



ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN EN LA PENÍNSULA IBÉRICA A PARTIR DEL ESTUDIO DE MECANISMOS FOCALES, IMPLICACIONES EN LA PELIGROSIDAD SÍSMICA

Strain analysis in the Iberian Peninsula from focal mechanism solutions, seismic hazard impacts

J.L. Giner-Robles (1), R. Pérez-López (2), J. Elez (3), P.G. Silva (3), E. Rodríguez Escudero (1), C. Canora (1), M.A. Rodríguez-Pascua (2), T. Bardají (4), E. Roquero (5), P. Huerta (3), y M.A. Perucha (2),

(1) Dpto. Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. c/ José Antonio Novais, 2. 28004-Madrid, SPAIN. jorge.giner@uam.es, emilio.rodriguez@uam.es, carolina.canora@uam.es.

(2) IGME – Instituto Geológico y Minero de España – Geological Survey of Spain. C/Ríos Rosas 23, Madrid 28003 – SPAIN. r.perez@igme.es; ma.rodriguez@igme.es; ma.perucha@igme.es

(3) Dpto. Geología, Universidad de Salamanca. Ávila – Salamanca, SPAIN. pgsilva@usal.es, j.elez@usal.es, phuerta@usal.es

(4) Dpto. Geología, Geografía y Medio, Universidad de Alcalá de Henares. 28801-Madrid. SPAIN. teresa.bardaji@uah.es

(5) Dpto. Edafología, Universidad Politécnica de Madrid. 28040 Madrid. SPAIN. elvira.roquero@upm.es

Resumen: Se han analizado 682 mecanismos focales de terremotos localizados en la Península Ibérica y zonas próximas. Aplicando métodos de determinación del tensor de deformación (Modelo de Deslizamiento), se han obtenido diferentes resultados para cada uno de los mecanismos focales: (1) plano de falla entre los dos planos nodales del mecanismo, (2) orientación de máximo acortamiento horizontal (e_y), (3) factor de forma de tensor de deformación (k') y (4) tipo de falla. Con estos datos se pueden realizar análisis regionales y locales de las características de la fracturación activa en el área considerada: (a) caracterización de la fracturación, (b) orientación de máximo acortamiento horizontal, (c) zonación en función del tipo de falla y del factor de forma del tensor de deformación. Este tipo de información puede ser muy útil a la hora de realizar tanto diferentes análisis locales de la peligrosidad sísmica, como para incorporar a los catálogos sísmicos terremotos históricos destructivos sin información de la fuente sísmica.

Palabras clave: mecanismo focal, peligrosidad sísmica, Península Ibérica, tensor de deformación.

Abstract: We analysed 682 earthquake focal mechanism solutions located in the Iberian Peninsula and nearby areas. We have obtained different parameters applying methods of determination of the strain tensor (Slip Model): (1) the fault plane between the nodal planes of the focal mechanism, (2) the orientation of the maximum horizontal shortening (e_y), (3) the strain shape factor (k') and (4) the type of fault. With these data, regional and local analysis of active faulting can be carried out in Spain: (a) fracture characterization, (b) the orientation of maximum horizontal shortening, (c) spatial zonation according to the type of fault and (d) the strain shape factor. These results can be useful for seismic hazards studies of local zones and for including destructive historical earthquakes in the seismic catalogs.

Key words: focal mechanism, seismic hazard, Iberian Peninsula, strain tensor.

El análisis del estado de deformación a partir del estudio de los mecanismos focales de los terremotos puede aportar mucha información sobre la peligrosidad sísmica.

En este trabajo se presentan los resultados preliminares aplicados a la Península Ibérica. Para ello se han analizado un total de 682 construcciones de mecanismos focales de terremotos en la zona de Ibero-Magrebí obtenidos de diferentes fuentes (Herraiz et al., 2000, IGN, 2018, Stich et al., 2006 y 2010). Se han analizado aplicando la metodología de análisis de la deformación para mecanismos focales propuesta por Herraiz et al. (2000) y Giner et al. (2009), utilizando el Modelo de deslizamiento (*Slip Model*) (Reches, 1983) se define el plano de falla (De Vicente, 1988) y proporciona la forma y orientación del tensor de deformación para cada uno de los mecanismos focales analizados.

