

## Emplazamiento de algunas estructuras submarinas relacionadas con la tectónica salina y la expulsión de gases en el talud superior y medio del Golfo de Cádiz

Emplacement of some submarine structures related to salt tectonics and leaking gasses in the upper and middle slope of the Gulf of Cádiz

V. Díaz-del-Río (1), L. M. Fernández-Salas (2), G. Bruque (1), F. J. López (1), J. L. Rueda (1), J. T. Vázquez (1), N. López-González (1), E. González-García (1), D. Palomino (1), O. Sánchez (3), T. Oporto (3), C. Rittierott (1), S. Rodríguez-Polo (3), M. Goicoechea (4), D. Gutiérrez (4), F. J. Monroy (4)

(1) Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Málaga. diazdelrio@ma.ieo.es

(2) Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Cádiz.

(3) Universidad de Cádiz, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales.

(4) Instituto Hidrográfico de la Marina.

A set of methane expulsion related geomorphic structures has been geophysically prospected and sampled (sediment and benthos) in the upper continental slope of the Gulf of Cádiz. There are a well known group of features that has been described in past papers mainly focused to the description of mud volcanoes, pockmarks, diapiric outcrops placed in the continental margin of the gulf that are related to mud diapirism and methane expulsion. In this study we discuss the nature of some geomorphic features recently identified and composed by pavements, slabs, muddy gas saturated deposits and chimneys which are mainly formed by carbonates resulting from microbial oxidation of gas emissions.

**Palabras clave:** Golfo de Cádiz, Talud Superior, relieves metanogénicos, diapirismo salino.

**Keywords:** Gulf of Cadiz, Upper Slope, metanogenic features, salt diapirism.

### INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de expulsión e infiltración de fluidos asociados a sedimentos, son bastante frecuentes en diversos ambientes subaéreos y submarinos. La importancia ambiental del fenómeno reside en su contribución de gases invernadero a la atmósfera (fundamentalmente metano), aspecto que puede ser un factor multiplicador, no suficientemente evaluado, del Cambio Climático. Cuando los fenómenos de expulsión tienen lugar en el fondo marino, se producen cambios sustanciales en la superficie de los depósitos y en el interior de las series sedimentarias superiores, modificando notablemente los relieves preexistentes y generando nuevas geoformas que evolucionan condicionadas por la intensidad y frecuencia de la expulsión.

En este impacto, y a microescala, puede haber una importante contribución de la fauna excavadora existente en las zonas de expulsión, cuando se produce en los márgenes continentales, donde la diversidad faunística y la actividad biológica son superiores a la existente en los fondos más profundos. Entonces, los flujos de metano pueden activarse al ser reconducidos a través de las galerías excavadas por la epi- y endo-fauna, consiguiendo así que el metano alcance más rápidamente la superficie del fondo modificando la microfisiografía en el entorno al punto de expulsión.

La principal consecuencia de la expulsión sobre la superficie del fondo marino es la transformación de un fondo de tipo blando, compuesto por sedimentos disgregados de diversa granulometría, a otro de carácter consolidado o rocoso, compuesto por los fragmentos de roca, resultantes de la precipitación de carbonatos

facilitada por las reacciones bacterianas al oxidar anaeróticamente el metano.

El Golfo de Cádiz es uno de los casos paradigmáticos en los que el fenómeno de expulsión de fluidos cargados en gas ha traído como resultado la formación de una gran diversidad de relieves y hábitats que están siendo estudiados en la actualidad. En este trabajo se discuten algunos rasgos morfológicos de los relieves que han sido prospectados en los tres últimos años (Fernández-Salas, 2012) y que han permitido identificar con detalle la naturaleza del fondo marino y los hábitats específicos que sobre ellos se desarrollan (Rueda et al., 2011). Los datos que se presentan en este trabajo se han tomado en el contexto del Proyecto LIFE+ INDEMARES/CHICA.

