

Aplicación de la anisotropía de la susceptibilidad magnética en el Jurásico inferior calcáreo al análisis estructural del Alto Atlas Central (región de Imilchil, Marruecos)

Anisotropy of magnetic susceptibility of Lower Jurassic calcareous rocks applied to the structural analysis of the Central High Atlas (Imilchil area, Morocco)

Bennacer Moussaid¹, Antonio Casas-Sainz², Hmidou El Ouardi³, Juan José Villalain⁴, Abdelkader Mahmoudi³, Sara Torres-López⁴, Vicente Carlos Ruiz-Martínez⁵ y Pablo Calvin⁴

¹ Département de Géologie. Ecole Normale Supérieure, Université Hassan II, Casablanca, Marruecos. bnmous@hotmail.fr

² Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza. 50009 Zaragoza, España. acasas@unizar.es

³ Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, BP 11201 Zitoune, Meknès, Marruecos. hmidouelouardi@yahoo.fr, geo_mahmoudi@yahoo.fr

⁴ Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos. Avda Cantabria s/n, 09006 Burgos, España. villa@ubu.es, storres@ubu.es, pcalvin@ubu.es

⁵ Departamento de Geofísica y Meteorología, Facultad de Física, Universidad Complutense de Madrid. Avda. Complutense s/n, 28040 Madrid, España. vcarlos@fis.ucm.es

ABSTRACT

In this work we present the results of the application of Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) to structural analysis in a sector of the Central High Atlas (Morocco). The studied sedimentary sequences comprise mainly limestones and calcareous marls, having medium to high susceptibility values in most sites. The obtained magnetic fabrics (average per sites) are both prolate and oblate. Sites located in the gentle, wide synclines that occupy most part of the studied area show a magnetic fabric that can be interpreted as primary, probably acquired during sedimentation or early diagenesis. The magnetic lineation in these cases is very well defined, and shows a NW-SE trend, that can be interpreted as related to the extension direction during the Jurassic, responsible for the opening of the High Atlas basin. Conversely, sites located in the NE-SW-trending anticlinal ridges, some of them showing axial-plane cleavage, show a magnetic fabric modified by compression, whose lineation is parallel to the axis of these anticlines.

Key-words: AAMS, intracontinental orogen, deformation, extension, Imilchil, Central High Atlas, Morocco.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) al análisis estructural de una parte del Alto Atlas Central (Marruecos). Las series estudiadas son fundamentalmente margas calcáreas y margocalizas y muestran valores de susceptibilidad medios a altos en la mayor parte de las estaciones estudiadas. Las fábricas magnéticas obtenidas (medias por estaciones) son indistintamente prolatas u oblatas. Las estaciones localizadas en los sinclinales amplios que caracterizan la zona de estudio muestran una fábrica que puede interpretarse como primaria, probablemente adquirida durante la sedimentación o diagénesis temprana. La lineación magnética en estos casos están muy bien definida, y presenta dirección NW-SE, que puede interpretarse como relacionada con la extensión Jurásica responsable de la apertura de la cuenca del Alto Atlas. Por el contrario, las estaciones localizadas en las crestas de anticlinales NE-SW, algunas de ellas con foliación tectónica, muestran una fábrica modificada, con una lineación paralela a los ejes anticlinales.

Palabras clave: ASM, cadena intracontinental, deformación, extensión, Imilchil, Alto Atlas Central, Marruecos.

Geogaceta, 59 (2016), 27-30
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 13 de julio de 2015
Fecha de revisión: 20 de octubre de 2015
Fecha de aceptación: 27 de noviembre de 2015

Introducción

La Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) es una propiedad tensorial que se expresa mediante un elipsoide de tres ejes y permite conocer la orientación preferente de los minerales (Kligfield *et al.*, 1977; Borradaile, 1988). En múltiples casos esta orientación es el resultado de la deformación interna que afecta a las rocas. La ASM es una técnica de análisis utilizada cada vez con mayor

frecuencia, puesto que permite obtener una imagen de la deformación sufrida por las rocas sin la necesidad de indicadores macroscópicos. Se ha utilizado con éxito para rocas débilmente deformadas (Parés *et al.*, 1999), y para el estudio de la deformación extensional y compresiva en cuencas invertidas (Soto *et al.*, 2009; Oliva-Urcia *et al.*, 2010; Moussaid *et al.*, 2013).

