

Análisis estructural en el segmento Alhama de Murcia – Alcantarilla (Falla de Alhama de Murcia) y sus implicaciones en la peligrosidad sísmica

Structural analysis of the Alhama de Murcia – Alcantarilla segment (Alhama de Murcia Fault, SE Spain) and its implications in seismic hazard

Paula Herrero Barbero¹, José A. Álvarez Gómez¹ y José J. Martínez Díaz^{1,2}

¹ Dpto. de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España, paulah01@ucm.es, jaalvare@ucm.es, jmdiaz@ucm.es

² Instituto de Geociencias IGEO (UCM-CSIC), 28040 Madrid, España, jmdiaz@ucm.es

ABSTRACT

We present here a geometrical analysis of a structure related to the reactivation of the NE end of the Alhama de Murcia Fault (Eastern Betic Shear Zone, SE Spain) due to the NW-SE convergence initiated in the Upper Miocene. Conventional techniques of structural analysis have been used to estimate a net slip rate of 0.13 – 0.18 mm/yr in the Alhama de Murcia – Alcantarilla segment. The maximum expected magnitude of earthquakes from the fault segment dimensions is between MW 6.5 - 6.6, following empirical regressions, with a recurrence interval between 7,300 - 14,100 years for the slip rate obtained. The low geomorphologic expression observed in this sector of the Alhama de Murcia Fault compared to other segments shows a lower activity rate as well as the results obtained suggest the influence of the Carrascoy Fault on the regional shortening rate distribution.

Key-words: Structural analysis, Alhama de Murcia Fault, Eastern Betic Shear Zone, seismic hazard.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del análisis geométrico de una estructura asociada a la reactivación del extremo NE de la Falla de Alhama de Murcia (Zona de Cizalla de las Béticas Orientales) por la convergencia NO-SE iniciada en el Mioceno Superior. A partir de técnicas de análisis estructural convencionales se ha estimado una tasa de deslizamiento neto de entre 0,13 y 0,18 mm/año en el segmento Alhama de Murcia – Alcantarilla. La magnitud máxima de un terremoto cuya fuente fuese este segmento se encuentra entre MW 6,5 - 6,6, estimada mediante correlaciones empíricas, con un periodo de recurrencia comprendido entre 7300 y 14100 años para la tasa de deslizamiento obtenida. La menor expresión geomorfológica observada en este sector de la Falla de Alhama de Murcia en comparación con otros segmentos de la misma evidencia un menor grado de actividad, al mismo tiempo que los resultados obtenidos sugieren la contribución de la Falla de Carrascoy en la repartición de la tasa de acortamiento regional entre ambas estructuras.

Palabras clave: Análisis estructural, Falla de Alhama de Murcia, Zona de Cizalla de las Béticas Orientales, peligrosidad sísmica.

Geogaceta, 62 (2017), 11-14
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 29 de enero de 2017
Revisión: 22 de marzo de 2017
Aceptación: 26 de abril 2017

Introducción

La Falla de Alhama de Murcia (FAM) es una de las fallas de mayor longitud de la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO), estructura que acomoda parte de la convergencia NO-SE entre las placas de Eurasia y Nubia en el Mediterráneo Occidental (4-6 mm/año) (Argus *et al.*, 2011). Algunos de los terremotos históricos más destructivos ocurridos al este de la Cordillera Bética están asociados a este sistema de fallas. Uno de esos eventos tuvo lugar cerca de Lorca (Murcia) en el año 2011, con magnitud M_w 5,2, cau-

sante de severos daños en el municipio y pérdidas humanas.

En los últimos años numerosos estudios se han centrado en la caracterización sísmogénica de la FAM (Martínez-Díaz, 1998; Masana *et al.*, 2004; Martínez-Díaz *et al.*, 2012). El mayor esfuerzo en la obtención de parámetros de actividad de la FAM se ha llevado a cabo sobre todo en el sector suroccidental que limita la cuenca de Lorca y que concentra la mayor parte de la sismicidad histórica. La terminación NE de la FAM, denominado comúnmente como segmento Alhama de Murcia – Alcantarilla (A-A), muestra menor expresión geomorfológica,

lo que parece evidenciar menor actividad que otros sectores de la falla. No obstante, el catálogo sísmico muestra que se han producido en esta zona terremotos históricos importantes de intensidad EMS VI (Alcantarilla, 1905, 1908) e intensidad EMS VII (Alhama de Murcia, 1855).

