

Propuesta sismotectónica para la terminación oriental de la Zona de Fractura Azores – Gibraltar entre el Banco de Gorringe y el Banco del Guadalquivir

A seismotectonic proposal for the eastern end of the Azores-Gibraltar Fracture Zone in the area comprised between the Gorringe and the Guadalquivir Banks

Francisco M. Alonso Chaves, Encarnación García Navarro, Manuel A. Camacho Cerro y Carlos Fernández

Departamento de Geodinámica y Paleontología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva. Campus de El Carmen, 21071-Huelva. alonso@uhu.es; navarro@uhu.es; manuel.camacho@dgeo.uhu.es; fcarlos@uhu.es

ABSTRACT

This work describes the eastern part of the Azores-Gibraltar Fracture Zone and it proposes, mainly based on seismic data, the activity of a restraining bend consisting of NE-SW reverse faults and E-W-oriented strike-slip faults. A review of geological and geophysical data, including seismic reflection profiles and the use of catalogs of instrumental seismicity for the period 2004-2010, allow to define this restraining bend as a huge dextral transpression zone, with a rhomboidal shape in plan view, outlining the present-day boundary between the African and Eurasian plates at the segment comprised between the Gloria Fault and the Gibraltar Arc. The plate kinematics at this boundary is consistent with the estimated pattern of NNW-SSE-trending S_H trajectories.

Key-words: Seismotectonics, active fractures, S_H transpression, Azores-Gibraltar Fracture Zone.

RESUMEN

Este trabajo describe la terminación oriental de la Zona de Fractura Azores-Gibraltar y se propone, basándonos de datos sísmicos, la existencia de una zona de "restraining bend" formada por fallas inversas de dirección NE-SO y fallas E-O de desplazamiento en dirección. A partir de una revisión de datos geológicos y geofísicos, incluyendo perfiles sísmicos de reflexión y el registro instrumental de la sismicidad para el periodo 2004-2010, hemos podido definir el citado "restraining bend" como una importante zona transpresiva dextrorsa, con una forma romboidal -en planta-, ligada al límite actual entre las placas Africana y Euroasiática, y comprendida entre la Falla Gloria y el Arco de Gibraltar. La cinemática de las placas en dicho límite es congruente con la orientación del patrón estimado para las trayectorias de S_H : NNO-SSE.

Palabras clave: Sismotectónica, fracturas activas, S_H transpresión, Zona de Fractura Azores-Gibraltar.

Geogaceta, 50-1 (2011), 11-14.
ISSN:2173-6545

Fecha de recepción: 15 de Febrero de 2011
Fecha de revisión: 28 de Abril de 2011
Fecha de aceptación: 27 de Mayo de 2011

Introducción

En este trabajo presentamos una reinterpretación de la sismicidad y la fracturación asociada a los focos sísmicos en una zona comprendida entre la longitud 7° O y 13° O y la latitud 36° N y 37° N, en donde se concentra la mayor parte del registro sísmico de la región, como se indicará más adelante (Fig. 1). El área investigada incluye el borde septentrional de la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz y la alineación de bancos y relieves submarinos situados al norte de dicha unidad. Esta región, definida al oeste del Estrecho de Gibraltar, es de especial interés sismotectónico porque en ella se encuentra la terminación oriental de la Zona de Fractura Azores-Gibraltar. En el área objeto de este estudio dicha zona se define por una banda sismogénica con

una sismicidad distribuida (Vázquez y Vegas, 2000). Al oeste del área estudiada la Falla Gloria completa la zona de fractura. Se trata de una falla transformante oceánica, de cinemática lateral derecha, a lo largo de la cual se localiza el límite entre las placas Euroasiática y Africana.

Los resultados que aquí presentamos, basados en: i) la distribución de los focos sísmicos, ii) la definición de las trayectorias de esfuerzo máximo en la horizontal (S_H) a partir de los mecanismos focales, y finalmente iii) la cartografía de las familias de fallas activas y su cinemática, tomadas en gran medida de las aportaciones realizadas por autores anteriores, nos permiten plantear un esquema explicativo del reparto de la deformación en términos sismotectónicos, a lo largo de un límite de placas de primer orden.

Es importante resaltar que el propósito de esta contribución es avanzar una nueva interpretación sismotectónica de la zona estudiada. No se pretende discutir la estructura del Golfo de Cádiz ni su larga evolución tectónica, aspectos sobre los que existe una muy abundante bibliografía (véase, p. ej., Medialdea, 2004; Zitellini *et al.*, 2004; Terrinha *et al.*, 2009; Zitellini *et al.*, 2009).