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la región de Imilchil,

que forma parte de la cadena intracontinental del Atlas (Choubert y Faure-Muret, 1962; Michard, 1976), resultante de la inversión de cuencas transtensivas (Mattaier *et al.*, 1977; Frizon de Lamotte *et al.*, 2000; Teixell *et al.*, 2003, 2007). La estructura de la zona se caracteriza por la existencia de pliegues kilométricos NE-SW definidos en su mayor parte por materiales del Lías, con amplios sinclinales en cuyos núcleos afloran materiales del Dogger, separados por crestas anticlinales

muy estrechas, en algunos de cuyos núcleos aparecen gabros de edad jurásica y materiales del nivel de despegue regional (margas y evaporitas del Triásico).

El objetivo fundamental del presente trabajo es reconstruir la historia deformacional de las rocas jurásicas a partir de la ASM y comparar los resultados de análisis de estructuras con las direcciones de la lineación magnética.

Muestreo y metodología

Un total de 17 estaciones fueron perforadas mediante un taladro de gasolina, obteniendo una media de 11 muestras por estación que fueron orientadas *in situ*. Las muestras fueron cortadas en el laboratorio mediante una sierra doble en especímenes estándar de paleomagnetismo (diámetro 2,5 cm y longitud 2,2 cm). El muestreo se realizó de acuerdo con un perfil longitudinal NW-SE sobre la carretera de El Ksiba-Imilchil, intentando que estuvieran representados todos los niveles estratigráficos margo-calcareos del Jurásico (Fig. 1). Las medidas de ASM se realizaron mediante un susceptómetro Kappabridge KLY-3S en la Universidad de Zaragoza. Los datos ASM fueron analizados con el *software Anisoft 4.2* (Chadima y Jelínek, 2009).

Para el análisis direccional de los datos se realizaron las correcciones tectónicas abatiendo las capas a la horizontal en algunos casos y restituyendo el 40% del buzamiento de las crestas en otros, para comparar el agrupamiento y la significación de las direcciones de ejes del elipsoide de ASM entre tres situaciones posibles: i) situación actual después de la compresión cenozoica, ii) situación paleogeográfica cuando las capas estaban horizontales (fábrica extensional o tectónica de LPS), y iii) después de 40% de corrección (restitución de las crestas anticlinales a la situación de buzamiento jurásico-cretácico; antes de la fase de compresión cenozoica, utilizando las interpretaciones de Torres-López *et al.*, 2015).

Resultados

El tratamiento de las muestras de ASM de las estaciones estudiadas en la zona de Imilchil muestra valores de susceptibilidad media (K_m) muy elevados para este tipo de rocas (margocalizas), normalmente po-