Esta metodología, a diferencia de otras similares que calculan el tensor de esfuerzos que mejor se ajusta a una población, permite establecer una serie de parámetros para cada uno de los mecanismos focales analizados: (1) discrimina entre los dos planos nodales del mecanismo el plano de falla neoformado, (2) determina la orientación de máximo acortamiento horizontal (e_y) (considerando e_z

vertical), establece tanto el factor de forma de tensor de deformación (k') (3), como el carácter a la falla establecida (4) (normal, normal direccional, direccional normal, inversa, inversa direccional, direccional inversa y desgarre).

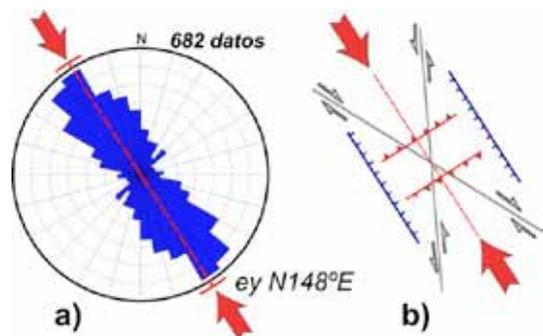


Figura 1: a) Rosa de orientaciones de máximo acortamiento horizontal (e_y) obtenida del análisis de los 682 mecanismos focales considerados (Modelo de Deslizamiento). b) Modelo simplificado de orientaciones de fallas para la e_y media obtenida (N148°E).

Figure 1. a) Rose diagram of horizontal maximum shortening (e_y), deduced from the analysis of 682 focal mechanisms constructions (Slip Model). b) Theoretical model of fault scheme in agreement with the regional e_y (N148°E).

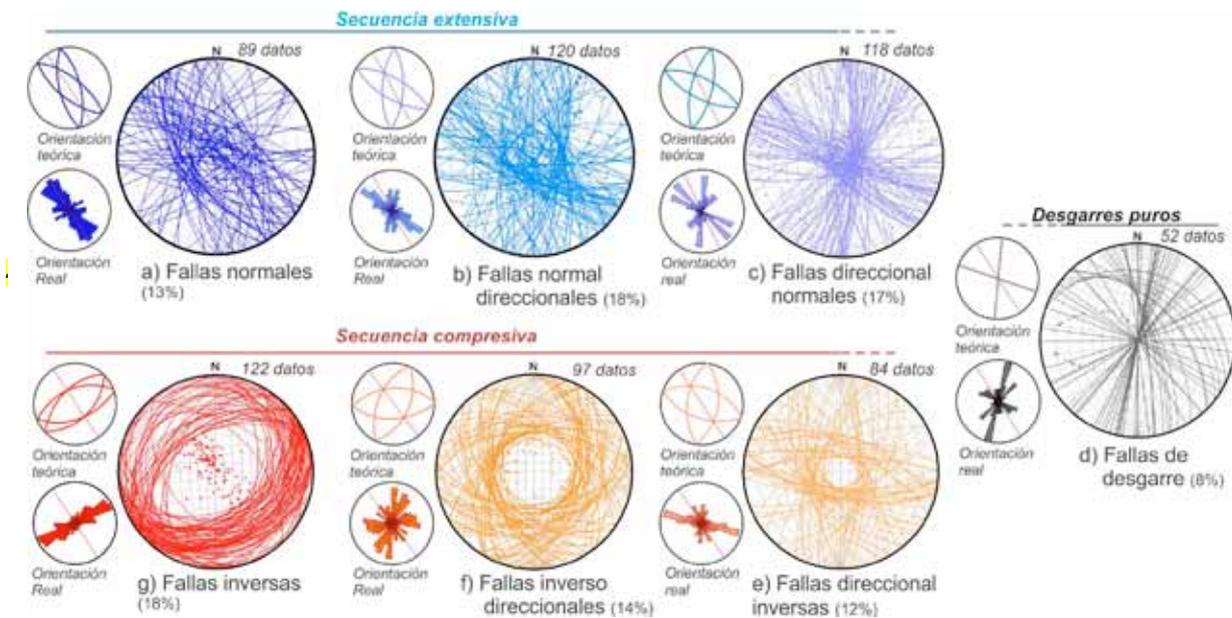


Figura 2: Resultados del análisis de las orientaciones de los planos de falla neoformados en función del carácter deducido: (a) normal, (b) normal direccional, (c) direccional normal, (d) desgarre, (e) direccional inversa, (f) inversa direccional y (g) inversa (Modelo de Deslizamiento) (Reches, 1983).

