

# Tasas de deformación GPS en la cuenca del Bajo Segura (Cordillera Bética oriental)

## GPS deformation rates in the Bajo Segura basin (Eastern Betic Cordillera)

Alberto Sánchez Alzola<sup>1</sup>, M<sup>a</sup> Jesús Borque<sup>2,7</sup>, Iván Martín-Rojas<sup>3</sup>, Francisco J. García-Tortosa<sup>4,7</sup>, Pedro Alfaro<sup>3</sup>, Antonio Estévez<sup>3</sup>, Sergio Molina<sup>5</sup>, Gracia Rodríguez-Caderot<sup>6</sup>, Clara de Lacy<sup>2,7</sup>, Juan Antonio García-Armenteros<sup>2</sup>, Manuel Avilés<sup>2</sup>, Antonio Herrera-Olmo<sup>2</sup>, Sergio Rosa<sup>3</sup> y Antonio J. Gil<sup>2,7</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Cádiz. Campus de la Asunción, 11405 Jerez de la Fra. (Cádiz), España. alberto.sanchez@uca.es

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén, Campus de las Lagunillas, 23071 Jaén, España.

mjborque@ujaen.es, mlacy@ujaen.es, jgarmen@ujaen.es, maviles@ujaen.es, anheolmo@ujaen.es, ajgil@ujaen.es

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, Apdo. 99, 03080 Alicante, España.

ivan.martin@ua.es, pedro.alfaro@ua.es, antonio.estevez@ua.es, sergio.rosacintas@ua.es

<sup>4</sup> Departamento de Geología, Universidad de Jaén, Campus de las Lagunillas, 23071 Jaén, España. gtortosa@ujaen.es.

<sup>5</sup> Departamento de Ciencias del Mar, Universidad de Alicante, Apdo. 99, 03080 Alicante, España. sergio.molina@ua.es.

<sup>6</sup> Departamento de Astronomía y Geodesia, Facultad de Matemáticas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España. grc@mat.ucm.es.

<sup>7</sup> Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra CEACTierra. Universidad de Jaén. Campus de las Lagunillas, 23071 Jaén, España.

### ABSTRACT

We estimate the present deformation rates of the Bajo Segura Basin (NE end of the Eastern Betic shear zone), from the analysis of a GPS network with 11 sites. We analyze the data from four observation campaigns carried out between June 1999 and January 2013. We used the 6.2 version of GIPSY-OASIS software to process GPS data in Precise Point Positioning mode (PPP). It is observed a ~N-S shortening in the whole basin, higher in the south, along the Bajo Segura fault zone, with rates varying from West to East between 0.73 and 0.24 mm/yr. In the northern border of the basin, along the Crevillente fault zone, N-S deformation rates are lower. However, it is observed a left-lateral movement of this fault zone varying between 0.44 and 0.75 mm/yr in the E-W direction.

**Key-words:** Active tectonics, Bajo Segura basin, Betic Cordillera, deformation rates, GPS.

### RESUMEN

En este trabajo hemos cuantificado las tasas de deformación actual de la cuenca del Bajo Segura (NE del corredor de cizalla de la Bética oriental), a partir del análisis de una red GPS con 11 vértices geodésicos. Se han analizado los datos de cuatro campañas GPS entre junio de 1999 y enero de 2013, que han sido procesados con la versión 6.2 del software GIPSY-OASIS. Este software utiliza la técnica de posicionamiento puntual de precisión conocido por las siglas PPP. Se observa un acortamiento ~N-S en toda la cuenca de mayor magnitud en el sur, en la zona de falla del Bajo Segura, con valores que varían de oeste a este entre 0,73 y 0,24 mm/año. En el borde septentrional de la cuenca, en la zona de falla de Crevillente, los valores de acortamiento N-S son menores. Sin embargo, en esta falla se ha observado un movimiento lateral sinistrorso que, en la componente E-O, varía entre 0,44 y 0,75 mm/año.

