

# ¿Qué nos dicen los marcadores magnéticos sobre la deformación dúctil en el Ordovícico de la Cordillera Ibérica?

*What magnetic markers tell us about ductile deformation in the Ordovician of the Iberian Chain?*

Belén Oliva-Urcia\*, Carlos L. Liesa y estudiantes del Grado en Geología UNIZAR (2º curso)

Grupo GEOTRANSFER, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Instituto de Investigación en Ciencias Ambientales (IUCA), Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain,  
 boliva@unizar.es, carluis@unizar.es

\*Corresponding author

## ABSTRACT

A magnetic fabric and paleomagnetic study together with a rock magnetic study have been carried out in two sites of Ordovician rocks affected by the Variscan Orogeny in the surroundings of Cerveruela village, in the Aragonese Branch of the Iberian Chain. The results of the magnetic fabric indicate different behavior according to sampled lithology and/or structural position within the fold. However, the paleomagnetic information is not well registered or it has been modified by later tectonic events. The remanence carriers are of low coercivity (magnetite) in the shaly rocks and of high coercivity (hematite) in the silty rocks. In both sites there are ferromagnetic iron sulphides with medium coercivity.

**Key-words:** magnetic fabric, paleomagnetism, rock magnetism, Ordovician, Aragonese Branch.

## RESUMEN

Se ha realizado un estudio de las fábricas magnéticas y paleomagnetismo junto con magnetismo de rocas en dos estaciones afectadas por la deformación varisca, en rocas del Ordovícico en los alrededores de Cerveruela, Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. Los resultados de la fábrica magnética indican un comportamiento diferente en función de la litología muestreada y/o posición estructural dentro del pliegue. Sin embargo, la información paleomagnética no ha quedado bien registrada o se ha modificado a posteriori durante eventos tectónicos posteriores. Los portadores de la remanencia son de baja coercitividad (magnetita) en los materiales lutíticos, y de alta coercitividad (hematites) en los más gruesos. En todos parece haber sulfuros de hierro, de coercitividad intermedia.

**Palabras clave:** fábrica magnética, paleomagnetismo, magnetismo de rocas, Ordovícico, Rama Aragonesa.

Geogaceta, 77 (2025), 7-10

<https://doi.org/10.55407/geogaceta108641>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 14/07/2024

Fecha de revisión: 30/10/2024

Fecha de aceptación: 29/11/2024

## Introducción

La Cordillera Ibérica es una cadena montañosa de orientación NW-SE que separa la cuenca sedimentaria cenozoica del Ebro de las cuencas sedimentarias cenozoicas del Tajo y Duero. Los afloramientos del Precámbrico y Paleozoico se distribuyen en dos bandas paralelas, la Rama Castellana al oeste y la Rama Aragonesa al este (Fig. 1A-B). Tradicionalmente, parte de la Rama Aragonesa se ha relacionado con la Zona Cantábrica del Macizo Ibérico, mientras que la Rama Castellana se ha incluido en la Zona Asturoccidental Leonesa (Gozalo y Liñán, 1988). Otros autores sitúan ambas ramas de la Cordillera Ibérica en el dominio de la Zona Asturoccidental Leonesa (García-Sansegundo et al., 2011), una zona más interna del orógeno varisco (Fig. 1A).

En la Rama Aragonesa el Ordovícico puede alcanzar casi 4 km de potencia con rocas de tipo siliciclástico en su mayoría (Fig. 1D). Estas rocas se interpretan como depositadas en plataformas continentales

de margen pasivo en los alrededores de Gondwana (Gutiérrez-Marco et al., 2019). El Ordovícico inferior y medio de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica se divide en cinco formaciones, tres limolíticas, pizarrosas o arenosas (las formaciones Borrachón, Santed y Castillejo) y dos cuarcíticas (las formaciones Dere y la Cuarcita Armicana). Estas formaciones contienen el registro volcánico más antiguo en la Cordillera Ibérica (Villas et al., 2011).