Figure 2. Neofomed fault plane orientation analysis based on the inferred fault geometry: (a) normal fault, (b) normal fault with shear component, (c) oblique normal fault, (d) strike-slip fault, (e) oblique reverse fault, (f) reverse fault with shear component, (g) reverse fault (Slip Model) (Reches, 1983).

Se ha realizado un análisis de la dirección de máximo acortamiento horizontal (e_y) del conjunto de los datos considerados obteniendo una e_y según $N148^\circ E \pm 12^\circ$ (Fig. 1). Este primer análisis nos permite tanto establecer la homogeneidad en la orientación del tensor de deformación en la zona, como la caracterización de los patrones teóricos de fracturación.

En la figura 2 se representa el análisis de las orientaciones de las fallas en función del modelo teórico de orientaciones definido por el tensor de deformación regional (e_y $N148^\circ E$). Los resultados muestran una buena correlación entre las orientaciones de las fallas seleccionadas y las definidas por la simetría ortorrómbica del modelo de fracturación teórico (*Slip Model*) (Reches, 1983) para esa orientación de e_y .

En ciertos casos se pueden observar algunas anomalías en la orientación de la fracturación que representan variaciones locales en el tensor de deformación regional. En el caso de las fallas normales (Fig. 2a), se puede observar una moda secundaria ortogonal según NE-SW que puede representar permutaciones locales del tensor de deformación regional. De igual forma, en alguno de los tipos de fracturación considerados (fallas normal direccionales y direccionales inversas) (Fig. 2b y e) se observa también que una de las orientaciones teóricas no está bien representada (orientaciones NNE-SSO), frente a las orientaciones NO-SE y ONO-ESE que si están muy bien definidas. Este hecho puede ser debido a la estructura geológica regional previa que puede inducir el mayor desarrollo de estas orientaciones.

El factor de forma del tensor de deformación obtenido con este tipo de análisis permite realizar diferentes análisis con aplicación directa en el análisis de la peligrosidad sísmica.

El factor de forma (k') está definido por la relación entre dos de los ejes principales del tensor de deformación e_y/e_z ; siendo e_x , e_y y e_z (vertical) los ejes principales del tensor de deformación. Para su mejor representación se han normalizado los valores de k' : -300 falla inversa pura, desgarres puros 0, y 300 falla normal pura (ver Giner et al. 2008 y 2009). Esta normalización permite realizar mapas interpolados de valores continuos de k' que pueden mejorar los análisis pormenorizados de las variaciones espaciales de la forma del tensor de deformación (De Vicente et al., 2008, Giner et al., 2008).

En este trabajo se han interpolado los valores de k' individuales obtenidos del análisis de los mecanismos focales para toda la Península Ibérica (Fig. 3a). Este mapa define áreas caracterizadas por diferentes tipos de fallas en función de la forma del tensor de deformación obtenido.

Los resultados obtenidos con este análisis se han comparado con el mapa de asignación de rotura preferente del modelo de zonas definido para la revisión de la peligrosidad sísmica en la península (García-Mayordomo, 2015) (Fig. 3b). Ambos mapas presentan una buena correlación general, mostrando grandes similitudes en algunas áreas (e.g. zonas normales: 18, 20, 21, 25, 26, 27, 35, 36; zonas inversas: 10, 46, 48, 50; zonas de desgarre: 6).

Aunque por otro lado, otras zonas presentan una mayor complejidad en el mapa de k' (Fig.3a) que la representada en el zonificación de la revisión (Fig.3b). Este hecho se debe a que en el mapa de la zonificación se han adoptado los valores tipo para cada zona a partir de los valores discretos de los tipos de mecanismos situados en esa zona, mientras que en el mapa de k' la representación de valores continuos permite definir con mayor grado de detalle las variaciones en la forma del tensor de deformación.