En este trabajo se presenta el análisis de perfiles de sísmica de reflexión del sector suroccidental de la cuenca de Fortuna, previamente interpretados por la compañía GESSAL y que forman parte del material auxiliar del Mapa Geológico de la Región de Murcia 1:200.000 (Baena Pérez 1993). En estos perfiles es posible identificar rasgos

asociados a la dinámica de la FAM en el segmento A-A. Mediante técnicas de análisis estructural se ha logrado hacer una estimación de la cantidad de acortamiento horizontal producida y estimar con estos datos las tasas de deslizamiento, lo que otorga una aproximación al potencial sísmogénico de la FAM en este sector.

Marco geológico

La FAM se localiza en la Zona Interna de la Cordillera Bética. En el periodo neotectónico (últimos 9 Ma) es dominante un campo de esfuerzos compresivo con una dirección de acortamiento NNO-SSE. La deformación bajo este campo de esfuerzos está en gran parte acomodada por la ZCBO, extensa estructura de dirección NE-SO dominada por fallas de desgarre sinistral.

La FAM es una de las estructuras de mayor longitud y actividad de la ZCBO. Separa la depresión del Guadalentín de las cuencas de Lorca y Fortuna, que se formaron en una fase extensional dominante durante el Mioceno (Jabaloy *et al.*, 1993). Durante esta etapa algunos segmentos de la FAM (Totana – Alhama y Alhama – Alcantarilla) se comportaron como fallas normales que, a partir del Mioceno superior, fueron reactivadas por la compresión NO-SE aún activa, produciendo una inversión tectónica de la FAM (Montenat *et al.*, 1990; Martínez-Díaz, 1998).

El segmento Alhama de Murcia – Alcantarilla (A-A) (Martínez-Díaz *et al.*, 2012) se localiza en el extremo NE de la FAM, limitando el sector suroccidental de la cuenca de Fortuna (o Subcuenca de Mula) de la depresión cuaternaria del Guadalentín (Fig. 1). El único relieve de cierta importancia en este sector es el que forma la Sierra de la Muela, situada al norte de Alhama de Murcia. En el lado opuesto de la depresión del Guadalentín, se localiza la Falla de Carrascoy (FCA, Fig. 1), con actividad cuaternaria.

Rasgos estructurales

Para el desarrollo de este trabajo se han empleado perfiles sísmicos interpretados de la subcuenca de Mula con los que se ha construido un modelo geológico 3D mediante el software de modelado estructural Move™, lo que ha permitido visualizar la estructura de los depósitos neógenos que la conforman. La estratigrafía de la subcuenca