**Palabras clave:** Tectónica activa, Cuenca del Bajo Segura, Cordillera Bética, tasa de deformación, GPS.

Geogaceta, 56 (2014), 3-6.  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 1 de febrero de 2014  
Fecha de revisión: 29 de abril de 2014  
Fecha de aceptación: 30 de mayo de 2014

### Introducción

En las zonas del planeta caracterizadas por fallas lentas, como es el caso de la Cordillera Bética, la mayoría suelen tener tasas de desplazamiento muy bajas, inferiores a 1 mm/año. Como sus ciclos sísmicos son muy largos, de varios miles de años, el registro histórico e instrumental es insuficiente para estimar su potencial sísmico. En

estos casos es muy útil calcular sus tasas de desplazamiento a partir de datos geológicos, geomorfológicos, paleosismológicos y/o geodésicos.

La cuenca del Bajo Segura (Fig. 1), situada en la terminación nororiental del corredor de cizalla de la Bética oriental, es una de las más interesantes de la Península Ibérica desde un punto de vista sistémico porque en ella se han produ-

cido terremotos como el de Torreveja de 1829 ( $I_{MSK}=X$ ) con una magnitud estimada Ms entre 6,3 (Delgado *et al.*, 1993) y 6,9 (Muñoz y Udías, 1991) o los dos terremotos de Jacarilla de 1919 de magnitud mb 5,1 y 5,2.

Desde el Mioceno superior hasta la actualidad la cuenca ha estado sometida a compresión horizontal con una dirección NNO-SSE/NO-SE (Montenat *et al.*, 1990).

Los mecanismos focales indican un campo de esfuerzos regional similar (Coca y Buforn, 1994; Buforn *et al.*, 1995).

En el año 1999 se estableció una red GPS (Alfaro *et al.*, 2000), formada por 11 vértices geodésicos, para cuantificar la deformación que se está produciendo actualmente en la cuenca del Bajo Segura (Fig. 1). Se han realizado cuatro campañas en junio de 1999, septiembre de 2001, septiembre de 2002 y enero de 2013.

En este trabajo analizamos los primeros resultados de deformación obtenidos a partir de esta red GPS y los comparamos con otros datos geológicos y geodésicos publicados en el área de estudio.

### Contexto geodinámico regional

La cuenca del Bajo Segura (Cordillera Bética oriental) se sitúa en el límite de placas difuso entre Eurasia y África, con una velocidad de convergencia en la longitud de la provincia de Alicante de alrededor de 5 mm/año (ver diferentes autores en Nocquet, 2012). Según Serpelloni *et al.* (2007), en el Tell argelino se acomodan entre 2,7 y 3,9 mm/año de la convergencia actual entre África (Nubia) y Eurasia, y el resto lo hace más al norte, principalmente en la Cordillera Bética y en la Cuenca Argelino-Balear y Alborán.

### Deformación en la cuenca del Bajo Segura

El corredor de cizalla de la Bética oriental tiene una morfología arqueada que en su extremo más oriental, donde se sitúa la cuenca del Bajo Segura, adquiere una dirección media ENE-OSO. Esta cuenca está limitada al norte por la falla de Crevillente (sector Abanilla-Alicante), de dirección media N070°E, y la falla del Bajo Segura (Taboada *et al.*, 1993; Alfaro *et al.*, 2002a,b), de dirección casi E-O. El sector Abanilla-Alicante de la falla de Crevillente es una falla inverso-sinistrorsa. En la mayoría de su traza (especialmente en el este) no tiene ruptura en superficie presentando una sucesión de pliegues activos. La falla del Bajo Segura es una falla inversa ciega caracterizada en superficie por varios pliegues asimétricos vergentes al norte de dirección E-O. En el sector meridional, hay varias fallas dextrorsas de dirección NO-SE asociadas a la del Bajo Segura (fallas de San Miguel de Salinas, Torrevieja y Guardamar).