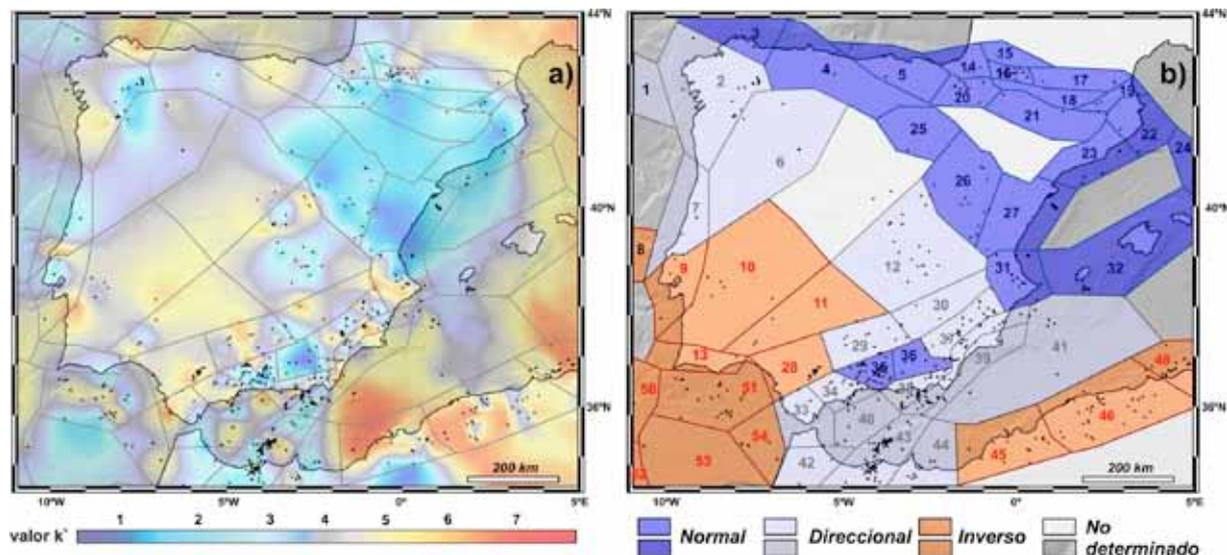


Figura 3: a) Mapa del factor de forma del tensor de deformación (k' normalizado), obtenido de la interpolación de cada uno de los mecanismos focales (1 falla normal, 2 falla normal direccional, 3 falla direccional normal, 4 desgarre, 5 falla direccional inversa, 6 falla inverso direccional y 7 falla inversa). b) Mapa de asignación de rotura preferente en el modelo de zonas definido para la revisión de la peligrosidad sísmica en la península (modificado de García-Mayordomo, 2015). Los números representan la identificación de las zonas establecidas en la zonificación.

Figure 3: a) Strain shape factor map (normalized value k'), deduced from interpolated focal mechanism data (1 normal fault, 2 normal fault with shear component, 3 oblique normal fault, 4 strike-slip fault, 5 oblique reverse fault, 6 reverse fault with shear component, 7 reverse fault). b) Map of preferential seismic rupture of the source zones model for the seismic hazard assessment in the Iberian Peninsula (modified from García-Mayordomo, 2015).

Este tipo de representación de valores continuos de k' permite mejorar los análisis locales de peligrosidad sísmica, ya que aporta información adicional a la establecida a partir de la zonación.

Para representar las posibles aplicaciones de esta metodología se ha analizado en detalle la zona 31 (ver Fig. 3b). Esta zona, en el límite entre las provincias de Valencia y Alicante, se localiza geológicamente en la zona de confluencia entre las estructuras de orientación bética (ENE-OSO) y las directrices NO-SE presentes en el área. Su complejidad estructural queda de manifiesto en el mapa de k' (Fig. 3a) en el que se observa la alta variabilidad del valor de este parámetro en esta zona. Además en su interior se localizan dos de los terremotos históricos más importantes ocurridos en la Comunidad Valenciana: el terremoto de Tavernes del 18 de diciembre de 1396 (IX EMS, X ESI-07) y el terremoto de Estubeny del 23 de marzo de 1748 (IX EMS, IX ESI-07) (Silva et al., 2014).

La figura 4 muestra un esquema tectónico en el que se representan las principales estructuras obtenidas de la síntesis del mapa geológico continuo del IGME, mostrando claramente las dos directrices estructurales principales de la zona: ENE-OSO y NO-SE. Se representa también la sismicidad instrumental y las construcciones de los mecanismos focales situados en esta zona (Giner-Robles et al., 2016).

Los resultados del análisis de los mecanismos focales muestran direcciones de máximo acortamiento horizontal (σ_1) coherentes, tanto con la cinemática de las principales estructuras geológicas de la zona, como con el resultado regional obtenido del análisis del conjunto de los datos (Fig. 1a).