### MATERIAL Y METODOS

Se han analizado un conjunto de datos batimétricos obtenidos en dos de las cuatro campañas oceanográficas realizadas en el Proyecto INDEMARES/CHICA. Las zonas barridas en detalle se señalan en la Fig 1, observándose que todas ellas se encuadran en el área que hemos denominado Campo Somero de Expulsión de Fluidos (CSEF).

En la campaña INDEMARES CHICA 1011 (B/O Vizconde de Eza) se ha utilizado una ecosonda multihaz Kongsberg Simrad EM-300, que dispone de 135 haces por banda y una apertura de cada haz de 1°x2° operando a una frecuencia de 30 kHz y en un rango de profundidad entre los 10 y 5000m.

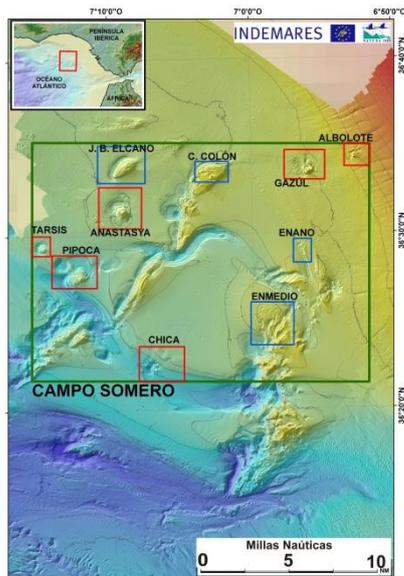


Fig. 1. Situación del Campo Somero de Expulsión de Fluidos (CSEF) saturados en metano, que determinan la formación de los relieves que se discuten en este trabajo.

En la campaña INDEMARES CHICA 0412 (B/O Ramón Margalef) se utilizó la ecosonda multihaz Konsberg Simrad EM-710, que trabaja en un rango de profundidad entre los 3 y los 2000m y a frecuencias entre los 70 y 100kHz. En este caso tiene un novedoso algoritmo de división del abanico de emisión en tres sectores que maximiza su amplia capacidad y permite suprimir interferencias múltiples de los ecos fuertes del fondo. Cada sector emite de forma secuencial en cada disparo y usa distintas frecuencias o formas de ondas. El número de haces es de 256 para un transductor-receptor con anchura de haz de 1°. El sistema es capaz de generar dos barridos longitudinales por disparo, pudiéndose así alcanzar hasta las 800 sondas por barrido.

En ambas campañas se usó un sistema sísmico de muy alta resolución TOPAS PS018, que emite frecuencias en la banda de 16 a 20 kHz (frecuencia primaria) y con una potencia de 30 Kw. Las frecuencias secundarias oscilan en el rango de 0,5 a 4 kHz. Los perfiles sísmicos (TOPAS) se presentan en todas las figuras con líneas de escala horizontal cada 10m y una distancia media entre marcas de tiempo (verticales) de 2.700m.

Junto a este equipamiento hemos utilizado el ROV LIROPUS 2000 (mod. Super MOHAWK II), y el VOR APHIA 2000 (Vehículo de Observación Remolcado) que está equipado con una cámara de fotos Nikon D90, una cámara de video Canon Legria HFR 106 de alta resolución, con dos focos LED autónomos de 18.000 lúmenes cada uno y punteros laser. El sistema se regula con un dispositivo interno que controla los encendidos y apagados de la iluminación y el disparo de la cámara de fotos. Permite adquirir información sobre el cabeceo y balanceo del vehículo, además de toma continua de la temperatura en el lugar prospectado.

## RESULTADOS

La diversidad geomorfológica de los relieves observados es relativamente reducida, aunque su catalogación puede

realizarse de muy diversas maneras (León et al., 2012). Proponemos una clasificación genética en la que incluimos una forma de relieve directamente relacionada con los fenómenos de expulsión y la tectónica diapírica, aunque no se encuentre estrictamente vinculado a ninguno de ellos.