Fisiografía del fondo submarino

En la figura 1 puede observarse la complejidad de la batimetría del fondo marino, donde destaca la existencia de llanuras abisales a unos 5000 m de profundidad como las del Tajo y La Herradura. Entre los paralelos 36° y 37° N hay una serie de relieves submarinos muy abruptos, con pendientes fuertemente inclinadas, que describen una

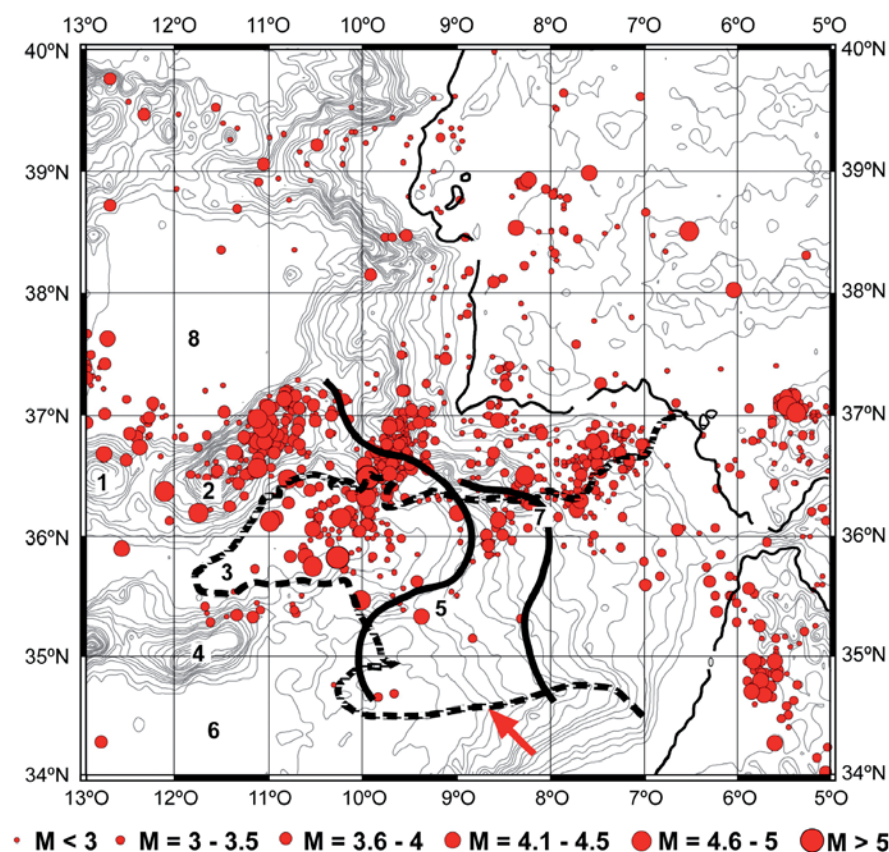


Fig. 1.- Sismicidad en el Golfo de Cádiz y áreas adyacentes para el periodo 2004-2010. M: Magnitud de los terremotos. Línea discontinua gruesa: Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz. Las líneas continuas gruesas delimitan la litosfera de características transicionales entre oceánica (al oeste) y continental (al este y norte), según Medialdea (2004). 1: Relieve Hironnelle; 2: Banco de Goringe; 3: Llanura abisal de La Herradura; 4: Monte Coral Patch; 5: Cresta Coral Patch; 6: Llanura abisal del Sena; 7: Banco del Guadalquivir; 8: Llanura abisal del Tajo. La flecha indica la dirección de movimiento relativo de la placa africana con respecto a la placa euroasiática.

Fig. 1.- Seismicity in the Gulf of Cadiz and adjacent regions for the period 2004-2010. M: Earthquake magnitude. Thick solid line: Allochthonous Unit of the Gulf of Cadiz. The thick dashed lines are bounding the oceanic-continental transitional lithosphere segment defined by Medialdea (2004). 1: Hironnelle seamount; 2: Goringe Bank; 3: Horseshoe abyssal plain; 4: Coral Patch seamount; 5: Coral Patch ridge; 6: Seine abyssal plain; 7: Guadalquivir Bank; 8: Tagus abyssal plain. The arrow points to the local displacement of the African Plate relative to the Eurasian Plate.

alineación topográfica arqueada, como el sistema montañoso Hironnelle-Goringe. Al Sur de dicho sistema montañoso, y de manera paralela a él, hay otro alineamiento de relieves submarinos que describen una estructura en arco, definido por los montes submarinos Ampère y Coral Patch-Cresta Coral Patch, que separa las llanuras abisales de La Herradura y del Sena.