El análisis del factor de forma del tensor de deformación define claramente dos áreas en la zona con una dirección regional de σ_1 coherente según NO-SE (Fig. 4): (1) una zona extensiva hacia el noreste con predominio de fallas normales y normal direccionales, definiendo una extensión regional según NE-SO (σ_1 según NO-SE); (2) una zona compresiva en el sureste caracterizada por fallas inversas e inverso direccionales coherentes con una σ_1 según NO-SE.

Los mecanismos sintéticos de los terremotos históricos de Tavernes (1396) y Estubeny (1748) (Fig. 4) se han deducido del análisis de las fuentes sísmicas modelizadas en la construcción de los "ShakeMaps" de estos eventos (Giner et al., 2016). El carácter de los mecanismos obtenidos en esta modelización son coherentes con la distribución de los valores de k' en la zona, lo que valida la definición de la posible fuente sísmica a partir de la modelización y construcción de "ShakeMaps" (Silva et al., 2017).

El análisis de los parámetros del tensor de deformación a partir de las construcciones de mecanismos focales de terremotos puede proporcionar información adicional a los análisis de peligrosidad sísmica a diferentes escalas y permite la calibración y validación de modelizaciones de fuentes sísmicas de terremotos destructivos históricos.

Agradecimientos: Este trabajo es una contribución a los proyectos CGL2015-67169-P (USAL), CGL2013-47412-C2-2-P (IGME), EGEO (2612-IGME) y al grupo QTECT-AEQUA y GQM-AEQUA.

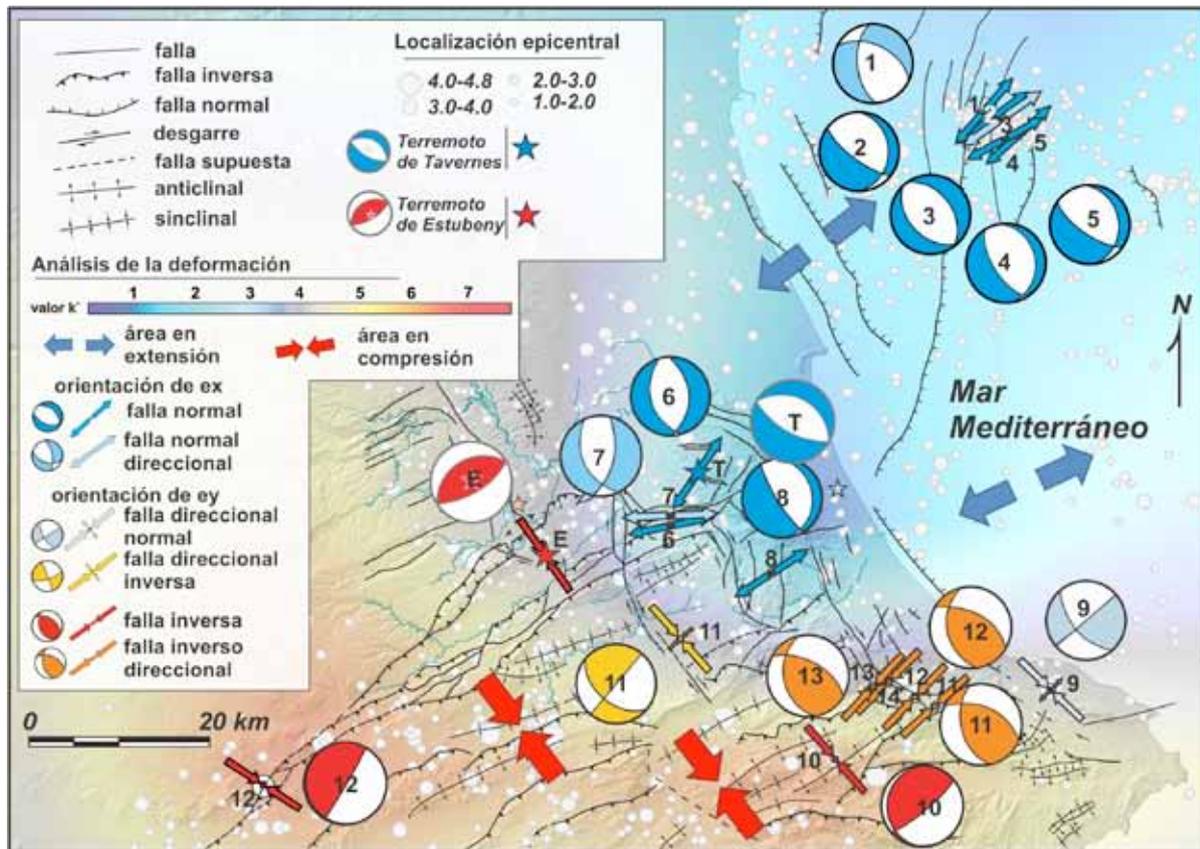


Figura 4: Mapa tectónico esquemático de la zona meridional del Golfo de Valencia (zona 31, ver Fig. 3b). Se representan los datos puntuales de orientación (ey/ex, flechas) y el factor de forma del tensor de deformación (k') (modificado de Giner et al., 2016).

