

Análisis de la fábrica magnética en modelos analógicos de arcillas

Magnetic fabric analysis in analogue models of clays

Cristina García-Lasanta¹, Esther Izquierdo-Llavall² y Teresa Román-Berdiel¹

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España. cgarcialasanta@gmail.com, mtdjrb@unizar.es

² Departamento de Geodinàmica i Geofísica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona. C/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona, Espanya. esther.izquierdo@ub.edu

ABSTRACT

This study shows the magnetic fabric analysis applied to several analogue models developed with common commercial red clays. By dispersing the clays in water and after allowing their subsequent decantation, we were able to reproduce the acquisition of a depositional magnetic fabric (oblate geometry of the magnetic ellipsoid with the minimum susceptibility axis perpendicular to the deposit plane). In a strike-slip deformation model (Riedel experiment), magnetic lineation is parallel to the stretching direction. In the shortening model, magnetic lineation orients perpendicular to the shortening direction. The obtained results illustrate the great potential of these commercial red clays to be used in this type of analogue models, as well as their capacity to register a coherent magnetic fabric in each case.

Key-words: *Magnetic fabrics, analogue models, red clays, Riedel experiment, shortening.*

RESUMEN

Este estudio presenta el análisis de la fábrica magnética en una serie de modelos analógicos realizados con arcillas rojas comerciales. A partir de la disgregación de la arcilla en agua y su posterior decantación conseguimos reproducir la adquisición de una fábrica magnética deposicional (geometría oblonga del elipsoide magnético con el eje mínimo de susceptibilidad perpendicular al plano de depósito). En un modelo de deformación de desgarre (experimento de Riedel), la lineación magnética se dispone paralela a la dirección de estiramiento. En el modelo de acortamiento, la lineación magnética se orienta perpendicular a la dirección de acortamiento. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto el gran potencial de la arcilla roja comercial para ser utilizada en este tipo de modelos analógicos, así como su capacidad de registrar una fábrica magnética coherente en cada caso.

Palabras clave: *Fábrica magnética, modelos analógicos, arcillas rojas, experimento de Riedel, acortamiento.*

Geogaceta, 61 (2017), 103-106
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 18 de julio de 2016
Revisión: 3 de noviembre de 2016
Aceptación: 25 de noviembre 2016

Introducción

Los estudios de anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) en rocas sedimentarias sometidas a deformación indican que la orientación de la fábrica magnética puede verse condicionada por múltiples factores: condiciones sedimentarias, mineralogía magnética, superposición de eventos tectónicos, etc. Todos ellos dificultan la interpretación de la ASM como marcador de las condiciones de deformación.

La modelización analógica permite aislar las variables que actúan en un proceso geológico y determinar los factores que afectan y en qué medida lo hace cada uno. En este estudio, se mantienen constantes las condiciones de sedimentación y de mineralogía magnética, analizándose la influencia del régimen tectónico en la fábrica magnética.

Los primeros estudios de fábrica magnética en modelos analógicos analizaron los procesos de depósito y compactación en rocas sedimentarias (Hamilton y Rees, 1970; Rees y Woodall, 1975; Rees, 1983; Tarling y Hrouda, 1993) y los mecanismos de flujo en rocas volcánicas (Wing-Fatt y Stacey, 1966). Estudios posteriores abarcaron la modelización de procesos de deformación (Borradaile y Alford, 1987, 1988; Borradaile y Puumala, 1989; Richter, 1990, 1992; Richter *et al.*, 1991; Housen *et al.*, 1993) y estructuras diapíricas (Kratinová *et al.*, 2006). Dado que los materiales comúnmente utilizados para modelizar (arena, plastilina) son fundamentalmente diamagnéticos, en estos trabajos se añaden pequeñas cantidades de otros minerales magnéticos (e.g. magnetita, níquel), por lo que la ASM registra la fábrica de las partículas ferromagnéticas añadidas.