El margen continental en el SO de Iberia destaca por la orientación del talud continental aproximadamente N-S al norte del Cabo de San Vicente. El margen continental al este del Cabo San Vicente, en la transversal del Algarve, se caracteriza por una orientación E-O y por la aparición de relieves submarinos que tienden a desarrollarse de forma paralela al talud, entre los que cabe citar el Banco del Guadalquivir. En el

cuadrante suroriental del área estudiada destaca especialmente la geometría de una gigantesca estructura en forma de abanico (la Unidad Alóctona del Golfo de Cadiz), enorme cuña formada por un conjunto de láminas cabalgantes (p. ej., Vázquez *et al.*, 2004).

Sismicidad

La sismicidad en el área estudiada se concentra preferentemente a lo largo de una banda de dirección E-O, entre los meridianos 7° y 13° O y los paralelos 36° y 37° N. En la figura 1 se ha representado la sismicidad instrumental para el periodo 2004-2010, que coincide en sus aspectos básicos con otros mapas similares publicados para periodos de tiempo mayores, concreta-

mente entre 1965-2002 (ver Martín Dávila y Pazos, 2003 y Zitellini *et al.*, 2009). Al este del meridiano de Huelva 7°O, se aprecia un *gap* sísmico y de nuevo reaparece la sismicidad en la transversal del Estrecho de Gibraltar en una banda mucho más ancha. Con independencia del cinturón sísmico que acabamos de describir, es posible plantear la existencia de una sismicidad dispersa por toda la zona, que tiende a concentrarse en los principales relieves submarinos y en los frentes montañosos de las áreas emergidas. La mayoría de la sismicidad se produce en los 50 km más superficiales, si bien cabe citar la existencia de más de un centenar de terremotos cuyo hipocentro se sitúa a mayores profundidades. El valor máximo de la magnitud de los terremotos en el periodo investigado ha sido de 6.0 (para el sismo del 12 de febrero de 2007, ver Stich *et al.*, 2007). Datos sísmicos correspondientes a periodos anteriores sitúan en esta zona varios focos sísmicos generadores de terremotos fuertes (con magnitudes superiores a 7) y muy fuertes de carácter histórico, como el Terremoto de Lisboa de 1755, para el que se estima una $M \geq 8.5$.

El análisis detallado de la distribución espacial de la sismicidad entre los paralelos 36°-37° N permite definir unas alineaciones sísmicas relativamente estrechas de dirección NE-SO que coinciden con el Banco de Goringe, Escarpe de La Herradura (llegando incluso hasta el monte submarino Coral Patch) y el cañón submarino de San Vicente. También es posible definir otras concentraciones sísmicas en los Bancos del Guadalquivir y de Pomarao. Los terremotos más profundos se localizan en las verticales del sistema montañoso Hironnelle-Goringe y en el escarpe de La Herradura, y al igual que la sismicidad superficial, los focos sísmicos se alinean en la dirección NE-SO. Algunos terremotos se localizan también a lo largo de la alineación ONO-ESE descrita por Zitellini *et al.* (2009) que cruza la llanura abisal de La Herradura hacia la Cresta Coral Patch.

Mecanismos focales y campo de esfuerzos: Trayectorias de S_H

Partiendo de trabajos pioneros como los de Udías *et al.* (1976), Buforn *et al.* (1995) y Stich *et al.* (2003), en los últimos años se han incrementado notablemente las determinaciones del mecanismo focal de terremotos localizados en el área investigada. Actualmente es posible alcanzar mayor pre-

cisión en la determinación del mecanismo focal incluso para terremotos de baja magnitud ($M \approx 4$). En este trabajo hemos considerado hasta un total de 67 mecanismos focales de terremotos individuales y a partir de ellos se ha estimado la orientación de los ejes P y T.