## Erosivos

Se forman, fundamentalmente, por el efecto de las corrientes de fondo que al amparo de algunos relieves excavan los sedimentos produciendo depresiones y surcos que evolucionan posteriormente a formas de mayor tamaño. Distinguímos tres tipos:

### Depresiones subcirculares (“scour marks”)

Se forman sobre los depósitos contorníticos y han sido descritos en numerosos lugares (Llave et al., 2007) relacionándose con fenómenos de stress de corriente sobre el fondo. Adquieren formas redondeadas o elongadas. Existen dos grupos principales que se sitúan a poniente de los relieves diapíricos Bicentenario y La Pepa (Fig. 1), y los que se encuentran a poniente del volcán de fango (VF) Anastasya. Existen otras depresiones en las inmediaciones del VF Gazul, en la misma posición que los anteriores, aunque alcanzan un menor tamaño. El VF Anastasya presenta al norte algunos surcos circulares cuyo diámetro máximo es de 275m y una profundidad excavada que no excede de los 8m. Sin embargo, los que se desarrollan a poniente, más alejados del volcán, tienen en planta la misma forma subcircular que los anteriores, con la depresión de forma cónica y dimensiones bastante más elevadas, alcanzando un diámetro máximo de 326m y una profundidad excavada de 14m (Fig. 2).

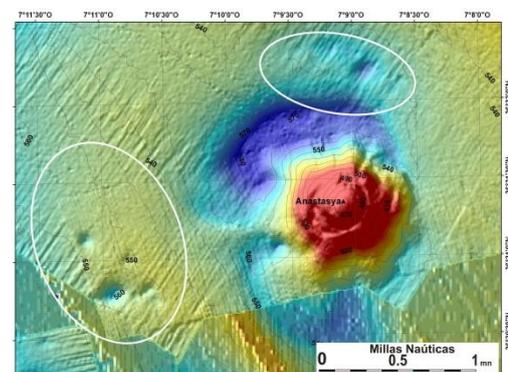


Fig. 2. Situación de las depresiones subcirculares localizados en el entorno del VF Anastasya.

Al E del relieve denominado Bicentenario (Fig.3) hay un grupo de surcos que se desarrollan de forma casi alineada, cuyo diámetro máximo alcanza el valor de 320m con una profundidad de excavación de 7m. No muy lejos de ellos, hacia el NO, se desarrolla otro campo de depresiones de menor tamaño que tienen un diámetro medio de 178m y una profundidad excavada de 4m.

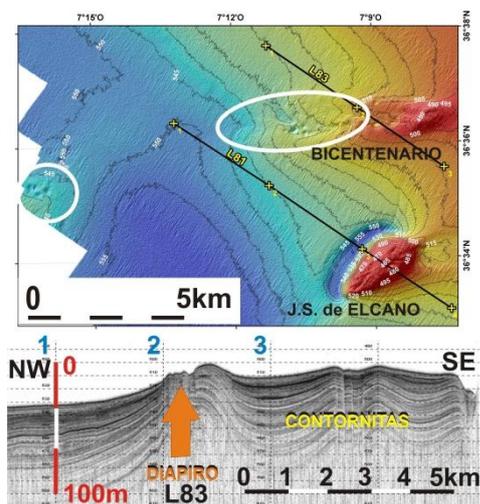


Fig. 3. (Arriba) Situación de los relieves denominados Bicentenario y Juan Sebastián de Elcano, junto con la posición de los perfiles de sismica de muy alta resolución (TOPAS) que se muestran en la imagen inferior y en la Fig. 4. Se ha señalado con un círculo blanco el lugar en el que se encuentran los principales grupos de depresiones subcirculares que se han formado sobre los depósitos contorníticos. (Abajo) Perfil de TOPAS en el que se observa el afloramiento diapírico junto al cual se han desarrollado las depresiones subcirculares.

En las proximidades de la frontera con Portugal, hay otro grupo de surcos que se extienden más allá de la zona comprendida en este estudio y que tienen unas dimensiones similares a las anteriores (diámetro 169 m y profundidad excavada 5m).

