, se interpreta un componente sinistrorro para algunas de estas fallas (Figs. 2A y 4).

Pliegues

En las líneas E-O se identifican pliegues suaves (*e.g.*, Fig. 2C), con ejes NNE-SSO de cubetas sinclinales, sub-paralelos tanto a las crestas anticlinales de los pilares o muros de arcilla como al límite NO de PAGC (Fig. 3). La disposición espacial y geometría de estas estructuras es compatible con los efectos de la transpresión regional NO-SE en el PAGC.

Discusión y Conclusiones

La interpretación sísmica realizada, con una sismoestratigrafía que utiliza las dataciones en sondeos exploratorios, ha sido in-

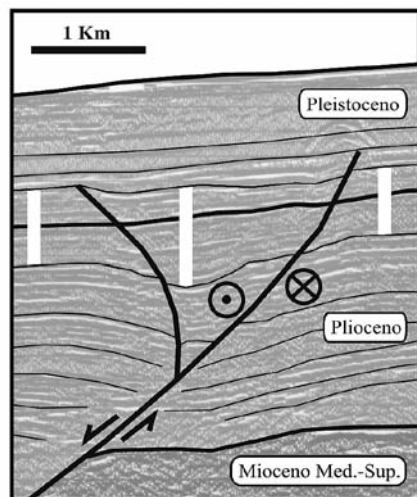


Fig. 4 – Detalle de una falla normal con una componente de salto en dirección. Barras blancas señalan el cambio lateral de espesor de una misma unidad sismoestratigráfica (Plio-Pleistoceno). Situación de la ventana sísmica indicada en Fig. 2A.

Fig. 4 – Detailed view of a normal fault with a horizontal component of the displacement. White bars mark the lateral thickness variations of the same seism-stratigraphic unit (Plio-Pleistocene). Position of the seismic window is marked in Fig. 2A.

tegrada con los resultados de trabajos previos para caracterizar las estructuras (fallas y diapiros arcillosos) en el sector nororiental del Prisma de Acreción del Golfo de Cádiz (PAGC). Se han caracterizado tres sucesiones sismoestratigráficas sobre el PAGC, con edades desde la parte alta del Mioceno Medio hasta la actualidad.

Como resumen del estudio, se presenta un mapa tectónico de las deformaciones en la cobertura sedimentaria del PAGC. Las estructuras son: (1) crestas y diapiros arcillosos orientados NNE-SSO, coincidentes con anticlinales amplios, localmente con campos de volcanes de fango (VF) en sus culminaciones (Fig. 2C y 3); (2) depocentros paralelos con adelgazamientos progresivos de las sucesiones sedimentarias hacia el techo de los diapiros, lo que corrobora la ascensión diapírica sinsedimentaria (Fig. 2C); (3) fallas lítricas, sin-sedimentarias (al menos desde el Plioceno) que se enraizan en las arcillas del propio PAGC mediante despegues subhorizontales ("shale detachments"); y (4) fallas con una componente de salto en dirección sinistrorso (Fig. 4).

Se interpreta que simultáneamente a la imbricación y avance del PAGC hacia el O, se desarrollan importantes procesos diapíricos que condicionaron la arquitectura estratigráfica de las sucesiones post-Mioceno Medio. Un modelo estructural sintético se ilustra en la figura 5 (adaptado de Rowan *et al.*, 1999),

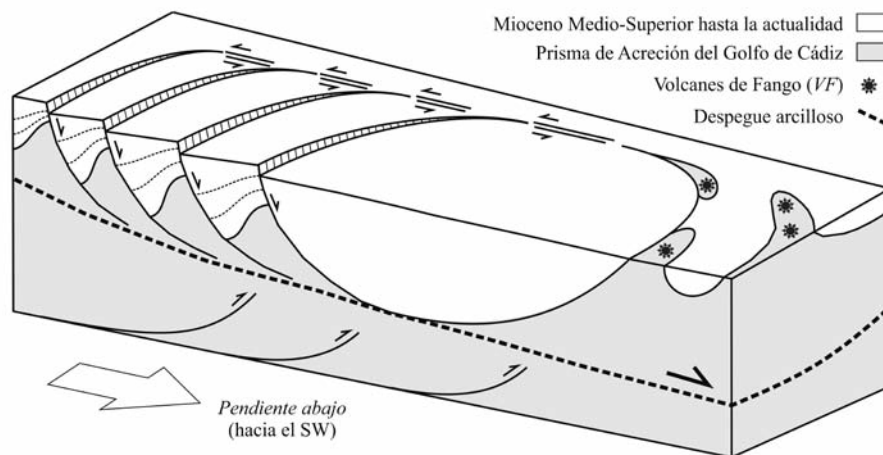


Fig. 5 – Bloque diagrama esquemático mostrando el estilo estructural de las deformaciones Neógenas al oriente del PAGC (adaptado de Rowan *et al.*, 1999).