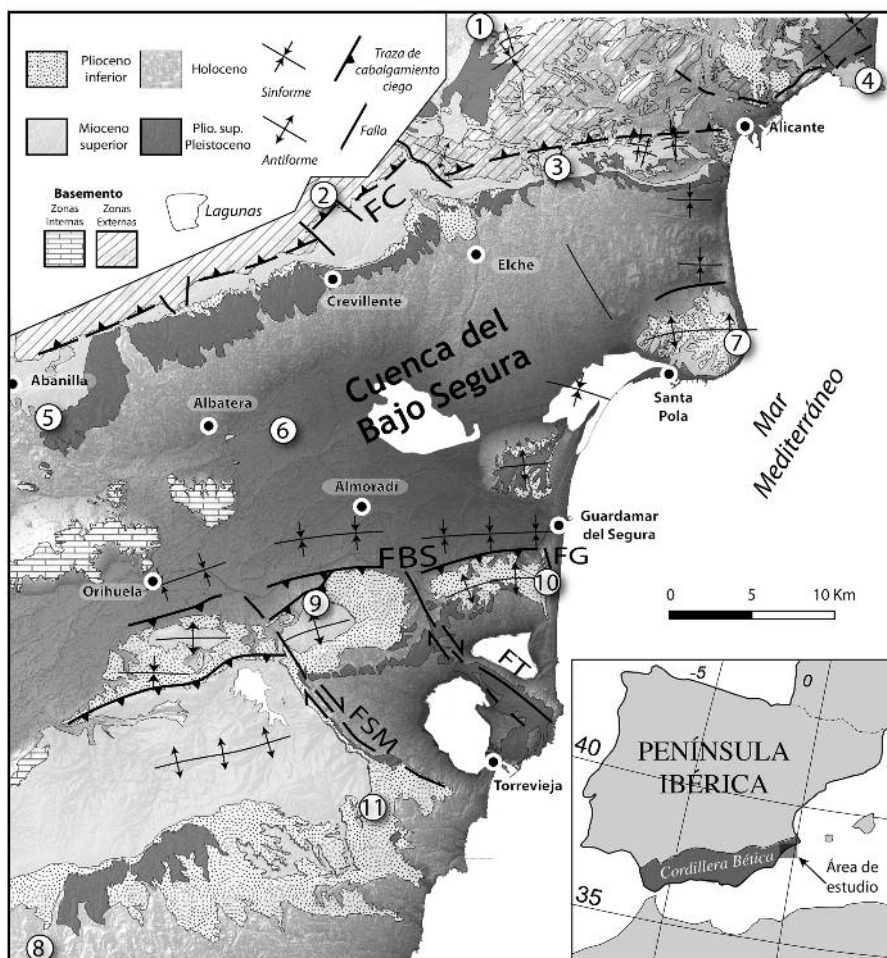


Fig. 1.- Localización geológica de la Cuenca del Bajo Segura. Los círculos numerados representan los 11 vértices geodésicos de la red GPS. FC: Falla de Crevillente; FBS: Falla del Bajo Segura; FSM: Falla de San Miguel de Salinas; FT: Falla de Torrevieja; FG: Falla de Guardamar.

Fig. 1.- Geological setting of the Bajo Segura basin. The numbered circles are the GPS sites. FC: Crevillente Fault; FBS: Bajo Segura Fault. F.S.M.: San Miguel de Salinas Fault; FT: Torrevieja Fault; FG: Guardamar Fault.

Los cálculos de tasas de deformación en la cuenca se han centrado mayoritariamente en el sector meridional. Varios autores han obtenido diferentes tasas de desplazamiento para la falla del Bajo Segura: entre 0,75 y 1 mm/año (Taboada *et al.*, 1993), 0,23 mm/año (García-Mayordomo y Martínez-Díaz, 2006) y entre 0,2 y 0,4 mm/año (Alfaro *et al.*, 2012).

Por otra parte, se han obtenido valores regionales de levantamiento en este sector meridional de la cuenca del Bajo Segura de 0,2 mm/año a partir de terrazas marinas tirienses (Somoza, 1993) y de entre 0,1 y 0,15 mm/año a partir de un marcador estratigráfico de edad pliocena (Giménez *et al.*, 2009). También, estos últimos autores obtienen una tasa de levantamiento en el sector meridional de la Cuenca del Bajo Segura de 0,2 mm/año a partir de un perfil de nivelación de alta precisión de unos 30 km de longitud.