El objetivo de este trabajo es reproducir varios contextos tectónicos (desgarre y acortamiento) en un medio sedimentario cuyo material aún no está compactado, para determinar cómo influye cada uno en el registro de la fábrica magnética. El material analógico empleado en este estudio es la arcilla roja para modelar. Esta elección se basa en la simplicidad y homogeneidad de este material y en su semejanza con materiales arcillosos naturales que, aunque con mayor grado de impurezas o heterogeneidad, registran una ASM portada por minerales para- y ferromagnéticos. Los resultados obtenidos demuestran el potencial de este sencillo y barato material, tanto para reproducir diferentes contextos de deformación, como para registrar una fábrica magnética coherente con los mismos.

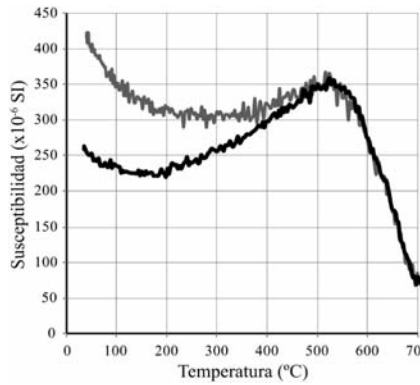


Fig. 1.- Curva de susceptibilidad frente a temperatura, de calentamiento (negro) y de enfriamiento (gris). Forma hiperbólica al comienzo de la curva típica de la presencia de fases paramagnéticas y caída de la susceptibilidad en el rango de temperatura típico de la hematite.

Fig. 2.- Susceptibility vs. temperature curve, both heating (black) and cooling (grey). Hyperbolic shape in the first part of the curve, typical for the presence of paramagnetic minerals, and susceptibility fall in the temperature range of hematite.

Caracterización magnética de la arcilla roja comercial

La arcilla empleada en este estudio es fácilmente adquirible en diversos formatos comerciales. Concretamente, se ha utilizado *arcilla roja para modelar Sio-2 escolar* procesada y distribuida por la empresa Cerámica Collet S.A. (Barcelona). La utilización de bloques de 1,5 kg facilitó la preparación de los modelos analógicos desarrollados en cada caso.

El comportamiento magnético de esta arcilla ha sido caracterizado mediante diversas curvas de susceptibilidad magnética frente a temperatura. Las medidas se realizaron en un susceptómetro KLY-3 Kappabridge al que se acopla un horno CS3 (AGICO Inc., República Checa) disponible en el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza.

Los resultados obtenidos indican la presencia de un importante contenido en hematites como fase ferromagnética, así como una fracción paramagnética notable, probablemente constituida por filosilicatos (Fig. 1). Esta mineralogía es habitual en materiales naturales, como las facies rojas permo-triásicas, y los análisis de fábrica magnética en ejemplos naturales de este tipo han dado buenos resultados en diferentes contextos tectónicos (Moussaid *et al.*, 2013; Izquierdo-Llavall *et al.*, 2013; García-Lasanta *et al.*, 2015; Santolaria *et al.*, 2015).

Modelos analógicos

Se realizaron un total de cinco experimentos, tres estáticos y dos dinámicos sometidos a