#### Fosas ("moats").

Depresiones de pequeñas dimensiones y reducida profundidad excavada sobre los depósitos contorníticos. Bordean los relieves diapíricos más prominentes situándose, por lo general, a poniente del flujo principal de la corriente. Las más importantes se localizan junto a los relieves diapíricos Juan Sebastián de Elcano y Cristóbal Colón (Fig. 1), que condicionan, a su vez, la geometría de los depósitos contorníticos (Fig. 4 y 6).

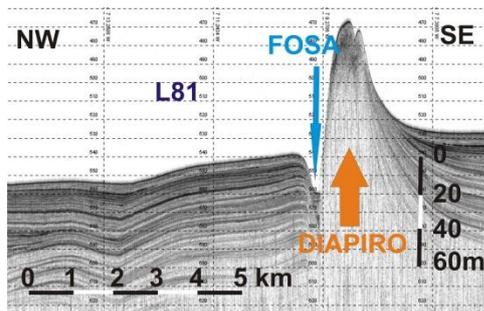


Fig. 4. Perfil de TOPAS levantado sobre el relieve denominado I.S. Elcano. Los depósitos contorníticos se ciñen a la falda del relieve al SE, mientras que se genera una fosa formada por el efecto de las corrientes a poniente del diapírico. La posición del perfil se puede ver en la Fig. 3.

El primero de ellos, forma parte de un conjunto de afloramientos pertenecientes a la unidad diapírica que constituye la Dorsal de Guadalquivir (Fernández-Puga, 2007). Está separado del resto del conjunto diapírico por el Canal Gusano, observándose algunos tramos discontinuos en los que la erosión provocada por la colisión de las corrientes de fondo está comenzando a excavar nuevos surcos que llegan a alcanzar

profundidades de 150m por debajo de la superficie del fondo. La fosa que bordea a poniente este relieve alcanza una longitud total de unos 13 km, y resulta de la unión de un primer tramo elongado junto a otros dos de forma ligeramente circular. El primer tramo, de 531m de longitud, no supera los 20m de profundidad, mientras que los dos siguientes, de 598m y 685m respectivamente, alcanzan una profundidad excavada de 140m. En la Fig. 6 puede observarse el afloramiento Cristóbal Colón junto con la fosa que lo rodea y que transcurre en una dirección NE/SW yendo a desaguar al Canal Gusano.

#### Surcos de drenaje canalizado

En el talud superior se ha excavado una red de canales que pueden actuar como vías de transporte de material desde la plataforma hasta el talud medio, desaguardo en el canal principal por el que circula el agua mediterránea que se expulsa a través del Estrecho de Gibraltar. Los perfiles sísmicos ponen de manifiesto la existencia de acumulaciones de gas en los niveles más subsuperficiales. Se observan algunas chimeneas acústicas por las que podrían estar escapando fluidos, y que favorecerían la mayor profundización de los cauces bajo el efecto de las corrientes de densidad que descienden de la plataforma y que se incorporan a la dinámica del talud (Fig. 5).

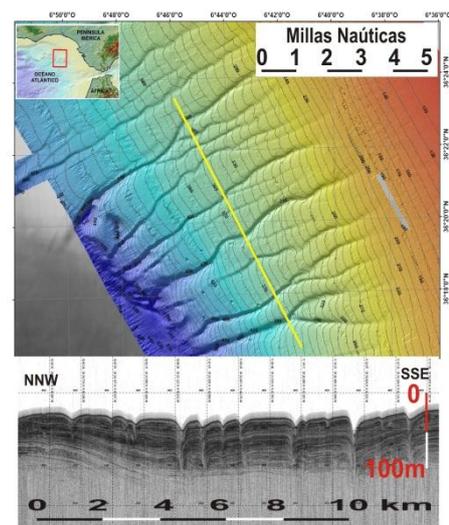


Fig. 5. (Arriba) Imagen de multihaz en la que se observa la red de drenaje canalizado desarrollado en el talud superior. Se señala en amarillo la dirección del perfil que se muestra en la figura de abajo. (Abajo) Perfil de TOPAS atravesando los surcos de drenaje excavados sobre sedimentos saturados de gas. Obsérvense algunas chimeneas acústicas y niveles subhorizontales saturados de fluidos cargados en gas.

