

Volcanes de fango y tectónica en el Golfo de Cádiz

Mud volcano development and tectonics in the Gulf of Cadiz

T. Medialdea¹, L. Somoza¹, T. Vázquez², R. León¹, M.C. Fernández-Puga³, R. Vegas⁴ y V. Díaz-del-Río³

1 Instituto Geológico y Minero de España, C/Ríos Rosas nº 23, E-28003 Madrid, España

2 Instituto Español de Oceanografía, Puerto Pesquero s/n, E-29640 Fuengirola, España

3 Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Cádiz, E-11510 Puerto Real, España

4 Depto. de Geodinámica, Fac. C. Geológicas, Universidad Complutense, 28040-Madrid, Spain

Resumen: Se han identificado en el Golfo de Cádiz numerosas estructuras asociadas al escape de fluidos: volcanes de fango, montículos de fango con chimeneas carbonatadas y pockmarks. La mayor parte de los volcanes de fango se encuentran en el margen bético rifeño, a profundidades de 400-1400 m, y siguiendo una dirección NE-SW y NW-SE. Así mismo se han reconocido también algunos volcanes de fango dispersos en el talud inferior a profundidades de 2400-3900 m de profundidad. En el Golfo de Cádiz la actividad tectónica relacionada con el régimen compresivo general (NW-SE) constituye el principal factor de control en la migración de fluidos. La adquisición de perfiles sísmicos en el talud continental ha permitido cartografiar y caracterizar las estructuras tectónicas dominantes: cabalgamientos, fallas extensionales y fallas en dirección, así como diapiros y analizar su relación con el desarrollo de volcanes de fango en diferentes sectores del margen. Todas estas estructuras tectónicas han proporcionado vías de escape a fluidos y sedimentos sometidos a sobrepresión y han favorecido su migración a través de la columna sedimentaria para finalmente llegar a construir volcanes de fango.

Palabras clave: Volcanes de fango, Diapirismo, Tectónica, Golfo de Cádiz.

Abstract: Numerous structures associated with fluid escape have been identified in the Gulf of Cadiz: mud volcanoes, carbonate-mud mounds bearing carbonate chimneys and pockmarks. Most of the mud volcanoes are found in the eastern domain of the Gulf of Cadiz, which corresponds to the Betic-Rifean Margin, at 400-1400 m depth, following NE-SW and NW-SE trends. Scattered mud volcanoes have also been recognized in the lower slope at 2400-3900 m depth. In the Gulf of Cadiz, structures related to the NW compressive regime represent the major control for fluid migration. Acquisition of seismic profiles along the continental slope allows us to map and characterize the dominant tectonic structures: thrust faults, extensional faults, strike-slip faults as well as diapirs and analyze its relationship with mud volcano development in different sectors of the margin. All these tectonic structures have provided escape pathways for overpressured material and fluids or have favoured the upwards fluid movement along the sedimentary column and eventually the build-up of mud volcanoes.

Key words: Mud volcanoes, Diapirism, Tectonics, Gulf of Cadiz.

INTRODUCCIÓN

El talud continental del Golfo de Cádiz presenta una serie de rasgos geológicos interrelacionados como son: a) su amplio desarrollo y su irregular fisiografía, b) la existencia de un cuerpo caótico que ocupa la parte central del Golfo de Cádiz, que se ha denominado Unidad del Golfo de Cádiz (UGC); c) el desarrollo de una tectónica compleja con importantes fenómenos diapíricos, d) presencia de gas e hidratos de gas y finalmente e) formación de numerosas estructuras asociadas a escapes de fluidos (Fig.1). Los datos recogidos durante las campañas oceanográficas realizadas durante los últimos cinco años en el margen continental del Golfo de Cádiz han puesto de manifiesto la existencia de numerosas estructuras asociadas al escape de fluidos: pockmarks, montículos carbonatados con chimeneas carbonatadas y volcanes de fango (Fig. 1). Los 40 volcanes de fango identificados hasta el

momento en el talud continental corresponden a edificios de forma cónica de 800 a 3500 m de diámetro y hasta 300 m de altura, cuyo formación se produce por erupciones de fango y fluidos con hidrocarburos, relacionados con procesos de desgasificación en reservorios profundos (Somoza *et al.*, 2003; Pinheiro *et al.*, 2003; Van Rensbergen *et al.*, 2005; León *et al.*, 2006; Fernández-Puga *et al.*, 2007)