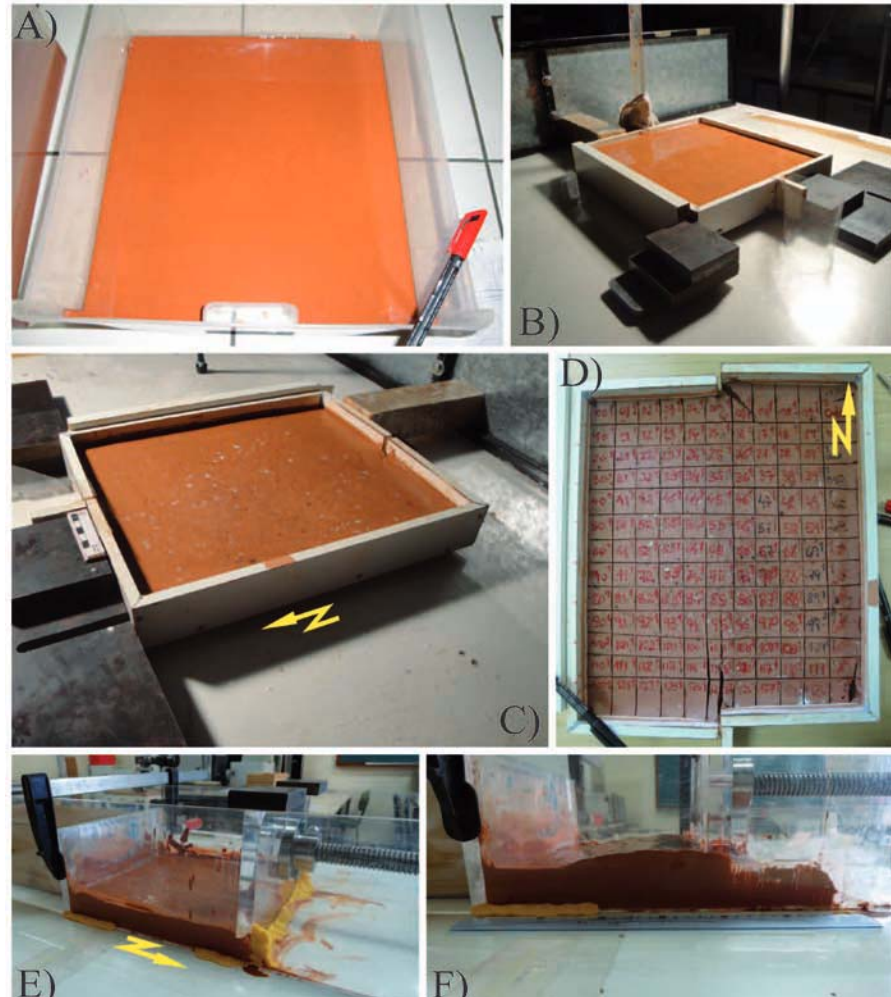


Fig. 2.- Modelos analógicos y preparación de muestras para AMS. A) Ejemplo de modelo de sedimentación. B y C) Diseño y desarrollo del modelo de Riedel (desgarre sinistral). D) Muestras obtenidas a partir del modelo de Riedel. E y F) Diseño y desarrollo del modelo de acortamiento. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Analogue models and preparation of samples for AMS. A) Example of sedimentation model. B and C) Design and development of the Riedel model (sinistral strike-slip). D) Samples obtained from Riedel model. E and F) Design and development of the shortening model. See color figure in the web.

deformación. Los modelos analógicos de deformación simulan dos contextos diferentes: i) desgarre (experimento de Riedel) y ii) acortamiento. En todos los modelos se procedió a disgregar por completo arcilla en agua en una proporción aproximada de 1kg de arcilla por cada 2 l de agua (excepto en el de compresión en el que se mezclaron 2,8kg de arcilla con 2 l de agua). Las mezclas se dejaron decantar entre 4 y 6 días generalmente, hasta adquirir la consistencia pastosa necesaria para ser sometidas a deformación.

Sedimentación

Se realizó una serie de tres modelos (S1, S2 y S3) enfocados a analizar la fábrica magnética asociada al depósito de las partículas. Para cada modelo se utilizó una geometría de caja diferente, con el fin de determinar si este hecho in-

fluye en la fábrica magnética registrada por el material durante la decantación (e.g. Fig. 2A). El modelo S1 se dejó decantar en un recipiente rectangular estanco de superficie horizontal y dimensiones 15x30 cm, hasta, debido a la pérdida de agua, que la arcilla adquirió la consistencia suficiente para poder ser cortada manualmente (tras dos semanas) con un cuchillo y así obtener muestras para las medidas de AMS. La lámina de arcilla pasó de presentar 4,5 cm de espesor al comienzo de la decantación a 2cm en el momento del corte (espesor que se mantuvo hasta el secado total de la arcilla). Se obtuvieron un total de 29 muestras, de aproximadamente 2,5 x 2,3 x 2 cm. El modelo S2 se desarrolló en un recipiente circular de 19,5 cm de diámetro y el modelo S3 en uno cuadrado de 35 x 35 cm (Fig. 2A). Ambos se dejaron secar durante un período mucho más largo de tiempo, hasta la pérdida total del agua líquida (por eva-