### Tasas de deformación geodésicas

#### Red geodésica de control en la cuenca del Bajo Segura

Se ha cuantificado la deformación actual en la cuenca del Bajo Segura mediante la realización de campañas GPS episódicas de una red, formada por 11 vértices geodésicos, que se estableció en 1999 (Alfaro *et al.*, 2000). Los vértices tienen instalados centrados forzosos que garantizan la colocación de la antena exactamente en la misma posición planimétrica en cada medición. Los puntos 7001 y 7007 se encuentran en el exterior de la cuenca. Los puntos 7002, 7003, 7004 y 7005 se localizan a lo largo de la zona de falla de Crevillente, y los puntos 7009 y 7010 sobre los pliegues asociados a la falla del Bajo Segura. El punto 7011, localizado al sur, sirve de referencia para cuantificar la actividad de la falla de San Miguel de Salinas. En el eje central de

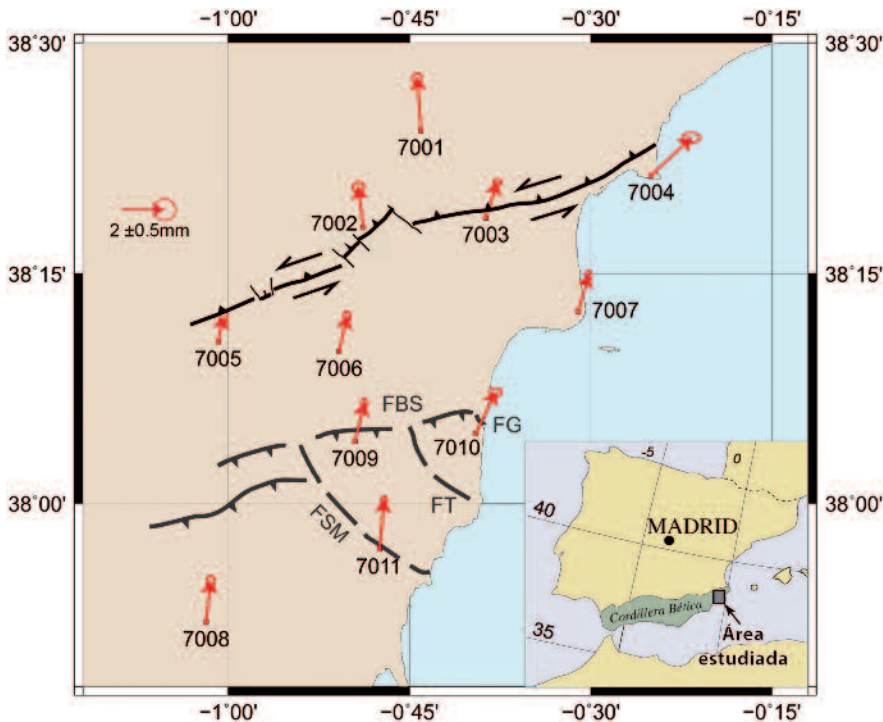


Fig. 2.- Velocidades residuales de la red GPS del Bajo Segura (numeradas del 7001 al 7011), respecto al modelo GEODVEL. Elipses de error estándar. FBS: Falla de Bajo Segura; FSM: Falla de San Miguel de Salinas; FT: Falla de Torrevieja; FG: Falla de Guardamar.