Fig. 5 – Schematic diagram block showing the structural style of the Neogene deformations in the east of the AWGC (adapted from Rowan *et al.*, 1999).

donde las fallas normales sin-sedimentarias están conectadas a segmentos de salto en dirección sinistrorsos correspondientes a fallas de transferencia que conectan las estructuras extensionales talud arriba, con el ascenso de diapiros arcillosos, y un sistema compresional pendiente abajo, al SO del área de estudio. Es allí donde mejor se desarrollan los diapiros arcilloso y campos de VF (e.g., Somoza *et al.*, 1999, Fernández-Puga *et al.*, 2007; Medialdea *et al.*, 2009).

Dada su localización, habría que considerar la posible influencia y contribución del aporte sedimentario del Río Guadalquivir en la estructuración superficial del sector NE del PAGC, aunque este es un aspecto que podría abordarse con datos de mayor densidad y resolución hacia la plataforma continental al N.

Agradecimientos

Este trabajo no sería posible sin el apoyo y facilitación de los datos a través del Prof. Juan Ignacio Soto. Es una contribución del grupo de investigación RNM-376 de la Junta de Andalucía. Los autores agradecen al equipo de GESSAL en el Archivo Técnico de Hidrocarburos (ATH). Por último y no menos importante, agradecemos a las constructivas revisiones de Cesar R. Ranero y un revisor anónimo por sus sugerencias para la mejora del trabajo.

Referencias

Dimitrov, L.I. (2002). *Earth Science Reviews* 59, 49–76.
Fernández-Puga, M.C., Vázquez, J.T., Somoza, L.,

Díaz del Río, V., Medialdea, T., Mata, M.P. y León, R. (2007). *Geo-Marine Letters* 27, 213–221.

Kopf, A. (2002). *Reviews of Geophysics* 40, 1–51.
Maldonado, A., Somoza, L. y Pallarés, L. (1999). *Marine Geology* 155, 9–43.

Medialdea, T., Vegas, R., Somoza, L., Vázquez, J. T., Maldonado, A., Díaz-del-Río, V., Maestro, A., Córdoba, D. y Fernández-Puga, M.C. (2004). *Marine Geology* 209, 173–198.

Medialdea, T., Somoza, L., Pinheiro, L. M., Fernández-Puga, M.C., Vázquez, J.T., León, R., Ivanov, M. K., Magalhães, V., Díaz del Río, V. y Vegas, R. (2009). *Marine Geology* 261, 48–63.

Noda, A. (2013). En: *Mechanism of Sedimentary Basin Formation* (Y. Itoh, Ed.). InTech Press, 27–57.

Ramos, A., Fernández, O., Terrinha, P. y Muñoz, J.A. (2015). *International Journal of Earth Sciences* 105, 1663–1679.

Rowan, M.G., Jackson, M.P.A. y Trudgill, G.D. (1999). *AAPG Bulletin* 83, 1454–1484.

Serpelloni, E., Vannucci, G., Pondrelli, S., Argnani, A., Casula, G., Anzidei, M., Baldi P. y Gasperini, P. (2007). *Geophysical Journal International* 169, 1180–1200.

Somoza, L., Maestro, A. y Lowrie, A. (1999). *Offshore Technology Conference OTC-12202*, 571–577.

Somoza, L., Díaz del Río, V., León, R., Ivanov, M., Fernández-Puga, M.C., Gardner, J.M., Hernández-Molina, F.J., Pinheiro, L.M., Rodero, J., Lobato, A., Maestro, A., Vázquez, J.T., Medialdea, T. y Fernández-Salas, L.M. (2003). *Marine Geology* 195, 153–176.

Zitellini, N., Gràcia, E., Matias, L., Terrinha, P., Abreu, M.A., DeAlteriis, G., Henriët, J.P., Dañoibeitia, J.J., Masson, D.G., Mulder, T., Ramella, R., Somoza, L. y Diez, S. (2009). *Earth and Planetary Science Letters* 280, 13–50.