Figure 4: Tectonic sketch of the southern part of the Gulf of Valencia (zone 31, see Fig 3b). Strain orientation data (ey/ex, arrows) and the shape of the strain tensor (k') (colour area, modified from Giner et al. 2016).

Referencias bibliográficas

- De Vicente, G. (1988). *Análisis poblacional de fallas. El sector de enlace Sistema Central- Cordillera Ibérica*, Tesis doctoral, UCM, 317 pp.
- García Mayordomo, J. (2015). Creación de un modelo de zonas sismogénicas para el cálculo del mapa de peligrosidad sísmica de España. *Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia*, 5. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 130 pp
- Giner-Robles, J.L., Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., Martínez, J.J. y González-Casado, J.M. (2009). Present-day strain field on the South American slab underneath the Sandwich Plate (Southern Atlantic Ocean): A kinematic model. En: *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate*. Geological Society, London, Special Publications, 328, 155–167.
- Giner-Robles, J.L., Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., Martínez, J.J. y González-Casado, J.M. (2008). Cluster analysis of the 3D instrumental seismicity within a subduction zone (Caribbean, Cocos and North American tectonic convergence): Implications for a kinematical tectonic model. En: *33rd International Geological Congress*, STT-07, Oslo (Norway).
- Giner-Robles, J.L., Elez, J., Silva, P.G., Rodríguez Pascua, M.A., Pérez-López, R., Bardají, T., Perucha, M.A., Roquero, E. y Rodríguez-Escudero, E. (2016). Definición de fuentes sísmicas de terremotos históricos a partir de la escala de intensidades macrosísmicas ESI-07 y la modelización por SHAKEMAPS. Implicaciones en la peligrosidad sísmica. *Geo-Temas*, 16 (1), 669-672.
- Herraiz, M., De Vicente, G., Lindo-Naupari, R., Giner, J., Simón, J.L., González-Casado, J.M., Vadillo, O., Rodríguez-Pascua, M.A., Cicuéndez, J.I., Casas, A., Cabañas, L., Rincón, P., Cortés, A.L., Ramírez, y M., Lucini, M., (2000). The recent (upper Miocene to Quaternary) present tectonic stress distributions in the Iberia Peninsula. *Tectonics*, 19, 762–786.
- I.G.N. (2018). Moment Tensor catalogue. <http://www.ign.es>
- De Vicente, G., Cloetingh, S.; Muñoz-Martín, A.; Olaiz, A.; Stich, D.; Vegas, R.; Galindo-Zaldívar, J. y Fernández-Lozano, J. (2008). Inversion of moment tensor focal mechanisms from active stresses around Microcontinent Iberia: Tectonic implications. *Tectonics*, 27, 0-22.
- Reches, Z. (1983) Faulting of rocks in three-dimensional strain fields, II. Theoretical analysis. *Tectonophysics*, 95, 133-156.
- Silva, P.G., Rodríguez-Pascua, M.A., Giner-Robles, J.L., Pérez-López, R., Lario, J., Perucha, M.A., Bardají, T., Huerta, P., Roquero, E. y Bautista, B. (2014). *Catálogo de los efectos geológicos de los terremotos en España*. IGME-AEQUA, 358 pp.
- Silva, P.G., Elez, J., Giner-Robles, J.L., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Roquero, E., Bardají, T., Martínez Graña, A.M. (2017). ESI-07 ShakeMaps for instrumental and historical events in the Betic Cordillera (SE Spain): An approach based on geological data and applied to seismic hazard. *Quaternary International*, 451, 185-208.
- Stich, D., Serpelloni, E., de Lis Mancilla, F. y Morales, J. (2006). Kinematics of the Iberia–Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations. *Tectonophysics*, 426, 295–317.
- Stich, D., Martín, R. y Morales, J. (2010). Moment tensor inversion for Iberia–Maghreb earthquakes 2005–2008. *Tectonophysics*, 483, 390–398.