poración o absorción). Los espesores de la lámina de arcilla en el momento de corte eran 1,4 y 1,2 cm en S2 y S3, respectivamente. En ambos casos, las muestras fueron cortadas en el laboratorio con una sierra monodisco. A partir de ellos, se obtuvieron un total de 36 y 42 muestras de ASM, respectivamente, con dimensiones aproximadas de 2,2 x 2,4 cm en sus bases.

Desgarre

Con el fin de estudiar el registro de la fábrica magnética en un contexto tectónico de desgarre, se realizó el experimento de Riedel (Cloos, 1928; Riedel, 1929) en una caja rectangular (33,5 x 28 cm) para modelos de desgarre (Fig. 2B). La deformación del modelo se inició cuando la lámina de arcilla presentaba un espesor de 1,8 cm tras la decantación.

La torta de arcilla se sometió a un desgarre sinistral a una velocidad continua de 2,5 cm/h mediante el empuje de un pistón sobre una de las mitades de la caja (Fig. 2C). La deformación frágil (estructuras *R*, *P* e *Y*) dominó el modelo cuando se había producido un desplazamiento de 1,2 cm. El modelo, denominado R1, se dejó en reposo otros cinco días tras la deformación, hasta que obtuvo la consistencia necesaria para poder ser cortado para obtener las muestras para las medidas de ASM (el espesor de la arcilla se redujo a 1,4 cm). Se obtuvieron manualmente un total de 100 muestras de aproximadamente 2,3 x 2,3 cm en la base (Fig. 2D).

Acortamiento

El experimento de acortamiento simuló la generación de una cuña orogénica monovergente (Fig. 2E y F). Para realizarlo, una mezcla

de arcilla disgregada en agua con un espesor de unos 4,4 cm, se dejó decantar durante cuatro días en una caja aislada (para evitar fugas) de dimensiones 30 x 30 cm. Una de las paredes verticales de la caja es móvil y se encuentra unida a un pistón (Fig. 2E). El modelo se desarrolló tras dicho periodo de tiempo, cuando el espesor de la torta era de 3,3 cm. El pistón empujó a una velocidad constante de 2,5 cm/h durante aproximadamente 4 h, hasta producir un acortamiento total de 10 cm. En su estadio final, el mayor espesor de la placa se registró en la zona más cercana al pistón, donde se desarrolla la cuña orogénica (5,5 cm), mientras que en las zonas más distales se mantuvieron los 3,3 cm (Fig. 2F).

Tras dejar reposar el modelo durante 15 días, se procedió a cortar la arcilla usando un cuchillo. En ese momento su espesor era de 3,5 cm en la cuña y de 2,4 cm en la zona distal alejada del pistón. Se obtuvieron un total de 96 muestras aproximadamente cúbicas de 2,4 cm de altura a partir de este modelo, denominado C1. La parte basal de las muestras fue descartada en aquellas zonas del modelo en que el espesor de arcilla superaba los 2,4 cm.

Fábrica magnética

Se han analizado un total de 329 muestras de tamaño y proporciones próximas al estándar magnético, en un susceptómetro KLY-3S Kappabridge. La orientación de la fábrica magnética se estudió basándose en la estadística de Jelinek (1978). Los parámetros escalares con los que se define la geometría de los elipsoides magnéticos obtenidos son los definidos por Jelinek (1981). Los valores de susceptibilidad magnética varían entre 94,34 y 350,9 x 10⁻⁶ SI. El 97,8%

de las muestras presenta valores entre 100 y 300 x 10⁻⁶ SI. Los valores del grado de anisotropía P_j varían entre 1,093 y 1,339. Los modelos de sedimentación registran los valores más altos de P_j (1,269, 1,244, 1,308, respectivamente para S1, S2 y S3), mientras que el modelo C1 registra los más bajos (1,186 de media).