La mayoría de los mecanismos focales predominantes son de tipo *strike-slip* e inversos y se localizan preferentemente en las proximidades de la Zona de Fractura Azores-Gibraltar. Los mecanismos focales de tipo normal son los menos frecuentes, concentrados la mayoría de ellos en la mitad meridional del Arco de Gibraltar, así como al Norte de Lisboa, en la Cuenca Lusitana y al norte de la Cresta Coral Patch. A partir de todos estos datos se han calculado las trayectorias del máximo esfuerzo compresivo en la horizontal (S_H , Fig. 2), usando para ello el programa Lissage (Lee y Angelier, 1994). Las direcciones de S_H que se observan son, en general, NNO-SSE. No obstante, hay que indicar que dicha orientación se ha determinado esencialmente en la mitad occidental de la zona estudiada. Al Este del meridiano de Huelva (7°O) las trayectorias de S_H tienden a nortearse. Por su parte, al norte del paralelo 38°N , tanto en el interior de la península como en el océano dichas trayectorias giran hacia la dirección NO-SE.

Interpretación sismotectónica

La determinación de las principales estructuras sismogénicas del sector realizada por distintos autores (p. ej., Tortella *et al.*, 1997; Gràcia *et al.*, 2003; Zitellini *et al.*, 2009), así como la revisión detallada realizada en este trabajo de los miles de kilómetros de líneas sísmicas desarrolladas en diferentes campañas de investigación geofísica, nos han permitido avanzar el esquema sismotectónico de la figura 3. Algunas de las estructuras observadas en los perfiles pueden interpretarse como estructuras en flor positivas paralelas a los bancos submarinos. Otras corresponden a cabalgamientos o estructuras de movimiento en dirección. Los mecanismos focales de los terremotos (algunos de los más representativos se muestran en la figura 3) concuerdan en la mayor parte de los casos con las observaciones realizadas a partir de los perfiles sísmicos (Fig. 3). Se confirma, por tanto, que la deformación actual se concentra en una franja de unos 200 km de

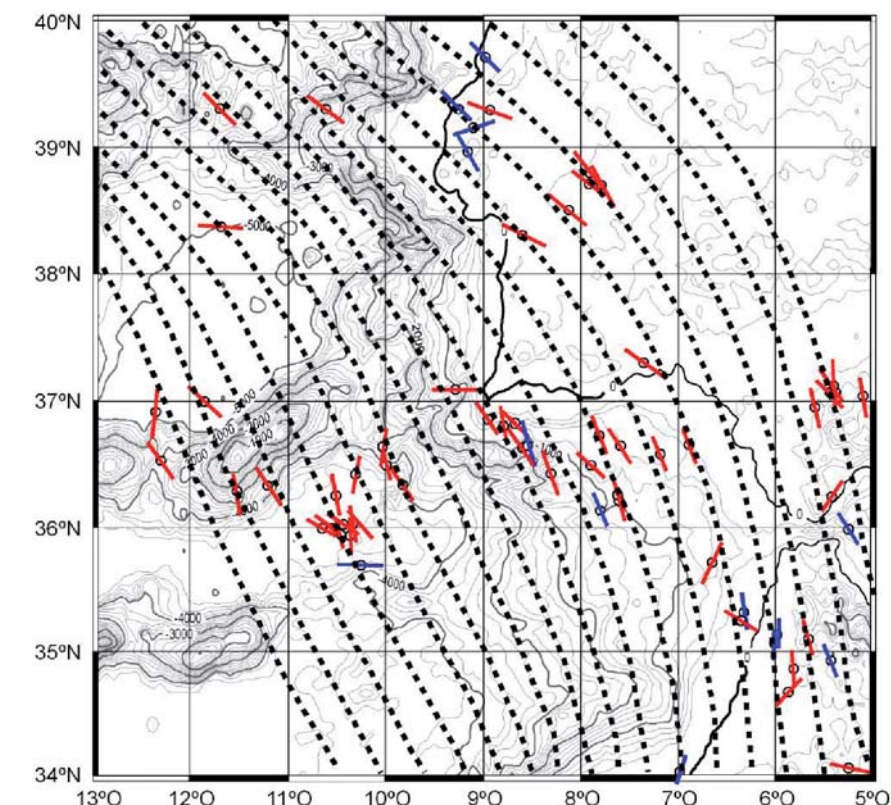


Fig. 2.- Direcciones de S_H para mecanismos de desgarre e inversos (líneas rojas) y para mecanismos focales de tipo normal (líneas azules).