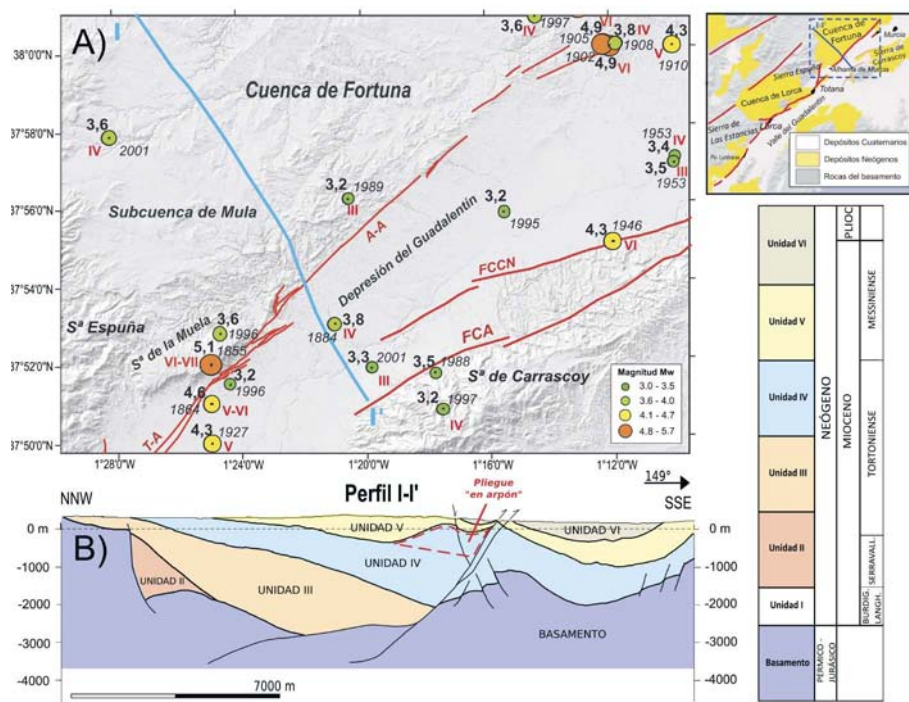


Fig. 1.- A) marco tectónico local de la zona de estudio, localización del perfil I-I' (en azul) y distribución de la sismicidad instrumental e histórica (EMS>III), obtenida del Instituto Geográfico Nacional (<http://www.ign.es/ign/layoutIn/sismoFormularioCatalogo.do>). Segmentos de la Falla de Alhama de Murcia (FAM): Totana–Alhama de Murcia (T-A) y Alhama de Murcia–Alcantarilla (A-A). Al SE, la Falla de Carrascoy (FCA) y la Falla de Cañaricos-Cuevas del Norte (FCCN). **B)** sección I-I' digitalizada a partir de la interpretación sísmica. Ver figura en color en la Web.

Fig. 1.- A) local tectonic frame of the study area, cross-section trace I-I' (blue) and the distribution of historical and instrumental seismicity (EMS>III), from Instituto Geográfico Nacional (<http://www.ign.es/ign/layoutIn/sismoFormularioCatalogo.do>). Segments of the Alhama de Murcia Fault (AMF): Totana–Alhama de Murcia (T-A) and Alhama de Murcia–Alcantarilla (A-A). To the southwest, Carrascoy Fault (CAF) and Cañaricos-Cuevas del Norte Fault (CCNF). **B)** cross-section I-I' obtained from seismic interpretation. See color figure in the Web.

de Mula está constituida por las formaciones neógenas depositadas tras el emplazamiento de las grandes unidades estructurales. Las mayores potencias de sedimentos, de 2500 a 3000 m, se desarrollaron durante el Tortonense hasta el Messiniense terminal – Plioceno (Fig. 1).

Los depósitos de la subcuenca de Mula muestran rasgos asociados a la cinemática de la FAM en diferentes regímenes tectónicos. Los depósitos de bloque NO, previamente basculados durante la etapa extensional miocena, muestran rasgos estructurales asociados a la reactivación de la falla. Un rasgo representativo de la inversión tectónica positiva experimentada por la falla se observa en el extremo SO del segmento A-A (perfil I-I', Fig. 1), en un pliegue asimétrico conocido como de "tipo arpon" y que deforma las unidades del final del Messiniense e inicio del Plioceno (5,3 Ma) al este de la Sierra de la Muela. Para estimar medidas mínimas de desplazamiento de la FAM en el segmento A-A asociadas a su reciente cinemática sinistral-inversa (Martí-

nez-Díaz *et al.*, 2012) es necesario aislar evidencias del acortamiento horizontal posteriores a la reactivación de la falla. Se ha seleccionado el pliegue asimétrico o estructura "en arpon", dado que refleja el desplazamiento debido a la componente inversa del movimiento.

Análisis geométrico

Con el objetivo de cuantificar la deformación observada en el perfil sísmico, se han empleado relaciones geométricas aplicadas al análisis de estructuras geológicas en profundidad. Esta metodología asume que en una sección transversal debe existir una compensación de áreas entre el estado previo a la deformación y el estado deformado, tal y como establece Chamberlin (1910) para determinar la profundidad de una falla de despegue subhorizontal. Otros autores lo han empleado eficazmente para estimar la cantidad de acortamiento horizontal experimentado por las estructuras deformadas (Hossack, 1979; Yamada y

McClay, 2003). La relación simplificada ($D = S/H$) considera la componente horizontal del desplazamiento (D) a lo largo del plano de falla, entendida como el acortamiento que experimenta la estructura en una dinámica compresiva; el área deformada (S) sobre un nivel de buzamiento regional de referencia y la profundidad (H) de la falla con respecto al nivel regional.

Las propiedades geométricas de la estructura en cada escenario se han obtenido a partir del modelo geológico 3D (Fig. 2). La aplicación del método hace necesario estimar una geometría óptima de la falla en profundidad a partir de la interpretación sísmica, lo que conlleva, sin embargo, una elevada incertidumbre. Por ello, se proponen dos escenarios de trabajo (Fig. 2) basados en dos posibles geometrías de la falla en profundidad.

Un primer escenario (ESC1, Fig. 2A) considera la geometría interpretada en los perfiles sísmicos, que se horizontaliza a los 2500 m limitando la cuña sedimentaria de la cuenca con el basamento Bético. Martínez del Olmo *et al.* (2006) interpretan, respecto a esta geometría, un despegue extensional muy activo durante el Messiniense y que, posteriormente, se reactivó por la acortamiento regional.