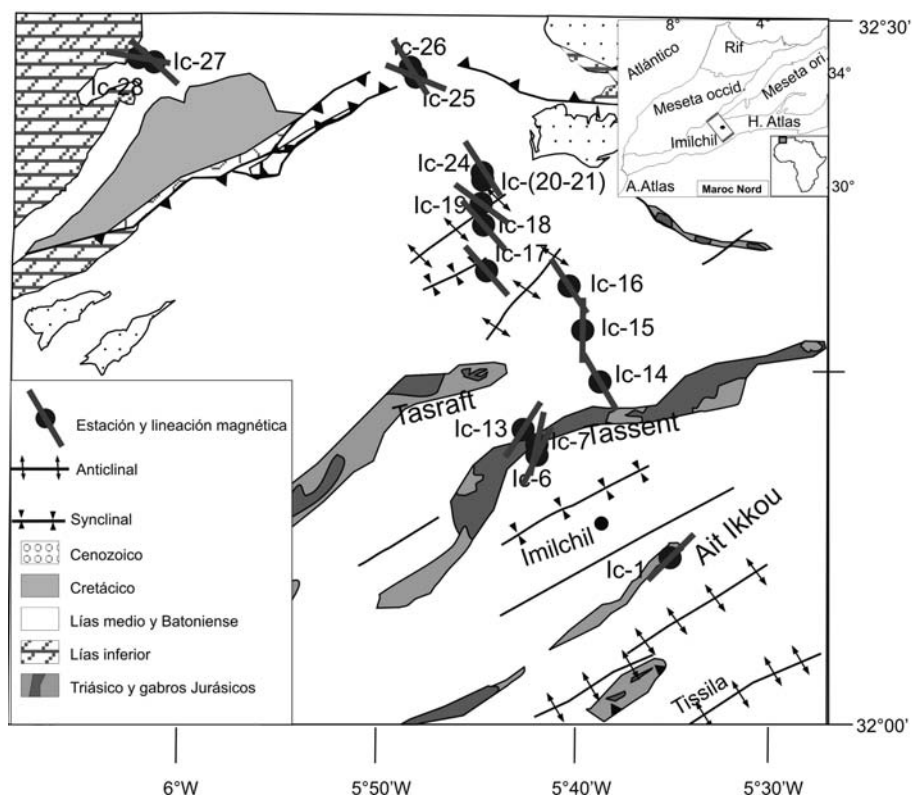


Fig. 1.- Esquema estructural de la región de Imilchil y localización de las estaciones de muestreo
Fig. 1.- Structural sketch of the Imilchil area and location of sampling sites.

bres en filosilicatos, y puede estar relacionado con la presencia de magnetita (Torres-López *et al.*, 2014). Este tipo de fábricas magnéticas asociadas con magnetita son relativamente frecuentes en calizas remagnetizadas y han sido relacionadas con procesos extensionales en las etapas finales de la evolución de cuencas (Soto *et al.*, 2008; García-Lasanta *et al.*, 2014). Los valores de K_m están en torno a 400×10^{-6} (S.I.). El grado medio de anisotropía (P_j) muestra valores bajos, en torno a 1,026, lo que indica que se trata de rocas débilmente deformadas. El parámetro T indica tanto valores negativos como positivos, resultado de la presencia de fábricas oblatas y prolatas. Los diagramas de correlación entre los parámetros escalares muestran la ausencia de una relación lineal entre los distintos parámetros, lo cual permite utilizar dichos parámetros como indicadores estructurales (Oliva-Urcia *et al.*, 2013) (Fig. 2).

Los estereogramas de los ejes principales de los elipsoides de susceptibilidad magnética de las estaciones estudiadas muestran orientaciones bien definidas. La lineación magnética (k_{max}) muestra dos direcciones principales: NW-SE y NE-SW. La primera de estas direcciones (NW-SE) aparece

sobre todo en las estaciones localizadas en los sinclinales amplios. La segunda (NE-SW) se encuentra en las estaciones situadas en las proximidades de las crestas anticlinales. Las lineaciones magnéticas orientadas NW-SE muestran un buen agrupamiento tras la restitución de las capas a la horizontal (la estratificación dominante muestra direcciones próximas a NE-SW). Los ejes k_{max} se agrupan de forma clara en torno a la dirección N320°E y los ejes k_{min} en torno a la vertical (Figs. 3A y 3B).

La lineación NE-SW aparece especialmente en las crestas anticlinales de Tasraft y en la terminación periclinal del anticlinal de Amagmag (también conocido como anticlinal de Tissila). La fábrica de estas estaciones es de tipo tectónico, y aparece bien desarrollada, con una concentración de ejes k_{max} próxima a la vertical y ejes k_{min} subhorizontales antes de aplicar la corrección tectónica (Figs. 4A, 4B y 4C). Esta fábrica muestra una dirección de k_{max} subparalela a los ejes de los anticlinales. En el anticlinal de Amagmag se encuentran planos de foliación tectónica de dirección principal N080°E y buzamiento 80°S, bien desarrollada, paralela a la dirección del anticlinal (Figs. 4D y 4E).

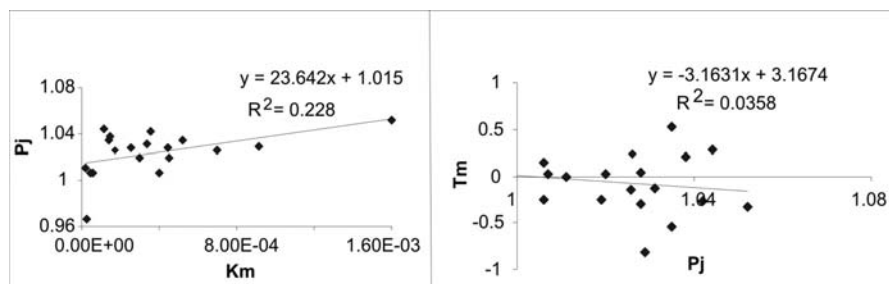


Fig. 2.- Correlaciones entre los distintos parámetros magnéticos del elipsoide de ASM de las estaciones estudiadas.

Fig. 2.- Correlations between the different magnetic parameters of the AMS ellipsoid in the studied sites.

Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos en las zonas de los sinclinales favorecen la interpretación de una fábrica primaria, adquirida durante la diagénesis precoz (Parés *et al.*, 1999; Soto *et al.*, 2007; García-Lasanta *et al.*, 2013). Esta fábrica magnética conserva por tanto la dirección de extensión jurásica responsable de la apertura de las cuencas atlásicas durante ese período. La existencia de esta dirección de extensión NW-SE ha sido comprobada mediante análisis mesoestructural sobre fallas normales y grietas de extensión (Figs. 3C y 3D) y confirmada también por trabajos anteriores (Ibouh, 2004). En cuanto a las fábricas de estaciones localizadas en zonas próximas a las crestas anticlinales, los resultados de ASM fueron comparados en las tres situaciones para determinar si la fábrica magnética tiene relación con el buzamiento ante-cretácico de las capas de los anticlinales. Se han definido dos fases de plegamiento en las cuencas atlásicas: la primera es responsable del levantamiento (jurásico a cretácico) de los flancos de las

crestas, recientemente relacionadas con el diapirismo durante el Jurásico de las unidades evaporíticas triásicas (Saura *et al.*, 2014). Un 60% del buzamiento de las capas de las crestas anticlinales está ligada a esta fase ante-cretácica (ver Torres-López *et al.*, 2014). La segunda fase compresiva es cenozoica, ligada a la convergencia entre las placas africana y europea, y responsable de la verticalización de capas cerca de los núcleos de las crestas.

La buena agrupación de los ejes k_{min} y k_{max} antes de la restitución de la estratificación a la horizontal, indica una adquisición de la fábrica en un estadio coetáneo o ligeramente tardío dentro del proceso de plegamiento. Este resultado es compatible con el desarrollo de la foliación después del levantamiento ante-cretácico de las crestas anticlinales, aunque no permite precisar la edad de formación de la foliación observada en campo (Fig. 4).

La mayor parte o la totalidad de la foliación tectónica responsable de la orientación de la fábrica magnética es por tanto posterior al plegamiento ante-cretácico y al acortamiento paralelo a las

capas (*Layer Parallel Shortening*, LPS), pero coherente con una foliación de plano axial asociada a los pliegues. Este resultado es incompatible con la hipótesis de un desarrollo precoz de la foliación penetrativa propuesta por Laville y Piqué (1992) y Laville *et al.* (2004). Esta foliación de plano axial, aunque está concentrada en las crestas de los anticlinales, también se puede observar en los pliegues de pequeña escala situados en el núcleo de los sinclinales plurikilométricos, alejados de las intrusiones ígneas de edad jurásica (Fig. 4E), y ligados a la fase compresiva cenozoica (Torres-López *et al.*, 2014). Según los resultados de la ASM y las observaciones de campo, puede deducirse que al menos una parte de la deformación penetrativa está probablemente ligada a la fase compresiva cenozoica de la reestructuración atlásica. Su ausencia en la mayor parte de la cadena se debe a la concentración de la deformación en las zonas próximas a los accidentes mayores y los cabalgamientos asociados a los pliegues métricos, especialmente los que presentan dirección N070°E a E-W que cortan los núcleos de las crestas o bordean las mini-cuencas ligadas a procesos diapíricos (accidentes de Tassent, Tissila, Ait Ali ou- Ikou, Amagmag y los de la zona sur de Timarighine).

El presente trabajo muestra la potencialidad de la ASM como herramienta para determinar la deformación finita y sus relaciones con las estructuras. No obstante, y aunque se han diferenciado de forma clara las fábricas extremas extensional y compresiva, la determinación detallada de los cambios en la deformación y sus variaciones laterales, requiere un