Los perfiles sísmicos obtenidos han proporcionado la posibilidad de estudiar el desarrollo del volcanismo de fango en un área tectónicamente activa como es el Golfo de Cádiz. La estructura actual del Golfo de Cádiz es el resultado de movimiento convergente de las placas euroasiática y africana que se produce desde el Oligoceno medio hasta el Mioceno superior y que continua con una lenta convergencia hacia el NW desde el Mioceno superior hasta la actualidad, y la formación del orógeno bético-rifeño (Vázquez y Vegas, 2000). La

deriva hacia el W y colisión del Dominio de Alborán con los márgenes sudibérico y africano causó la formación de la Cadena Bético-Rifeña y el emplazamiento radial de grandes masas caóticas en el Golfo de Cádiz (Unidad del Golfo de Cádiz), Cuenca del Guadalquivir y Cuenca del Rharb (Somoza *et al.*, 1999; Maldonado *et al.*, 1999). El talud continental, que se extiende desde los 140 m de profundidad hasta las llanuras abisales de la Herradura y el Sena, se caracteriza por una cobertera sedimentaria formada por materiales de edad Triásica a Cuaternaria, con un espesor que varía de 2-2.5 s (T.D.) en el talud medio a 2-3.5 s (T.D.) en el talud inferior (Medialdea *et al.*, 2004). La UGC presenta una forma de cuña y constituye la unidad más potente de esta cobertera (Fig. 1). Está formada por evaporitas triásicas, calizas cretácicas y paleógenas y margas miocenas. La etapa de emplazamiento principal de la UGC tuvo lugar en el Tortoniense superior, aunque posteriormente fue reactivada como consecuencia de la compresión NW del Mioceno superior hasta la Actualidad.

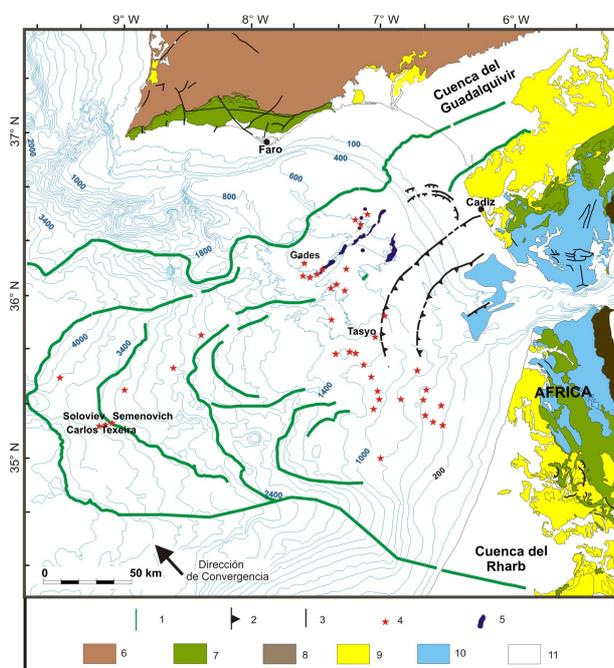


FIGURA 1. Mapa de situación de los volcanes de fango. 1- Límite externo y frentes de la UGC; 2. Cabalgamiento; 3. Falla; 4. Volcanes de fango; 5. Dorsales diapíricos; 6. Zona Surportuguesa; 7. Mesozoico (Cuenca del Algarve y Zonas Externas Béticas); 8. Zonas Internas Béticas; 9. Mioceno; 10. Unidades del Flysch. 11. Plioceno-Cuaternario

En este contexto geológico el objetivo de este trabajo es el estudio de los perfiles sísmicos adquiridos en el proyecto TASYO con el fin de analizar y documentar la estructura completa del sistema de los volcanes de fango y la relación entre su génesis y la tectónica en diferentes sectores del talud continental.

DATOS Y RESULTADOS

La adquisición de datos se llevó a cabo durante las campañas oceanográficas realizadas a bordo del B.O. "Hesperides" y del B.O. "Cornide de Saavedra" en el periodo 2000-2001 en el marco del Proyecto TASYO.