Fig. 2.- Trajectories of S_H computed from moment tensor solutions corresponding to strike-slip or reverse faults (red lines) and normal faults (blue lines).

anchura, de carácter difuso y con deformación distribuida (Vázquez y Vegas, 2000). Pero además, los datos aportados en este trabajo permiten precisar los siguientes aspectos: 1) La distribución de los epicentros de los terremotos en bandas de dirección NE-SW escalonadas (Fig. 1), y que coinciden con la presencia de las principales estructuras sismogénicas (Fig. 3), sugiere que dicho cinturón sísmico está actuando en la actualidad como una gran zona de transpresión (p. ej., Medialdea, 2004), a la que denominamos Zona Transpresiva de San Vicente (Fig. 3), y que coincide con el norte de la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz y los relieves submarinos situados al norte de ella. 2) La orientación relativa del campo de esfuerzos deducido a partir de los mecanismos focales de los terremotos (Fig. 2) es completamente congruente con el funcionamiento transpresivo de la banda sismogénica, cuya orientación es E-O. 3) Se observa también compatibilidad entre el carácter transpresivo de esta megaestructura y su orientación con respecto al vector de acercamiento relativo entre las placas africana y euroasiática (Fig. 3). Obsérvese cómo las

estructuras cabalgantes y de desgarre identificadas en el interior de la zona transpresiva son cinemáticamente compatibles con la orientación de dicho vector de movimiento entre placas.

Silva *et al.* (2010) a partir de datos de sismicidad instrumental reciente hacen una interpretación sismotectónica para el Golfo de Cádiz compatible con nuestra propuesta. En su conjunto, esta ancha franja ha sido explicada bien como un infracabalgamiento de la placa africana (Buforn *et al.*, 1988), bien como el resultado de la convergencia lenta de dos litosferas con propiedades parecidas (Grimison y Chen, 1986). No obstante, el carácter distribuido de la deformación (Vegas, 1991) y el resto de características indicadas en este trabajo permiten interpretarla como el resultado de la deformación de la litosfera en un *restraining bend* (Zona Transpresiva de San Vicente) asociado al cambio de dirección de la Falla Gloria que, al aproximarse a la litosfera continental de Iberia (véase la posición de la zona de transición entre litosfera oceánica y continental en las Figs. 1 y 3), se desvía del trazado propio de una transformante (círculo menor) alrededor del

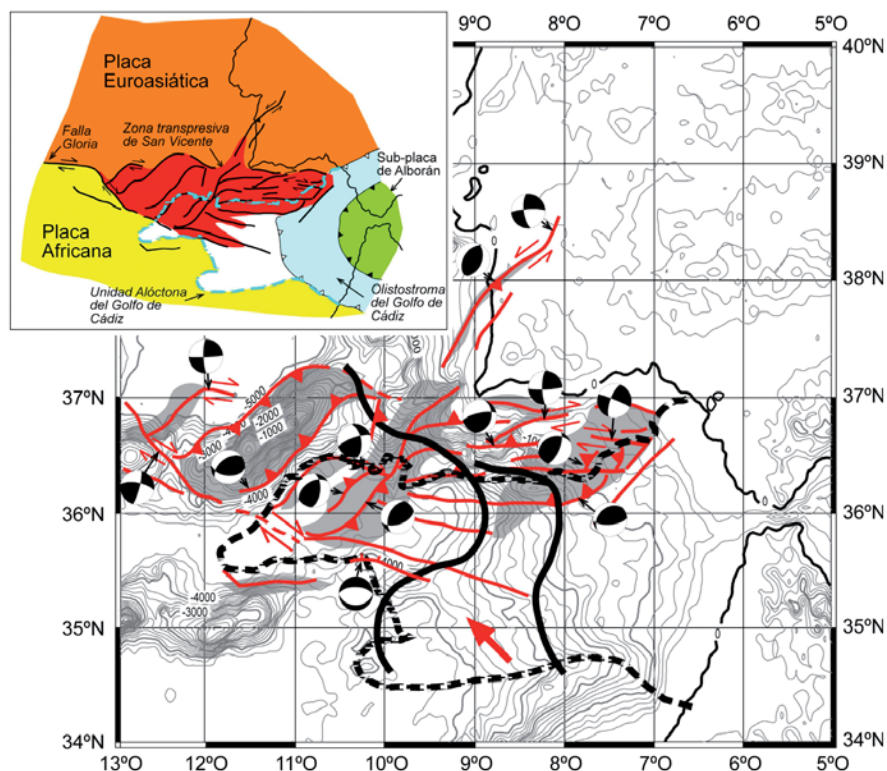


Fig. 3.- Esquema sismotectónico del extremo oriental de la Fractura Azores-Gibraltar: Zona Transpresiva de San Vicente. Las áreas sombreadas coinciden con la máxima concentración de sismos. Ver la figura 1 para una explicación del significado de los distintos elementos representados.