En el segundo escenario (ESC2, Fig. 2B) se considera que la falla mantiene su trayectoria de alto ángulo hasta una profundidad mínima de 4000 m. En este caso, se plantea un escenario de mínimo desplazamiento en el que no se interpreta como tal

un nivel de despegue pero en el que se deduce el límite inferior del área que puede ser desplazada por la falla y que, según la relación geométrica, debe ser equivalente al área de la estructura deformada.

Acortamiento horizontal

El rango de acortamiento horizontal estimado a partir del método del área desplazada oscila entre 686 m en ESC1 y 475 m en ESC2, en una dirección N 149° E, correspondiente al perfil I-I'. Para ser rigurosos con los modelos teóricos, se han proyectado los resultados según una dirección N 137° E perpendicular a la FAM, teniendo ésta una dirección N 47° E en el segmento A-A (Martínez-Díaz *et al.*, 2012). El acortamiento estimado sería, por tanto, de entre 671 (ESC1) y 465 m (ESC2). Considerando que la deformación causada por el acortamiento regional es post-Messiniense (5,3 Ma), se han estimado unas tasas de acortamiento de 0,13 mm/año (ESC1) y 0,09 mm/año (ESC2).

Tasas de deslizamiento de la falla

El acortamiento obtenido hasta el momento constituye la componente horizontal de la separación de los bloques de falla. Por tanto, la proyección del vector de acortamiento horizontal sobre el plano de falla posibilita la obtención del deslizamiento según el buzamiento de la falla. Considerando un buzamiento de 44,5° medido en

el modelo geológico construido, la tasa de deslizamiento según el buzamiento oscila entre 0,18 y 0,12 mm/año para ESC1 y ESC2, respectivamente.

Para conocer el movimiento lateral de la FAM en este sector a partir del acortamiento estimado, se ha tomado la dirección de acortamiento regional N 155° E registrada en la estación GPS de la red CuaTeNeo más cercana al segmento (MAJA, Echevarría *et al.*, 2013). Este vector representa la dirección del desplazamiento real en la horizontal con respecto a Eurasia. Dado que conocemos la componente perpendicular a la falla de este desplazamiento, es decir, el acortamiento horizontal obtenido, es posible estimar la componente paralela o desplazamiento en dirección. Así, se ha obtenido que la componente de desgarre en el segmento A-A oscila entre 0,04 (ESC1) y 0,03 mm/año (ESC2).

Finalmente, la tasa desplazamiento neto estimado para el segmento A-A comprende, por tanto, entre los 0,18 mm/año de ESC1 y los 0,13 mm/año de ESC2, con un cabeceo del vector deslizamiento sobre el plano de falla de 77°.

Implicaciones en la peligrosidad sísmica

A partir de los parámetros de actividad de la falla obtenidos y de los datos geológicos conocidos de la FAM (Tabla I), se ha hecho una estimación de magnitudes máximas basadas en relaciones empíricas (Wells y Coppersmith, 1994; Berryman *et al.*, 2002) y suponiendo para ello que el segmento A-A rompiera en toda su extensión, 17 km. La magnitud de terremoto máximo estimada se sitúa en valores de M_w 6,5 – 6,6, entre los que se calculan intervalos de recurrencia de entre 7300 y 14100 años. El intervalo de recurrencia se ha obtenido con base en la tasa de deslizamiento neto y mediante la estimación del salto cosísmico, basándose en las relaciones de Aki (1966) y de Kanamori y Hanks (1979), siendo esta última necesaria para la estimación del momento sísmico liberado.

No obstante, los mayores terremotos localizados próximos al segmento A-A según el catálogo sísmico homogeneizado (Fig. 1) presentan magnitudes próximas a M_w 5,0, magnitud que implica un área de rotura de 6,6 km² (Berryman *et al.*, 2002) y un salto cosísmico de 0,2 m. Si se considera un escenario en el que la deformación sísmica y