En todos los casos se ha descartado el material cercano a las paredes del contenedor o las cajas, con el fin de evitar efectos de borde, relacionados con la retracción por el secado de la arcilla, o con el rozamiento en las paredes.

En los modelos de sedimentación, S1, S2 y S3, la fábrica magnética presenta una geometría marcadamente oblata con el eje mínimo de susceptibilidad, k_{\min} , perpendicular al plano de depósito y muy bien agrupado, mientras que los ejes intermedio y máximo, k_{int} y k_{\max} , se dispersan en el plano de foliación magnética, paralelo al plano de depósito del modelo (Fig. 3A).

En el experimento de Riedel (R1) se aplicó un desgarre sinistral en dirección N-S con el norte en el lado opuesto al del pistón, tal y como se observa en la Fig. 2D. La fábrica magnética obtenida en este modelo presenta también el eje k_{\min} perpendicular al plano de depósito. Además, es visible una lineación magnética preferente (orientación preferente de k_{\max}) en dirección NE-SW (a 45° de la discontinuidad del modelo; Fig. 3B). Al analizar por separado las muestras más próximas (Fig. 3B.1) y las más alejadas respecto a la superficie de discontinuidad del modelo (plano de cizalla; Fig. 3B.2), se observa que la lineación magnética queda mejor definida en las primeras (con ángulos de confianza más pequeños, 22,4 y 3,5), que en las muestras más alejadas (46,1 y 4,5).

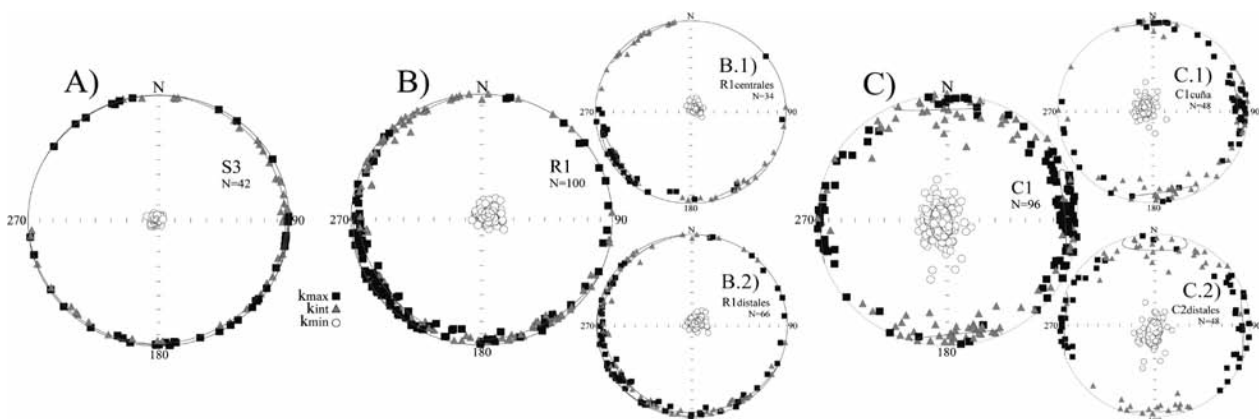


Fig. 3.- Elipsoides magnéticos: A) Modelo de sedimentación S3. B) Modelo de desgarre R1 y subdivisión de muestras según su posición respecto a la superficie de discontinuidad, cercanas (B.1) o distales (B.2). C) Modelo de acortamiento C1 y subdivisión de muestras según su posición respecto a la cuña orogénica, en la cuña (C.1) o distales (C.2). Explicaciones adicionales en el texto.

Fig. 3.- Magnetic ellipsoids: A) Sedimentation model S3. B strike-slip model R1 and subdivision according to samples position with respect to the discontinuity plane, near (B.1) and further (B.2). Compressional model C1 and subdivision according to samples position with respect to the orogen, in it (C.1) and further (C.2). Further explanations in the text.