#### Afloramientos diapíricos

Los rasgos dominantes de estos relieves han sido discutidos por Fernández-Puga et al. (2007). Las campañas realizadas posteriormente han puesto de manifiesto la existencia de más afloramientos diapíricos que tienen una importancia capital para la comprensión de la morfodinámica de esta parte del golfo, así como para la aparición de ciertos hábitats que son de alto interés natural.

Cuatro son los relieves más destacables que se contemplan en este estudio (Fig. 6): Bicentenario, La

Pepa, Cristóbal Colón y J.S. de Elcano. Otros relieves que poseen la misma génesis diapírica han de ser contemplados en un epígrafe aparte al albergar volcanes de fango en algunas cumbres y abundar estructuras procedentes de la expulsión de fluidos y su posterior consumo por parte de las bacterias. En consecuencia abundan los enlosados y las chimeneas, clara muestra de los episodios de expulsión que experimentan.

Cabe destacar por su menor relieve y ausencia de rasgos que evidencien importantes escapes de fluidos, los dos primeros relieves, que se sitúan más al norte. Se levantan sobre una planicie contornítica subhorizontal, ligeramente inclinada aguas afuera, a una profundidad de unos 500m, alcanzando una altura sobre el fondo de unos 15m. Bicentenario se extiende hacia el oeste unos 2km más allá del relieve principal, mientras que La Pepa tiene unas dimensiones más reducidas, ampliando su superficie hasta alcanzar 1 km de distancia desde la cumbre del relieve principal. Ambos están totalmente recubiertos de sedimentos muy finos, con poca abundancia de especies bentónicas sésiles, lo que junto a la presencia de surcos abundantes y profundos hace pensar que nos encontramos en una zona de muy alto dinamismo.

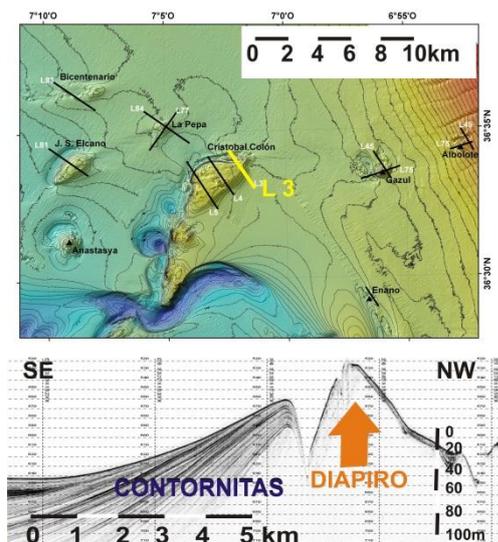


Fig. 6. (Arriba) Localización de los principales relieves diapíricos y localización del perfil de TOPAS que se muestra en la figura de abajo. (Abajo) Perfil de TOPAS levantado sobre el relieve denominado Cristóbal Colón.

El afloramiento Cristóbal Colón, corresponde a la terminación hacia el NE de la Dorsal de Guadalquivir. Es el más complejo de los aquí descritos. Posee una marcada morfología tabular, ligeramente elongada en dirección NE/SW, con unos 6km de longitud y unos 2km de anchura máxima. Se eleva sobre el fondo unos 60m. Su cima está rematada por cuatro pequeños picachos que se han interpretado, a la luz de las observaciones con ROV y VOR, como montículos carbonatados con abundantes restos de *Madrepora oculata*. El montículo más interesante, y en el que se alcanza la cota más elevada es el que se sitúa a levante del afloramiento y que se ha denominado Isabel de Castilla, en el que se han encontrado hábitats de interés

ecológico (agregaciones de gorgonias, campos de *Leptometra phalangium*).

El relieve denominado J.S. de Elcano es de dimensiones más reducidas que el anterior, pero no de menor importancia. Se desarrolla en la misma dirección, NE/SW, y tiene una morfología ligeramente tabular, aunque menos marcada que C. Colón. Levanta sobre el fondo marino unos 50m y se extiende unos 2,5km en la dirección indicada, con una anchura máxima de 1,5km. En la cumbre muestra dos pequeños relieves que podrían corresponderse con otros tantos montículos carbonatados pero que no han podido ser prospectados con ROV.