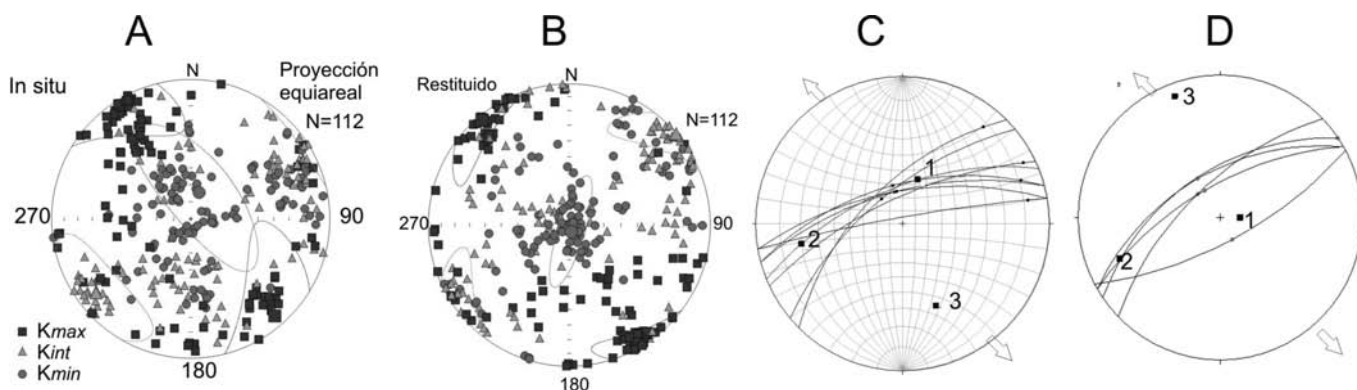


Fig. 3.- Estereogramas para los ejes de los elipsoides de ASM antes (A) y después (B) de la restitución de la estratificación a la horizontal (corrección tectónica). Proyección de Schmidt, hemisferio inferior. En C) y D) se muestran las medidas de fallas normales en la región de Imilchil.

Fig. 3.- Stereoplots of the axes of the AMS ellipsoids in the studied area before (A) and after (B) tectonic correction. Schmidt net, lower hemisphere. In C) and D) measures of normal faults in the Imilchil area.

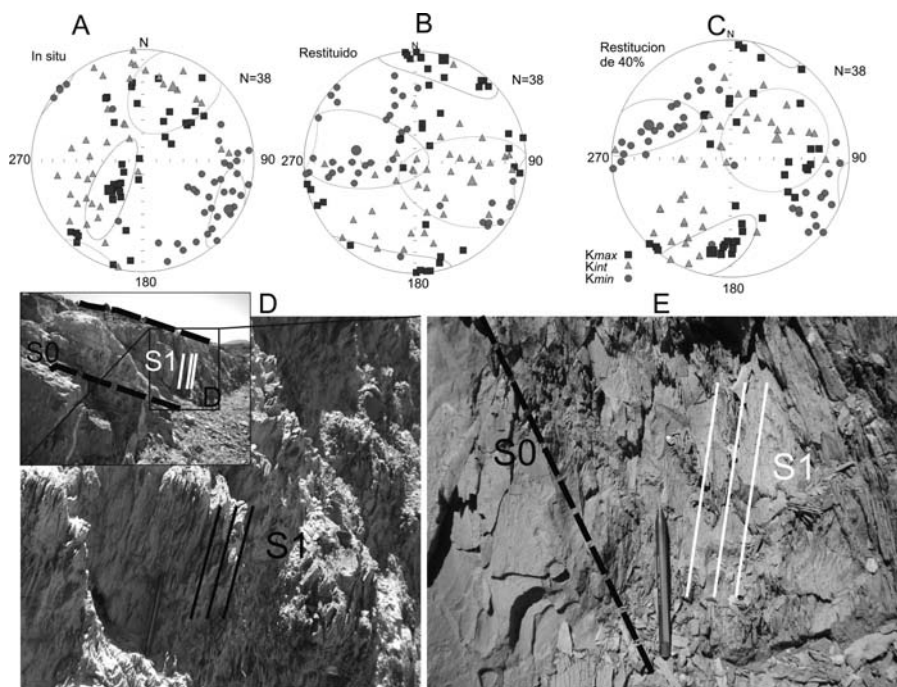


Fig. 4.- Stereograma que muestra los ejes de los elipsoides de ASM de las estaciones situadas cerca de las crestas anticlinales antes (A) y después (B) de la restitución de la estratificación a la horizontal (C) después de restitución a la geometría ante-cretácica. Foliación tectónica (S1) en las cercanías del anticlinal de Amagmag (D) y lejos de los anticlinales en un pliegue al sur de Agoudal de vergencia norte (E).

Fig. 4.- Stereoplot showing the axes of AMS ellipsoids of sites located near the anticlinal ridges, before (A) and after (B) and (C) bedding restoring (tectonic correction). Tectonic foliation (S1) near the Amagmag ridge (D) and far from the ridges, in a north-verging fold located south of Agoudal (E).

muestreo más exhaustivo con cobertura tridimensional. Esto contribuirá a comprender el mecanismo responsable de la generación de la foliación tectónica en gran parte del dominio atlásico.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por los proyectos CGL2013-42670-P y CGL2009-08969. Los autores agradecen a Néstor Vegas y un revisor anónimo su contribución para mejorar la calidad del trabajo.