Durante estas campañas se adquirieron datos batimétricos con sonda multihaz (Simrad EM-12), perfiles sísmicos de reflexión multicanal y de alta-media resolución con un sistema TOPAS (Topographic Parametric Echosounder), con una penetración máxima de unos 100 m y Sparker (3500-7000 J), con un tiempo de registro de 2 s. Los 1728 km de perfiles de sísmica multicanal se obtuvieron en la campaña TASYO utilizando como fuente cañones de aire de 22.45 y 34.8 litros de capacidad y un streamer de 2.5 km de longitud, siendo el tiempo de registro de 10 s. La interpretación de todos estos perfiles permitió la selección de áreas de interés en las que posteriormente se recogieron muestras mediante draga y testigo de gravedad.

De la interpretación de los perfiles sísmicos se deduce que la tectónica constituye un factor de control determinante en la migración de fluidos y formación de volcanes de fango (Somoza *et al.*, 2003; Medialdea *et al.*, 2004; Fernández-Puga *et al.*, 2007). En el Golfo de Cádiz, las principales estructuras tectónicas identificadas en los perfiles sísmicos en el talud son de dirección NE-SW, ENE-WSW, E-W, NW-SE y WNW-ESE y corresponden a cabalgamientos, fallas en dirección con una importante componente compresiva, fallas extensionales y diapiros. Se han diferenciado dos tipos de diapirismo en el Golfo de Cádiz: diapirismo salino relacionado con las evaporitas mesozoicas y un diapirismo margo-salino asociado a la UGC (Medialdea *et al.*, 2004; Fernández-Puga *et al.*, 2007). Los diapiros salinos se concentran en el sector septentrional (plataforma continental y talud superior y medio del margen ibérico) y meridional (margen marroquí) del Golfo de Cádiz, donde aparecen como domos redondeados subaflorantes o aflorantes claramente reconocibles en los mapas batimétricos, aunque también se han encontrado enterrados en el sector central del Golfo de Cádiz. Estas estructuras deforman y llegan a atravesar prácticamente toda la cobertera sedimentaria, incluida la UGC, cuando existe. Los diapiros margo-salinos han sido cartografiados en el margen ibérico y están constituidos principalmente por arcillas y margas miocenas y evaporitas triásicas que se agrupan formando crestas de dirección NE-SW, como las denominadas Dorsal del Guadalquivir y Dorsal de Cádiz (Fig. 1).

Todas estas estructuras han favorecido la migración y extrusión de fluidos y sedimentos sometidos a sobrepresión a lo largo de la columna sedimentaria, para finalmente dar lugar a la construcción en superficie de un volcán de fango. La mayor parte de los volcanes se localizan en el margen bético-rifeño, en el talud superior-medio a profundidades comprendidas entre 300 y 1400 m, tanto en el margen ibérico con una dirección NE-SW (campos Tasyo y Dorsal Diapírica del Guadalquivir, Somoza *et al.*, 2003; Díaz del Río *et al.*, 2003), como en el marroquí donde presentan una dirección NW-SE (Campo de Al Arraiche, Pinheiro *et al.*, 2003; Van Rensbergen *et al.*, 2005). El número de volcanes de fango disminuye drásticamente hacia el oeste en el talud inferior, donde se han reconocido

varios volcanes de fango aislados a profundidades de 1600-3900 m.

En el margen bético-rifeño, los volcanes de fango se encuentran relacionados con diapiros someros/ aflorantes asociados a la UGC que forman crestas NE-SW o enterrados tal y como se observa en los perfiles sísmicos multicanal. Un ejemplo lo constituye el volcán de fango Gades situado sobre un diapiro próximo al Banco del Guadalquivir perteneciente a la Dorsal Diapírica de Doñana (Fig.2). La expulsión de fluidos a través de los sedimentos y la consecuente deficiencia de masa, es responsable de la generación de un colapso gravitacional, tal y como que da reflejado en el perfil sísmico, donde se observan reflectores cóncavos discontinuos bajo el volcán de fango así como fallas normales que se extienden desde el techo del diapiro hasta la superficie del fondo marino (Fig.2). Se observan también facies transparentes indicativas de la existencia de gas. En otros casos los volcanes de fango aparecen asociados a diapiros más profundos (1350 m de profundidad desde el fondo del mar), como ocurre con el volcán Tasyo, situado al sur de las dorsales diapíricas (Fig.3). El análisis detallado de los perfiles muestra la existencia de dos edificios enterrados localizados bajo el edificio actual, todos conectados mediante fallas crestales con un diapiro profundo, lo que revela la existencia de varios periodos de actividad.