### Complejo diapiro/volcán

Este tipo de estructura compleja se ha observado por vez primera en el VF Cornide (Fernández Puga et al., 2007), que se encuentra en el margen continental portugués frente a la localidad de Portimão, en la dorsal denominada Fila de Hormigas (Formosa Ridge). El VF Cornide consiste en un reducido cono fuertemente aplacerado desarrollado en la cima de un amplio afloramiento diapírico que constituye, a su vez, la vertiente occidental del activo Canal de Cádiz por el que circula el flujo principal de la vena mediterránea que ha sido expulsada del Estrecho de Gibraltar.

Analizaremos los casos representados por los complejos: Albolote (Fig.7), Enano, Enmedio y Chica. Todos ellos responden al modelo descrito para el VF Cornide.

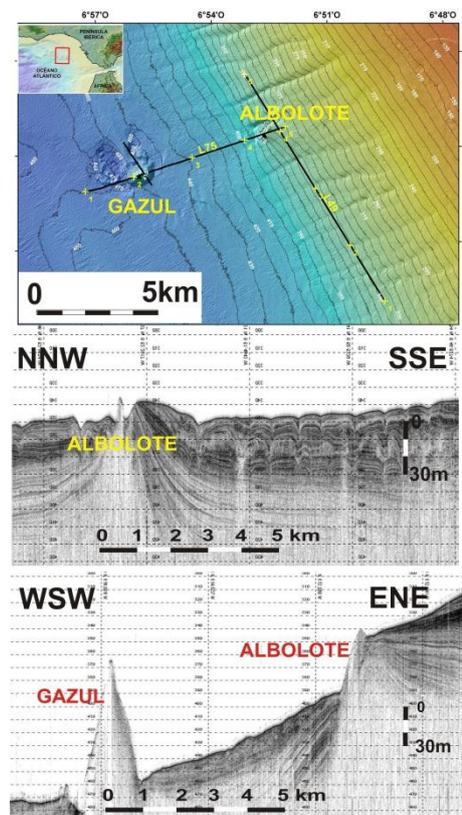


Fig. 7. (Arriba) Localización de los VF Gazul y Albolote, junto con la posición de los dos perfiles de TOPAS que se muestran en esta misma figura. (Centro) Perfil de TOPAS transversal levantado al pie del talud atravesando el VF Albolote y los surcos de drenaje desarrollados sobre depósitos fuertemente gasificados. (Abajo) Perfil de TOPAS, longitudinal al talud

atravesando los VF Albolote y Gazul, ambos formados en la cumbre del diapiro.

El VF Albolote, se encuentra al pie del talud superior en una zona donde la hidrodinámica es muy activa con velocidades de transporte que rondan los 1,5m/s sobre el fondo. El complejo se compone de tres cumbres principales, rodeadas de otras tres de menor relieve y significación. La cima del relieve principal se encuentra a 341m de profundidad y se sitúa en una línea de cumbres de dirección NNE/SSW subparalela a otra similar de menor relieve. Los muestreos han puesto de manifiesto que, si bien hay muestras de antiguas expulsiones, hay signos de expulsiones actuales únicamente en la cumbre principal. El conjunto se encuentra en la desembocadura de uno de los cauces que drenan la plataforma y recorren todo el talud superior hasta alcanzar el inicio del depósito contornítico laminar que compone el conocido Caladero del Laberinto.

Otro caso singular es el del VF Enano (Fig. 8) localizado en la prolongación de la Dorsal de Cádiz hacia el talud superior. Se encuentra encumbrado, a una profundidad de 460m, en un fragmento aislado del diapiro (Fig. 8) que aflora a modo de tres pequeñas crestas alargadas en dirección NNE/SSW. Su geometría es de forma cuasi cónica, con laderas irregulares. Está ocupada por gran cantidad de enlosados y chimeneas dispersas, con abundantes invertebrados sésiles como *Asconema setubalense*.