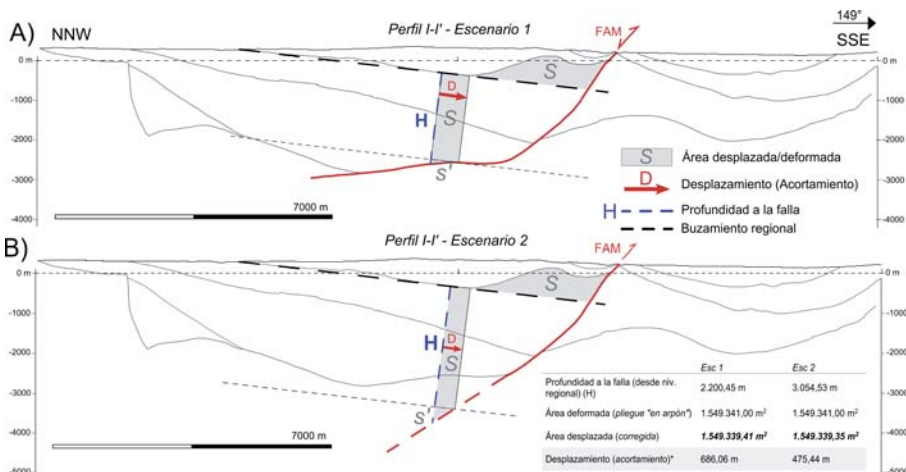


Fig. 2.- Construcción geométrica de los escenarios propuestos (ESC 1 y ESC 2) para la aplicación del método del área desplazada-deformada (Chamberlin, 1910; Hossack, 1979). La diferencia entre las áreas (0,1%) es resultado de una corrección geométrica con el objetivo de adaptar el método a la estructura real (s'). Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Geometric construction of the scenarios proposed (ESC 1 and ESC2) for the application of the depth-detachment method (Chamberlin, 1910; Hossack, 1979). The difference between areas (0.1%) results from a geometric correction done in order to adapt the method to real structure (s'). See color figure in the web.

Longitud Rotura (km) (Martínez-Díaz <i>et al.</i> , 2012)	17
Buzamiento medido en el modelo geológico (MOVE)	44,5° – 70°
Espesor sismogénico (km) (García Mayordomo, 2005)	12
Anchura de la Rotura (km)	12,8 – 17,1
Área de Rotura (km ²)	217,1 – 291,2

Tabla I.- Parámetros geométricos de la rotura sísmica en el segmento A-A.

Table I.- Rupture parameters of the A-A segment.

la liberación de momento sísmico involucran a la máxima área de rotura del segmento (291 km²), éste tendría el potencial para generar hasta 44 eventos de M_w 5,0 en un periodo de 1600 años. Esto se traduciría en intervalos de recurrencia menores de 50 años entre los citados eventos, lo que es coherente con algunas fechas registradas en el catálogo (Fig. 1).

Discusión

El método geométrico empleado (Chamberlin, 1910; Hossack, 1979) para la obtención de tasas de acortamiento horizontal es común en estudios de geología estructural, pero poco frecuente en la estimación de parámetros sísmicos. Las limitaciones surgidas en el desarrollo del análisis han recaído en la elección de un escenario geométricamente admisible, dado que la interpretación empleada suscita dudas acerca de la geometría de la FAM en profundidad.

No existen estimaciones previas del deslizamiento neto para el segmento estudiado, si bien Silva *et al.* (2003) estimaron una tasa de levantamiento del frente montañoso de 0,03 – 0,07 mm/año. A partir de las tasas de deslizamiento obtenidas en el análisis estructural, se estima una tasa de levantamiento de 0,08 - 0,12 mm/año, lo que evidencia una mayor contribución de la componente inversa en el movimiento de la falla. No obstante, la escasa expresión geomorfológica hacia el NE del segmento hace presumible que el grado de actividad durante el Cuaternario sea menor que en otros segmentos de la FAM. Esta suposición es coherente con la tasa de deslizamiento neto estimada (0,13 – 0,18 mm/año), inferior a las máximas tasas obtenidas por Masana *et al.* (2004) y por Ferrater *et al.* (2016) para el segmento Lorca-Totana, siendo éstas de 0,7 mm/año y $0,9 \pm 0,1$ mm/año, respectivamente.

Por otra parte, la Falla de Carrascoy, coincidente con la posición de la FAM al otro lado de la depresión del Guadalentín, parece absorber parte de la deformación durante el Cuaternario (Martínez-Díaz, 1998) lo que se refleja claramente en su morfología: gran parte del levantamiento de la Sierra de Carrascoy ($0,37 \pm 0,08$ mm/año; Martín-Banda *et al.*, 2015) se ha producido desde el Mioceno superior mientras que la FAM apenas genera relieve en este sector.