Referencias

Borradaile, G.J. (1988). *Tectonophysics* 156, 1–20.
 Chadima, M. y Jelínek, V. (2009). *Anisoft Data Browser*, 4.2 edn. AGICO Inc.
 Choubert, G. y Faure-Muret, A. (1962). En: *Livre a la Mémoire du Professeur Paul Fallot*, Mémoire hors Série, vol. 1, Société Géologique de France, Paris, 447-527.

Frizon de Lamotte, D., Saint Bézar, B., Bracène, R. y Mercier, E. (2000). *Tectonics* 19, 740-761.
 García-Lasanta, C., Oliva-Urcia, B., Román-Berdiel, M.T., Casas, A.M. y Hirt, A.M. (2014). *Journal of Structural Geology* 66, 84-111.
 García-Lasanta, C., Oliva-Urcia, B., Román-Berdiel, T., Casas, A.M. y Pérez-Lorente, F. (2013). *Geophysical Journal International*, 194, 182-199.
 Ibouh, H. (2004). *Du rift avorté au bassin sur décrochement, contrôles tectonique et sédimentaire pendant le Jurassique (Haut Atlas central, Maroc)*. Thèse d'état ès-Sciences, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, 224 p.
 Kligfield, R. Lowrie, W., y Dalziel, I.D.W. (1977). *Tectonophysics* 40, 287-308.
 Laville, E. y Piqué, A. (1992). *Geologische Rundschau* 81, 157-170.
 Laville, E., Piqué, A., Amrhar, M. y Charroud, M. (2004). *Journal of African Earth Sciences* 38, 145-153.
 Mattauer, M., Tapponier, P., Proust, F. (1977). *Bulletin de la Société Géolo-*

gique de France 77(7), 521–526.
 Michard, A. (1976). *Éléments de géologie marocaine*. Notes Mém. Serv. Géol. Maroc 252, 408 pp.
 Moussaid B., El Ouardi H., Casas-Sainz A., Villalaín J.J., Román-Berdiel T., Oliva-Urcia B., Soto R. y Torres-López S. (2013). *Journal of African Earth Sciences* 87, 13-32.
 Oliva-Urcia, B., Casas, A.M., Soto, R., Villalaín, J.J. y Kodama, K. (2010). *Geophysics Journal International* 184, 111–130.
 Oliva-Urcia B., Roman-Berdiel, T., Casas A.M., Bógalo M.F., Osácar, C. y García-Lasanta C. (2013). *Journal of Structural Geology* 46, 220-234.
 Parés, J.M., van der Pluijm, B. y Dinarés-Turell, J. (1999). *Tectonophysics* 307, 1-14.
 Saura, E., Vergés, J., Martín-Martín, J.D., Messenger, G., Moragas, M., Razin, P., Grélaud, C., Joussiaume, R., Malaval, M., Homke, S. y Hunt, D.W. (2014). *Journal of the Geological Society, London* 171, 97-105.
 Soto, R., Casas-Sainz, A.M., Villalaín, J.J. y Oliva-Urcia, B. (2007). *Tectonophysics* 445, 373–394.
 Soto, R., Casas-Sainz, A.M., Villalaín, J.J., Gil-Imaz, A., Fernández-González, G., del Río, P., Calvo, M. y Mochales, T. (2008). *Journal of the Geological Society, London* 165, 1007-1018
 Soto, R., Larrasoana, J.C., Arlegui, L.E., Beamud, E., Oliva-Urcia, B. y Simón, J.L. (2009). *Journal of Structural Geology* 31, 512–522.
 Teixell, A., Arboleya, M.L., Julivert, M. y Charroud, M. (2003). *Tectonics* 22,5, 1051. doi:10.1029/2002TC001460.
 Teixell, A., Ayarza, P., Tesón, E., Babault, J., Alvarez-lobato, F., Charroud, M., Julivert, M., Barbero, L., Amrhar, M. y Arboleya, M.L. (2007). *Revista de La Sociedad Geológica de España* 20, 333-350.
 Torres-López S., Villalaín, J.J., Casas, A., El Ouardi, H., Moussaid B. y Ruiz-Martínez V.C. (2014). *Journal of the Geological Society, London* 171, 673-687.
 Torres-López S., Casas, A., Villalaín, J.J., El Ouardi, H. y Moussaid B. (2015). *Terra Nova* 28, 110-119.