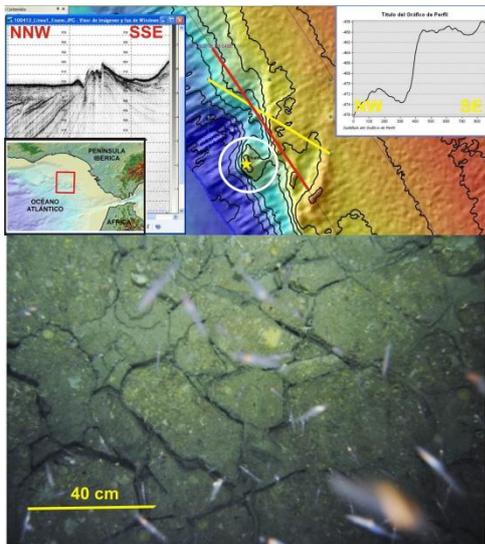


Fig. 8. (Arriba) El VF Enano se encuentra situado sobre las estribaciones de la Dorsal de Cádiz, en el extremo meridional de unas crestas que van siendo recubiertas por sedimentos del talud superior a medida que progresan hacia el norte. En un relieve aislado se puede reconocer el VF rodeado de abundantes estructuras carbonatadas e importantes agregaciones de esponjas hexactinélidas. En el perfil de TOPAS (izquierda) se aprecia la extrusión del domo diapírico (la posición del perfil se señala en la línea roja) y en el perfil batimétrico (señalado en amarillo) se observa la posición de las cumbres de las crestas diapíricas. (Abajo) Fotografía tomada con VOR a 465m de profundidad en la que se aprecian los enlosados compuestos por carbonatos autógenos sobre los que es posible visualizar densos bancos de krill (*Meganycitiphanes norvergica*).

El VF Enmedio se sitúa en un altiplano de forma poligonal con una superficie próxima a los 4km<sup>2</sup>, a una profundidad media de 440m formada a poniente de la Dorsal de Cádiz y constituida por el propio diapiro

subaflorante. Destaca un conjunto de picachos de una decena de metros de altura medidos sobre el nivel de base del altiplano circundante. Las imágenes muestran gran cantidad de costras, enlosados y chimeneas fragmentadas.

Por último, cabe señalar el conjunto de afloramientos diapíricos que constituyen el complejo Chica 1 y 2 (Fig. 9) situado a una profundidad de 660m. Componen un set de afloramientos agrupados en dos conjuntos desarrollados junto a una amplia depresión de forma arriñonada, probablemente de colapso con posterior evolución erosiva, de 1,1km de largo por 600m de ancho y unos 50m de profundidad de excavación máxima. Los dos conos se encuentran separados una distancia de 600m a causa de un surco de drenaje que está desmontando el frente de los depósitos contorníticos laminares aguas afuera. El VF Chica 1, el más meridional, está rodeado de cinco colinas más a profundidades de 710, 690, 665 y dos de 660m. El VF Chica 2 (al norte) es un relieve aislado y de dimensiones algo menores que el anterior.

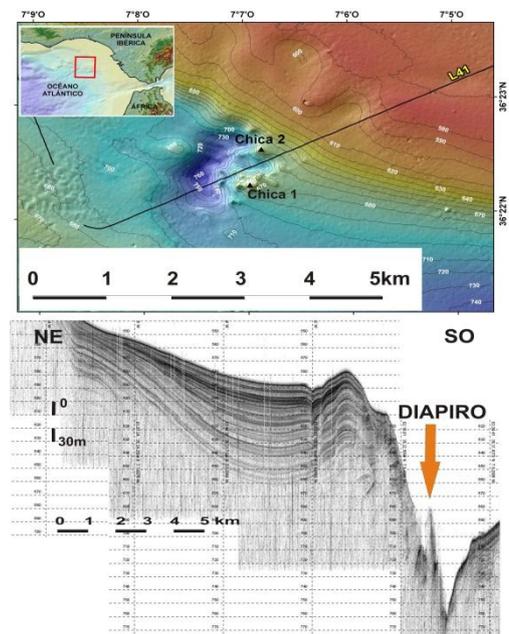


Fig. 9. (Arriba) Situación del perfil de Topas sobre el complejo Chica que se muestra abajo. (Abajo) Perfil de TOPAS levantado sobre el relieve denominado Chica. Se observa la fosa que se produce a poniente y que se ahonda por efecto de las corrientes.