Fig. 2.- Residual velocities of the Bajo Segura GPS network (numbered from 7001 to 7011), related to the GEODVEL model with 39% confidence ellipses. FBS: Bajo Segura Fault; FSM: San Miguel de Salinas Fault; FT: Torrevieja Fault; FG: Guardamar Fault.

la cuenca se encuentran los puntos 7006 y 7007 (Figs. 1, 2). Hasta el momento se han realizado 4 campañas de observación que cubren un periodo de 14 años: junio de 1999, septiembre de 2001, septiembre de 2002 y enero de 2013. En las tres primeras campañas se utilizaron 5 equipos GPS bifrecuencia modelos Leica SR399 con antena integrada y SR9500 con antena externa AT302. La duración media por campaña fue de 8 días durante los cuales se desarrollaba la observación de todos los vértices de la red. En la última campaña se emplearon 11 estaciones de referencia Leica Geosystems

GR10 con antenas AR10, lo que permitió observar simultáneamente toda la red geodésica de control con observación continua durante cinco días.

*Procesado de observaciones GPS y estimación del campo de velocidad*

Para el procesado de las observaciones GPS se ha utilizado la versión 6.2 del software GIPSY-OASIS. Este software utiliza la técnica de posicionamiento puntual de precisión conocido por las siglas PPP (Zumberge *et al.*, 1997). Con el fin de obtener la serie temporal, todas las campañas han sido

procesadas con la misma estrategia PPP en el marco de referencia IGS08. Para el tratamiento de la serie temporal (Fig. 3) se ha utilizado el software CATS (Williams, 2008). El intervalo de tiempo de 14 años considerado ha permitido realizar una mejor estimación de las velocidades de las estaciones de la red de control con unos errores mucho más realistas. En la tabla I se muestran las velocidades absolutas estimadas a partir de las series temporales de coordenadas geodésicas locales en las componentes Este y Norte, así como las velocidades residuales con respecto al modelo GEODVEL (Argus *et al.*, 2010). La figura 2 muestra las velocidades residuales respecto al modelo GEODVEL fijando la placa Euroasiática (Polo de Euler: 55.285°N 102.345°E).

A partir de las componentes E y N de las velocidades residuales se deducen los siguientes resultados en el sector meridional: (1) acortamiento N-S de  $0,73 \pm 0,38$  mm/año entre los puntos de control 7008 y 7005, (2) acortamiento N-S de  $0,65 \pm 0,31$  mm/año entre los puntos 7011 y 7006, de los cuales 0,53 corresponden al acortamiento entre los puntos 7011 y 7009, y 0,12 entre los puntos 7009 y 7006, y (3) acortamiento N-S de  $0,24 \pm 0,29$  mm/año entre los puntos 7010 y 7007. Aunque la distribución de los puntos de control geodésico no permite hacer una comparación homogénea, se observa cómo los datos son coherentes. En el sector septentrional, la escasez de puntos de control al norte de la falla de Crevillente dificulta la interpretación, pero se pueden extraer las siguientes conclusiones: (1) acortamiento N-S de  $0,07 \pm 0,26$  mm/año entre los puntos de control 7007 y 7003, (2) movimiento de cizalla sinistrorso comparando las componentes residuales E-O que varía entre 0,44 y 0,75 mm/año entre las estaciones 7001 y