Por último, en el modelo de acortamiento (C1) la dirección de acortamiento se orienta N-S, con el norte en el pistón (Fig. 2E). La fábrica magnética se caracteriza por elipsoides magnéticos con el eje mínimo perpendicular al plano de depósito y con cierta dispersión en el plano vertical que contiene a la dirección de acortamiento (Fig. 3C). La lineación magnética, también con cierto grado de dispersión, presenta un máximo claro de dirección E-W, es decir, perpendicular a la dirección de acortamiento y paralelo a la dirección de la cuña. No se observan variaciones notables en esta orientación asociadas a la posición de las muestras dentro del modelo (Fig. 3C.1 y 3C.2).

Discusión

Los tres modelos de sedimentación presentados reproducen la adquisición de una fábrica magnética asociada al depósito de partículas. En todos los casos, e independientemente de la geometría del recipiente y de los espesores de las tortas de arcilla, los elipsoides magnéticos obtenidos presentan geometría oblonga con el eje de susceptibilidad mínima perpendicular al plano de depósito (o sedimentación) y los ejes intermedio y máximo dispersos en dicho plano (e.g. Tarling y Hrouda, 1993). Con el fin de trabajar inicialmente sobre una fábrica magnética estrictamente deposicional, se procedió de la misma manera en la preparación de los siguientes modelos afectados por deformación (R1 y C1): i) disgregación de la arcilla en agua y ii) decantación previa a la deformación.

En el modelo de Riedel, la orientación de la lineación magnética es paralela a la dirección de estiramiento máximo en un régimen de desgarre sinistral. Además se observa una mejor definición de dicha lineación (mayor agrupamiento de los ejes k_{max}) en las muestras cercanas a la zona central del modelo y, por tanto, más afectadas por la deformación. Conforme nos separamos de dicha zona, aunque la lineación magnética sigue siendo coherente con el desgarre, presenta una mayor dispersión. Tras la modelización, la totalidad de la placa de arcilla adquiere una clara orientación mineral, a pesar de que la deformación visible queda restringida a una estrecha franja de unos 2,5 cm de ancho en la parte central del modelo.

El estudio del modelo de acortamiento indica que la lineación magnética se dispone preferentemente perpendicular a la dirección de acortamiento (e.g. Graham, 1966; Kligfield *et al.*, 1983), tal y como ocurre en la naturaleza.

A pesar de la intensidad de la deformación y del crecimiento en altura del modelo a partir

de cabalgamientos de muy pequeña escala (muchos de ellos retrovergentes), no se ha podido registrar una evolución espacial de la geometría de los elipsoides magnéticos conforme nos acercamos a las zonas de mayor deformación (Parés *et al.*, 1999), es decir las zonas en las que se genera la cuña orogénica en nuestro modelo. Esto puede ser debido a varios factores: i) la longitud del modelo no es suficiente como para registrar variaciones, incluidas las de la zona de antepaís más distal en la que pueden conservarse elipsoides magnéticos no afectados por fenómenos de acortamiento paralelo a las capas LPS: *layer parallel shortening*; ii) las características del material utilizado así como de la deformación impuesta en él no son capaces de reproducir los estadios de mayor deformación, asociados en los casos naturales al desarrollo de esquistosidad y el consiguiente desarrollo de guirnalda de intercambio entre los ejes intermedio y mínimo de susceptibilidad. En este sentido, se prevé continuar con series experimentales con distintos grados de acortamiento que permitan definir claramente la influencia de estos dos parámetros.

Conclusiones

Este trabajo pone de manifiesto el potencial de la arcilla roja comercial para el estudio de la ASM en modelización analógica. Por un lado, se ha demostrado que responde de manera positiva en el desarrollo de los modelos planteados y, por otro, que es capaz de registrar una fábrica magnética coherente en cada uno de los casos estudiados.

A partir de la disgregación en agua de esta arcilla y tras esperar el tiempo suficiente para su decantación (siendo este uno de sus inconvenientes principales), se constata la adquisición de una fábrica magnética deposicional planar (con el plano de foliación magnética paralelo al plano de sedimentación).