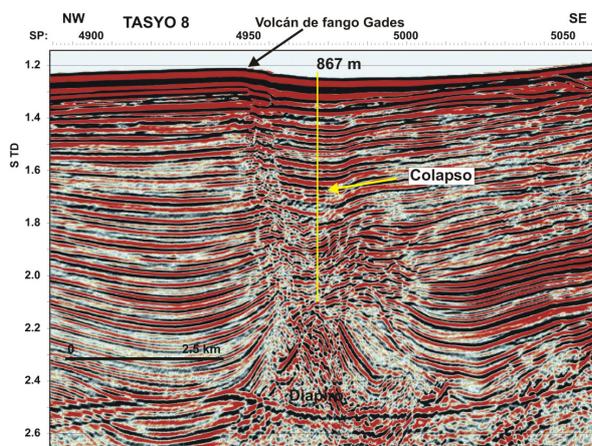


FIGURA 2. Perfil sísmico multicanal TASYO 8 en el área del volcán de fango Gades.

Finalmente, cabe señalar que aunque no han sido objeto de estudio en este trabajo, se han localizado numerosos volcanes de fango en el margen marroquí, generalmente asociados a fallas en dirección NW-SE (Pinheiro *et al.*, 2003).

En el talud inferior solo se han localizado algunos volcanes de fango aislados a 2400-3900 m de profundidad en el marco del proyecto MVSEIS y en las campañas TTR (Pinheiro *et al.*, 2003). Tres de estos volcanes, denominados Semenovich, Soloviev y Carlos Texeira han sido cortados por la línea de sísmica multicanal Tasyo 1 a unos 3400 m de profundidad, cerca de la base del talud inferior y en el sector donde la UGC alcanza los máximos espesores. En este sector, la

base de la UGC aparece como un reflector continuo que desaparece debajo de los volcanes de fango, debido a la existencia de un diapiro salino enraizado por debajo de la UGC y que la atraviesa. Además debe señalarse que el desarrollo de estos volcanes está también controlado por fallas, ya que aparecen planos de cabalgamientos definidos por reflectores de alta amplitud, conectados con el edificio superficial del volcán. Por tanto parece que en una primera fase la migración de fluidos procedentes de reservorios profundos, probablemente situados sobre las evaporitas triásicas, ha estado favorecida en una primera etapa por el diapirismo y posteriormente por fallas.

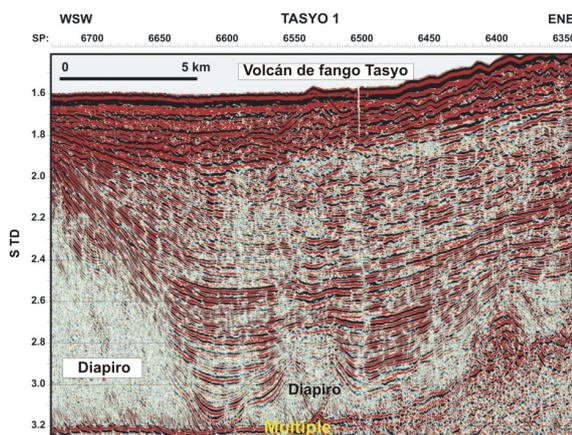


FIGURA 3. Perfil sísmico multicanal TASYO 1 en el área del volcán de fango Tasyo.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Mientras que en el talud inferior los volcanes de fango identificados hasta el momento aparecen aislados, sin que muestren ninguna dirección dominante, en el margen Bético-Rifeño aparecen agrupados formando alineaciones relacionadas con cabalgamientos, fallas en dirección W-E y WNW-ESE y crestas diapíricas NE-SW. De la interpretación de los perfiles sísmicos se deriva que la formación de volcanes de fango en el Golfo de Cádiz comprende dos etapas principales. La migración y extrusión de fluidos y coladas de fango están controladas en una primera fase por el diapirismo y en una segunda fase por diferentes tipos de fallas. Los perfiles sísmicos estudiados indican que todos los volcanes de fango aparecen relacionados con diapiros de distinta naturaleza, aflorantes o localizados a diferentes profundidades de enterramiento que facilitan el ascenso de fluidos y/o actúan como área fuente del fluido. Hasta el momento solo se había relacionado los volcanes de fango con el diapirismo margo-salino que afecta a la UGC, en este trabajo se ha determinado que el desarrollo de diapiros salinos (evaporitas triásicas) también constituyen un factor importante, especialmente en el talud inferior. Las imágenes sísmicas sugieren también que fallas extensionales, fallas en dirección o cabalgamientos actúan como sistemas con diferente complejidad que conectan la fuente con el edificio superficial del volcán de fango.