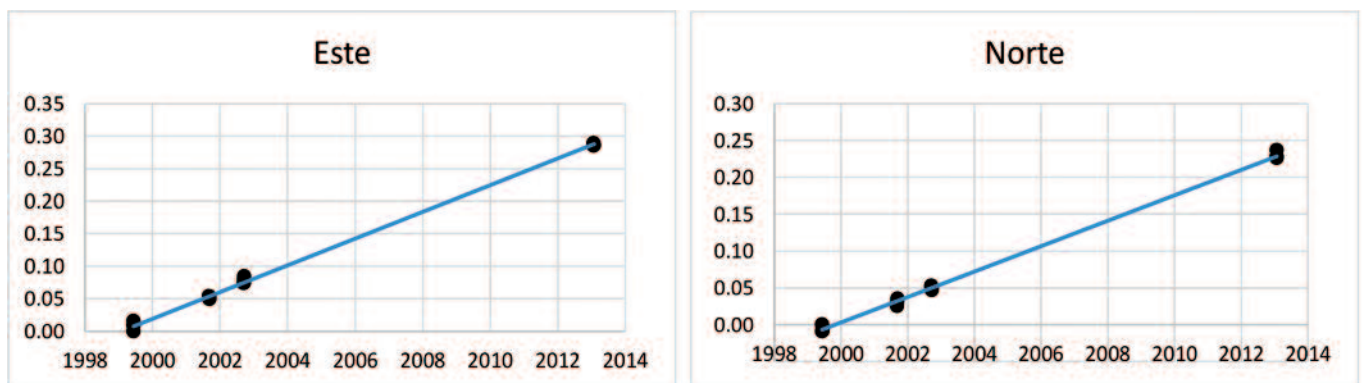


Fig. 3.- Serie temporal Este-Norte correspondiente al vértice 7003. Se muestran las cuatro campañas calculadas. Desplazamientos definidos en metros.

Fig. 3.- East-North Time series of 7003 site for the four computed campaigns. Units are meters.

Nº vértice	Velocidad absoluta				Velocidad residual	
	E	N	sE	sN	E	N
7001	19,79	18,13	0,21	0,22	-0,19	2,49
7002	19,74	17,54	0,27	0,24	-0,25	1,89
7003	20,51	17,30	0,20	0,14	0,50	1,66
7004	21,85	17,42	0,42	0,23	1,81	1,80
7005	20,23	16,83	0,22	0,28	0,25	1,17
7006	20,34	17,30	0,16	0,25	0,33	1,65
7007	20,46	17,36	0,14	0,22	0,40	1,73
7008	20,18	17,56	0,21	0,26	0,14	1,90
7009	20,41	17,42	0,13	0,28	0,38	1,77
7010	20,91	17,61	0,27	0,20	0,85	1,97
7011	20,19	17,95	0,14	0,19	0,13	2,30

**Tabla I.- Velocidades absolutas y residuales de la red GPS del Bajo Segura en mm/año. E y N: componentes E-O y N-S de las velocidades; sE y sN: Desviación estándar en el ajuste lineal de las componentes E-O y N-S de la velocidad absoluta.**

*Table I.- Absolute and residual velocities of the Bajo Segura GPS network (mm/yr). E and N: E-W and N-S velocity components; sE and sN: Standard deviation in linear regression of the E-W and N-S absolute velocity components.*

7002 (situadas al norte de la falla de Crevillente) y las estaciones 7003, 7006 y 7005 (situadas al sur de la falla de Crevillente).

## Discusión y conclusiones

Los datos GPS muestran un acortamiento NNO-SSE coherente con los estudios geodésicos regionales realizados en el Mediterráneo occidental (Serpelloni *et al.*, 2007), con los mecanismos focales (Coca y Buforn, 1994; Buforn *et al.*, 1995) y con la geología local (Montenat *et al.*, 1990; Alfaro *et al.*, 2002a). Al norte de la falla de Crevillente se observa extensión cuando comparamos las velocidades de los puntos 7001 y 7002 (situados en la Zona Externa) con otros puntos situados más al sur. Este resultado no es consistente con nuestros datos geológicos. Esta deformación extensional se estaría produciendo al norte de la Cuenca del Bajo Segura, en la Zona Externa, que está fuera del objetivo de este trabajo. Es necesario realizar nuevas campañas GPS en los próximos años e incrementar el número de puntos de control (actualmente sólo disponemos de los puntos 7001 y

7002) en este sector septentrional, para comprobar si realmente se está produciendo o no extensión al norte de la cuenca del Bajo Segura.

Los valores de acortamiento N-S en el sur de la cuenca (entre 0,24 y 0,73 mm/año) son mayores que los obtenidos en el norte de la cuenca (0,07 mm/año), aunque estos últimos son poco representativos estadísticamente debido al error asociado a la medida. Estos resultados de acortamiento y el movimiento sinistrorso deducido para la falla de Crevillente de 0,44-0,75 mm/año son coherentes con los resultados obtenidos recientemente en la prolongación hacia el suroeste del corredor de cizalla de la Bética oriental. Echeverría *et al.* (2013), a partir del análisis de la red GPS CuaTeNeo, obtienen una velocidad sinistrorsa de la falla de Alhama de Murcia de  $1,3 \pm 0,2$  mm/año, y un acortamiento en la dirección N315°E de  $0,8 \pm 0,4$  mm/año.