## DISCUSION

La tectónica salina es la responsable de la extrusión de los cuerpos diapíricos en la superficie del fondo que se compone, principalmente, por depósitos contorníticos. Los afloramientos provocan la alteración del régimen de corrientes sobre el fondo y generan algunas estructuras erosivas generadas por el stress de la corriente sobre la superficie de fricción. Los fenómenos de expulsión de fluidos, provocados por la inestabilidad de los hidratos de gas subsuperficiales y por la plasticidad de los diapiros margosos cargados en metano, determinan la formación de pequeños conos de fango que se emplazan en las cumbres de algunos relieves diapíricos. El consumo del metano en superficies horizontales del interior de los depósitos contorníticos, determina la

aparición de enlosados en algunos puntos de emisión, como es el caso de los volcanes de fango descritos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del Proyecto INDEMARES/CHICA (“Inventario y Designación de la Red Natura 2000 en Áreas Marinas del Estado Español: Chimeneas de Cádiz”, INDEMARES-LIFE+ 07/NAT/E/000732), ejecutado por el Instituto Español de Oceanografía y coordinado por la Fundación Biodiversidad. Además se ha contado con fondos FEDER para la construcción del B/O Ramón Margalef (FICTS-2011-03-01). Agradecemos las facilidades dadas por los capitanes y tripulaciones de los buques oceanográficos de las diversas campañas del proyecto: B/O Vizconde de Eza y B/O Ramón Margalef. Nuestro agradecimiento a la jefa de Gestión del Centro Oceanográfico de Málaga Doña M<sup>a</sup> José Navarro, y a José Luís Vargas Poncini y Carmen Peñas, cuyo trabajo ha permitido cumplir con las exigencias de la programación científica.

## REFERENCIAS

- Fernández-Salas, L.M. (2012). Informe Final de la Campaña INDEMARES/CHICA 0412. 48 pp.
- Fernández-Puga, M.C., Vázquez, J.T., Somoza, L., Díaz del Río, V., Medialdea, T., Mata, M.P. and León, R. (2007). Gas-related morphologies and diapirism in the Gulf of Cádiz. *Geo-Marine Letters*, 27:213-221.
- León, R., Somoza, L., Medialdea, T., Vázquez, J.T., González, F.J., López-González, N., Casas, D., Mata, M.P., Fernández-Puga, M.C., Gimenez-Moreno, C.J. and Díaz-del-Río, V. (2012). New discoveries of mud volcanoes in the offshore Moroccan Atlantic margin (Gulf of Cádiz): morpho-structural characterization. *Geo-Marine Letters*, DOI 10.1007/s00367-012-0275-1.
- Llave, E., Hernández-Molina, F. J., Somoza, L., Stow, D. and Díaz del Río, V. (2007). Quaternary evolution of the Contourite Depositional System in the Gulf of Cadiz. In: Viana, A., Rebesco, M. (Eds.), *Economic and Paleoceanographic Importance of Contourites*. Geological Society of London, Special Publication, 276: 49-79.
- Rueda, J.L., Díaz-del-Río, V., Sayago-Gil, M., López-González, N., Fernández-Salas, L.M. and Vázquez, J.T. (2011). Fluid venting through the seabed in the Gulf of Cadiz (SE Atlantic Ocean, western Iberian Peninsula): Geomorphic features, habitats and associated fauna. In: Harris, P.T & Baker, E.K. (eds.) *Seafloor geomorphology as benthic habitat: Geohab atlas of seafloor geomorphic features and benthic habitats*. Elsevier, 831-841.