Conclusiones

La tasa de deslizamiento neto obtenida en el segmento Alhama de Murcia - Alcantarilla (A-A), entre 0,13 y 0,18 mm/año, es coherente con la menor expresión geomorfológica observada en la zona con respecto a otros sectores de la FAM, evidenciando un menor grado de actividad. También es consecuente con la presencia de la Falla de Carrascoy, otra importante falla orientada paralelamente y situada al sur del segmento A-A, que acomoda parte del acortamiento regional y contribuye a que la deformación se reparta entre ambas estructuras. Por otra parte, los parámetros de actividad obtenidos evidencian la posibilidad de ocurrencia de terremotos de magnitud $M_w > 6$ con intervalos de recurrencia que oscilan entre los 7300 y 14100 años. El periodo de recurrencia sería menor de 50 años para terremotos de magnitud moderada, similares a los ocurridos en la FAM en Lorca (2011, M_w 5,2), La Paca (2005, M_w 4,9) y Bullas (2002, M_w 5,0), que pueden causar daños significativos en municipios próximos densamente poblados.

Agradecimientos

Trabajo financiado por el proyecto CGL2013-47412-C2-1-P (Ministerio de Economía y Competitividad). Los autores agradecen a GESSAL la cesión de la interpretación sísmica, a *Midland Valley Exploration* por proveer el software Move y a los revisores Julián García Mayordomo y Francisco Juan García Tortosa sus sugerencias y valiosas aportaciones al manuscrito.

Referencias

Aki, K. (1966). *Bulletin of the Earthquake Research Institute* 44, 73-88.

- Argus, D.F., Gordon, R.G. y DeMets, C. (2011). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 12 (11).
- Baena Pérez, J. (Coord.), (1993). *Mapa geológico de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia 1:200.000*, IGME, Madrid.
- Berryman, K., Webb, T., Hill, N., Stirling, M., Rhoades, D., Beavan, J. y Darby, D. (2002). *GNS client report* 2001/129.
- Chamberlin R.T. (1910). *The Journal of Geology* 18(3), 228-251.
- Echeverría, A., Khazaradze, G., Asensio, E., Gárate, J., Martín Dávila, J. y Suriñach, E. (2013). *Tectonophysics* 608, 600–612.
- Ferrater, M., Ortuño, M., Masana, E., Pallás, R., Perea, H., Baize, S., García Meléndez, E., Martínez Díaz, J.J., Echeverría, A., Rockwell, T. K., Sharp, W. D., Medialdea, A. y Rhodes, E. J. (2016). *Tectonophysics* 680, 122-128.
- García Mayordomo, J. (2005). *Caracterización y análisis de la peligrosidad sísmica en el sureste de España*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense, 373 p.
- Hossack, J. R. (1979). *Journal of the Geological Society* 136(6), 705-711.
- Jabaloy, A.J., Galindo-Zaldívar, J. y González-Lodeiro, F. (1993). *Journal of Structural Geology* 15, 555–569.
- Kanamori, H. y Hanks, T. C. (1979). *Journal of Geophysical Research* 84, 2348-2349.
- Martín Banda, R., García Mayordomo, J., Insua-Arévalo, J. M., Salazar, Á. E., Rodríguez-Escudero, E., Álvarez Gómez, J. A., Medialdea, A. y Herrero, M. J. (2015). *Tectonics* 34.
- Martínez del Olmo, W., Klimowitz, J. y Hernández, E. (2006). *Boletín Geológico y Minero* 117(3), 363-377.
- Martínez Díaz, J. J. (1998). *Neotectónica y Tectónica Activa del Oeste de Murcia y Sur de Almería, Cordillera Bética (España)*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense, 470 p.
- Martínez Díaz, J. J., Masana, E. y Ortuño, M. (2012). *Journal of Iberian Geology* 38(1), 253-270.
- Masana, E., Martínez-Díaz, J.J., Hernández-Enrile, J.L. y Santanach, P. (2004). *Journal of Geophysical Research* 109, 1–17.
- Montenat, C., Ott D'Estevou, P., Aellen, M. y La Chappelle, G. (1990). *Documents et Travaux de l'IGAL*, 12-13, 281-286.
- Silva, P. G., Goy, J. L., Zazo, C. y Bardají, T. (2003). *Geomorphology* 50(1), 203-225.
- Wells, D. L. y Coppersmith, K. J. (1994). *Bulletin of the seismological Society of America* 84(4), 974-1002.
- Yamada, Y. y McClay, K. (2003). *Journal of Structural Geology* 25(9), 1551-1560.