También se demuestra que la lineación magnética refleja la dirección de estiramiento esperada en: i) un proceso de desgarre, donde se dispone a 45° de la dirección de cizalla y 2) en un contexto de acortamiento, donde se dispone perpendicular a la dirección de acortamiento.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CGL2013-42670-P del MINECO. Gracias a Antonio Casas-Sainz por sus contribuciones a este trabajo. Agradecemos también las aportaciones de Andrés Gil-Imaz y de un revisor anónimo.

Referencias

- Borradaile, G. y Alford, C. (1987). *Tectonophysics* 133(1-2), 121-135.
- Borradaile, G. y Alford, C. (1988). *Journal of Structural Geology* 10(8), 895-904.
- Borradaile, G. y Puumala, M.A. (1989). *Tectonophysics* 164(1), 73-78.
- Cloos, H. (1928). Experiment zur inneren Tektonik. *Centralbl. f. Mineral u. Pal.* 1928(B), 609-621.
- García-Lasanta, C., Oliva-Urcia, B., Román-Berdiel, T., Casas, A.M., Gil-Peña, I., Sánchez-Moya, Y., Sopena, A., Hirt, A.M. y Mattei, M. (2015). *Tectonophysics* 651-652, 216-231.
- Graham, J.W. (1966). En: *The earth beneath the continents* (J.S. Steinhart y T.J. Smith, Eds.). American Geophysical Union, Geophysical Monographs 10, 627-648.
- Hamilton N. y Rees, A.I. (1970). En: *Paleogeophysics* (S.K. Runcorn, Ed.). London Academic Press, 445-464.
- Housen, B.A., Richter, C. y Van der Pluijm, B. A. (1993). *Tectonophysics* 220 (1-4), 1-12.
- Izquierdo-Llavall, E., Casas-Sainz, A.M. y Oliva-Urcia, B. (2013). *Journal of structural Geology* 57, 97-113.
- Jelinek, V. (1978). *Studia Geophysica et Geodae-tica* 22, 50-62.
- Jelinek, V. (1981). *Tectonophysics* 79, 63-70.
- Kligfield, R., Lowrie, W., Hirt, A. y Siddans A.W.B. (1983). *Tectonophysics* 98, 59-85.
- Kratinová, Z., Závada, P., Hrouda, F., Schulmann, K. (2006). *Tectonophysics* 418, 51-61.
- Moussaid, B., El Ouardi, H., Casas-Sainz, A., Villalain, J.J., Román-Berdiel, T., Oliva-Urcia, B., Soto, R. y Torres-López, S. (2013). *Journal of African Earth Sciences* 87, 13-32.
- Parés, J.M., Van der Pluijm B.A. y Dinarès-Turell, J. (1999). *Tectonophysics* 307, 1-14.
- Rees, A.I. (1983). *Sedimentology* 30, 437-448.
- Rees, A.I. y Woodall, W.A. (1975). *Earth and Planetary Science Letters* 25(2), 121-130.
- Richter, C. (1990). The anisotropy of magnetic susceptibility-numerical models, deformation experiments, and practical application in structural geology. *Tüb. Geowiss. Arb., Ser. A* 8, 123.
- Richter, C. (1992). *Geophysical Journal International* 110, 451-464.
- Richter, C., Frisch, W., Ratschbacher, L. y Schwarz, H-U. (1991). *Tectonophysics* 200(1-3), 143-155.
- Riedel, W. (1929). Zur mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Centralbl. f. Mineral. u. Pal.* 1929(B), 354-368.
- Santolaria, P., Casas, A.M. y Soto, R. (2015). *Geophysical Journal International* 202, 1207-1222.
- Tarling D.H. y Hrouda, F. (1993). *The magnetic anisotropy of rocks*. Chapman and Hall, 212p.
- Wing-Fatt L. y Stacey, F.D. (1966). *Pure and Applied Geophysics* 64, 78-80.