Para concluir, se ha establecido una estrecha relación entre las estructuras asociadas a escape de fluidos, como son los volcanes de fango, y las estructuras tectónicas relacionadas con el desarrollo del orógeno Bético-Rifeño y la actividad neotectónica que ha tenido lugar bajo el régimen convergente existente entre las placas euroasiática y africana, que constituye el factor de control principal en la migración de fluidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos TASYO (MAR 98-0209) y GADES (REN2002-04117-C03/MAR). Este trabajo también constituye una contribución a los proyectos EuroCORE-EuroMARGINS MVSEIS (O1-LEC-EMA24F/PDCTM72003/DIV/40018, REN2002-11669-EMAR) y MOUNDFORCE (O1-LEC-EMA06F, REN2002-11668-E-MAR) de la ESF y al proyecto 2010 CSD2006-0041-“TOPOIBERIA”. Agradecemos a todos los participantes en las campañas oceanográficas su trabajo durante la adquisición de los datos.

REFERENCIAS

- Díaz-del-Río, V., Somoza, L., Martínez-Frías, J., Mata, M.P., Delgado, A., Hernández-Molina, F.J., Lunar, R., Martín-Rubí, J.A., Maestro, A., Fernández-Puga, M.C., León, R., Llave, E., Medialdea, T., Vázquez, J.T. (2003): Vast fields of hydrocarbon-derived carbonate chimneys related to the accretionary wedge/olistostrome of the Gulf of Cádiz. *Marine Geology*, 195: 177-200.
- Fernández-Puga, M.C., Vázquez, J.T., Somoza, L., Díaz del Río, V., Medialdea, T., Mata, M.P., León, R. (2007): Gas-related morphologies and diapirism in the Gulf of Cádiz. *Geo-Marine Letters*, Doi: 10.1007/s00367-007-0076-0.
- León, R., Somoza, L., Medialdea, T., Maestro, A., Díaz-Del-Río, V., Fernández-Puga, M.C. (2006): Classification of sea-floor features associated with methane seeps along the Gulf of Cádiz continental margin. *Deep-Sea Research. II*, 53:1464-1481.
- Maldonado, A., Somoza, L., Pallarés, L. (1999): The Betic orogen and the Iberian-African boundary in the Gulf of Cádiz: geological evolution (central North Atlantic). *Marine Geology*, 155: 9-43.
- Medialdea, T., Vegas, R., Somoza, L., Vázquez, J.T., Maldonado, A., Díaz-del-Río, V., Maestro, A., Córdoba, D., Fernández-Puga, M.C. (2004): Structure and evolution of the "Olistostrome" complex of the Gibraltar Arc in the Gulf of Cádiz (eastern Central Atlantic): evidence from two long seismic cross-sections. *Marine Geology*, 209: 173-198.
- Pinheiro, L., Ivanov, M.K., Sautkin, A., Akhmanov, G., Magalhães, V., Volkonskaya, A., Monteiro, J.H., Somoza, L., Gardner, J., Hamouni, N., Cunha, M.R. (2003): Mud volcanism in the Gulf of Cádiz: results from the TTR-10 cruise. *Marine Geology*, 195: 131-151.
- Somoza, L., Maestro, A., Lowrie, A. (1999): Allochthonous blocks as hydrocarbon traps in the Gulf of Cádiz. *Offshore Technology Conference*, OTC 10889, 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., Fernández-Salas, L.M. (2003): Seabed morphology and hydrocarbon seepage in the Gulf of Cádiz mud volcano area: Acoustic imagery, multibeam and ultrahigh resolution seismic data. *Marine Geology*, 195: 153-176.
- Van Rensbergen, P., Depreiter, D., Pannemans, B., Moerkerke, G., van Rooij, D., Marsset, B., Akhmanov, G., Blinova, V., Ivanov, M., Rachidi, M., Magalhaes, V., Pinheiro, L., Cunha, M., Henriot, J.P. (2005): The Arraiche mud volcano field at the Moroccan Atlantic slope, Gulf of Cádiz. *Marine Geology*, 219: 1-17.
- Vázquez, J.T., Vegas, R. (2000): Estilos diferentes de deformación en el límite de placas entre Africa y Eurasia, desde el Arco de la Herradura al Mar de Alborán. *2º Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, 19: 147-148.