Finalmente, los resultados de acortamiento obtenidos a partir de esta red GPS son ligeramente diferentes a las tasas de desplazamiento obtenidas para la falla del Bajo Segura, resultando algo menores que las estimaciones de Taboada *et al.* (1993) y mayores que las de García-Mayordomo y Martínez-Díaz (2006) y Alfaro *et al.* (2012). Futuras campañas GPS y estudios geológicos son necesarios para precisar la tasa de desplazamiento de esta falla sismogénica.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos del Ministerio de Economía y Competitividad AYA2010-15501 y CGL2011-30153-C02-02 y por el proyecto CSD2006-0041 (European Regional Development Fund-ERDF). Agradecemos los interesantes comentarios de Carlos Sanz de Galdeano, Jesús Galindo-Zaldívar y Giorgi Khazaradze que han mejorado el presente trabajo.

## Referencias

Alfaro, P., Borque, M.J., Estévez, A., Gil, A.J. y Molina, S. (2000). *Geo-temas* 1-4, 245-248.

- Alfaro, P., Andreu, J.M., Delgado, J., Estévez, A., Soria, J.M. y Teixidó, T. (2002a). *Geological Magazine* 139(3), 331-341.
- Alfaro, P., Delgado, J., Estévez, A., Soria, J.M. y Yébenes, A. (2002b). *Marine Geology* 186, 337-349.
- Alfaro, P., Bartolomé, R., Borque, M.J., Estévez, A., García-Mayordomo, J., García-Tortosa, F.J., Gil, A.J., Gràcia, E., Lo Iacono, C. y Perea, H. (2012). *Journal of Iberian Geology* 38(1), 271-284.
- Argus, D.F., Gordon, R.C., Heflin, M.B., Ma, C., Eanes, R.J., Willis, P., Peltier, W.R. y Owen, S.E. (2010). *Geophysical Journal International* 180, 913-960.
- Buforn, E., Sanz de Galdeano, C. y Udías, A. (1995). *Tectonophysics* 248, 247-261.
- Coca, P. y Buforn, E. (1994). *Estudios Geológicos* 50, 33-45.
- Delgado, J., Giner, J., López-Casado, C. y Auernheimer, C. (1993). En: *Problemática Geoambiental y Desarrollo, Murcia, Tomo II*, 627-636.
- Echeverría, A., Khazaradze, G., Asensio, E., Gárate, J., Martín-Dávila, J. y Suriñach, E. (2013). *Tectonophysics* 608, 600-612.
- García-Mayordomo, J. y Martínez-Díaz, J.J. (2006). *Geogaceta* 40, 19-22.
- Giménez, J., Borque, M.J., Gil, A.J., Alfaro, P., Estévez, A. y Suriñach, E. (2009). *Studia Geophysica et Geodaetica* 53, 81-98.
- Montenat, C., Ott d'Estevou, P. y Coppier, G. (1990). *Documents et Travaux IGAL* 12-13, 313-368.
- Muñoz, D. y Udías, A. (1991). En: *Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibero-Maghrebian Region* 8, 175-182.
- Nocquet, J. (2012). *Tectonophysics* 579, 220-242.
- Serpelloni, E., Vasnucci, G., Pondrelli, S., Argnani, A., Casula, G., Anzidei, M., Baldi, P. y Gasperini, P. (2007). *Geophysical Journal International* 169, 1180-1200.
- Somoza, L. (1993). *Publicaciones Especiales, Instituto Español de Oceanografía* 12, 237 p.
- Taboada, A., Bousquet, J.C. y Philip, H. (1993). *Tectonophysics* 220, 223-241.
- Williams, S.D.P. (2008). *GPS solutions* 12, 147-153.
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M. y Webb, F.H. (1997). *Journal of Geophysical Research* 102, 5005-5017.