Fig. 3.- Seismotectonic sketch of the eastern end of the Azores-Gibraltar Fracture: Transpressive zone of San Vicente. Shaded areas coincide with the major density of epicenters. See figure 1 for an explanation of the represented elements.

polo de rotación entre las placas Africana y Euroasiática. La presencia de estructuras antiguas en el basamento continental de Iberia debe haber influido en el desarrollo de esta irregularidad. Dentro de la Zona Transpresiva de San Vicente se observan varias bandas sigmoidales menores, limitadas por cabalgamientos y desgarres (Fig. 3). Corresponden a *duplexes* transpresivos (en el sentido de Woodcock y Fischer, 1986) escalonados. A lo largo de estas bandas transpresivas escalonadas se concentra la actividad tectónica y deben ser consideradas especialmente en el análisis del riesgo sísmico de la región.

Conclusiones

Se propone que la Zona Transpresiva de San Vicente (Fig. 3) constituye el límite

actual entre las placas Africana y Euroasiática en la región comprendida entre la terminación oriental de la Falla Gloria y el Arco de Gibraltar. Esta gran zona transpresiva, de dirección E-O, acomoda el movimiento relativo entre las placas africana y euroasiática a ambos lados de la transición entre litosfera oceánica y continental, y discurre a caballo entre el norte de la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz y el margen sudportugués.

Agradecimientos

Agradecemos los comentarios de dos revisores anónimos. Se agradece la financiación recibida a través del Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación, Grupos RNM-316 y RNM-347. La mayor parte de la información sísmica procede del *European-Mediterranean Seismological Centre*.

Referencias

- Bufo, E., Udías, A. y Colombás, M.A. (1988). *Tectonophysics*, 152, 89-118.
- Bufo, E., Sanz de Galdeano, C. y Udías, A. (1995). *Tectonophysics*, 248, 247-261.
- Gràcia, E., Dañoibeitia, J., Vergés, J. y Bartolomé, R. (2003). *Tectonics*, 22, doi:10.1029/2001TC901045.
- Grimison, N.L. y Chen, W.P. (1986). *Journal of Geophysical Research*, 91, 2029-2047.
- Lee, J.C. y Angelier, J. (1994). *Computers & Geosciences*, 20, 161-191.
- Martín Dávila, J. y Pazos, A. (2003). *Física de la Tierra*, 15, 189-210.
- Medialdea, T. (2004). *Estructura y Evolución Tectónica del Golfo de Cádiz*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 328 p.
- Silva, S. M., Romsdorf, M., Matias, L., Terrinha, P., Geissler, W. y NEAREST Working Group (2010). En: *1ª Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología*. Resúmenes, 171-174.
- Stich, D., Ammon, D.J. y Morales, J. (2003). *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2002JB002057.
- Stich, D., Mancilla, F.L., Pondrelli, S. y Morales, J. (2007). *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2007-Gl-030012.
- Terrinha, P. y MATESPRO Team (2009). *Marine Geology*, 267, 156-174.
- Tortella, D., Torné, M. y Pérez-Estaún, A. (1997). *Marine Geophysical Researches*, 19, 211-230.
- Udías, A., López-Arroyo, A. y Mezcuca, J. (1976). *Tectonophysics*, 31, 259-289.
- Vázquez, J.T. y Vegas, R. (2000). *2ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, 19, 147-148.
- Vázquez, J.T., Medialdea, T., Hernández-Molina, F.J., Somoza, L., Díaz del Río, V., Vegas, R., León, R., Bárcenas, P., Maestro, A. y Fernández-Puga, M.C. (2004). *Geo-Temas*, 6, 210-214.
- Vegas, R. (1991). En: *Seismicity, Seismotectonics and seismic risk of the Ibero-Maghrebian region* (J. Mezcuca y A. Udías, Eds), Monografías del Instituto Geográfico Nacional, 193-203.
- Woodcock, N.J. y Fisher, M. (1986). *Journal of Structural Geology*, 8, 725-735.
- Zitellini, N. y Bigsets Team (2004). *Pure and Applied Geophysics*, doi: 10.1007/s00024-003-2463-4.
- Zitellini, N., Gràcia, E., Matias, L., Terrinha, P., Abreu, M.A., DeAlteriis, G., Henriot, 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.