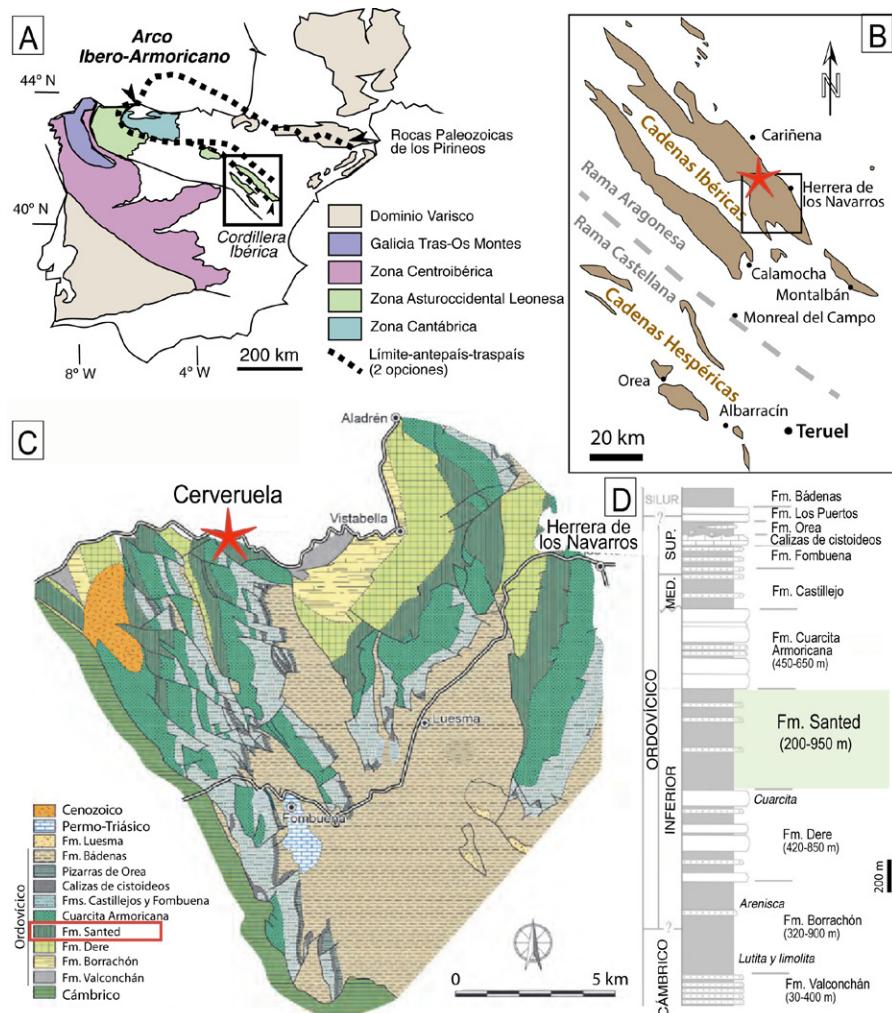
La susceptibilidad magnética es la capacidad que tiene un material de ser magnetizado bajo la influencia de un campo magnético débil. El estudio de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) como indicador de la orientación preferente de minerales comenzó con Graham (1954) (en Tarling y Hrouda, 1993). La anisotropía de la susceptibilidad magnética se representa como un tensor de segundo orden y se analiza, por un lado, a partir de la orientación de los tres ejes del elipsoide ( $k_{\max}$ ,  $k_{\int}$  y  $k_{\min}$ ) y, por otro, a partir de parámetros escalares como el valor total de la susceptibilidad magnética (Km), la forma

del elipsoide (parámetro T, que puede ser oblato cuando T está entre 0 y 1; y prolato cuando T está entre 0 y -1) y la propia anisotropía del elipsoide (parámetro P =  $k_{\max}/k_{\min}$ ) (Jelinek, 1977).

En este trabajo se hace un estudio magnético de estos parámetros y los resultados se comparan con un análisis estructural de la deformación varisca en un afloramiento de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica, con el objetivo de analizar qué aportan los parámetros magnéticos en la caracterización de dicha deformación.

## Metodología

La zona de estudio se encuentra al norte de la localidad de Cerveruela, en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (Fig. 1C). En ella se han tomado datos de orientación de la estratificación, foliación tectónica y lineación de intersección. Las medidas fueron tomadas durante la realización de una práctica de campo de la asignatura Geología estructural (2º



**Fig. 1.- A)** Mapa geológico simplificado con las zonas del Macizo Ibérico y su continuidad en la Cordillera Ibérica según Gozalo y Liñán (1988) o García-Sansegundo et al. (2011). **B)** Afloramientos paleozoicos en la Cordillera Ibérica. La estrella marca la localidad de Cerveruela. **C)** Mapa geológico de detalle del sector SE de Cerveruela (estrella), en la Rama Aragonesa (ver situación en B). **D)** Columna estratigráfica simplificada del Ordovícico en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. La Fm. Santed se ha señalado en verde. **B), C) y D)** modificadas de Villas et al. (2011). Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- A) Simplified geological map of the Iberian Massif zones and their continuity within the Iberian Chain according to Gozalo and Liñán (1998) or García-Sansegundo et al. (2011). B) Paleozoic outcrops of the Iberian Chain. The star marks Cerveruela locality. C) Detailed geological map of the SE sector of Cerveruela, in the Aragones Branch of the Iberian Range (see location in B). D) Stratigraphic column of the Ordovician rocks in the Aragones Branch. Santed Fm in green. B), C), and D) modified from Villas et al. (2011). See coloured figure on the web.

curso) del grado en Geología de la Universidad de Zaragoza en varios cursos académicos. Las medidas han sido representadas y analizadas en proyección estereográfica usando el software Stereonet (Almendinger et al., 2011).

En la zona de muestreo se han tomado dos bloques orientados en el flanco largo (CE-1, pizarra) y en la charnela (CE-2) de un pliegue decimétrico en la Formación Santed (Fig. 2A-B). En CE-2 la parte interna de la charnela es pizarra y la parte externa de la charnela es arenisca de grano grueso. Posteriormente los bloques se han cortado en muestras cúbicas de unos 8 cm<sup>3</sup> y se ha medido la anisotropía de la susceptibilidad magnética

nética en el susceptómetro Kappabridge KLY5 (AGICO Inc.) de la Universidad de Zaragoza. La desmagnetización térmica por pasos y la IRM de tres componentes (test de Lowrie, 1998) se han realizado en la Universidad de Burgos con un magnetómetro criogénico 2G y con un horno TD48EU (ASC Scientific).

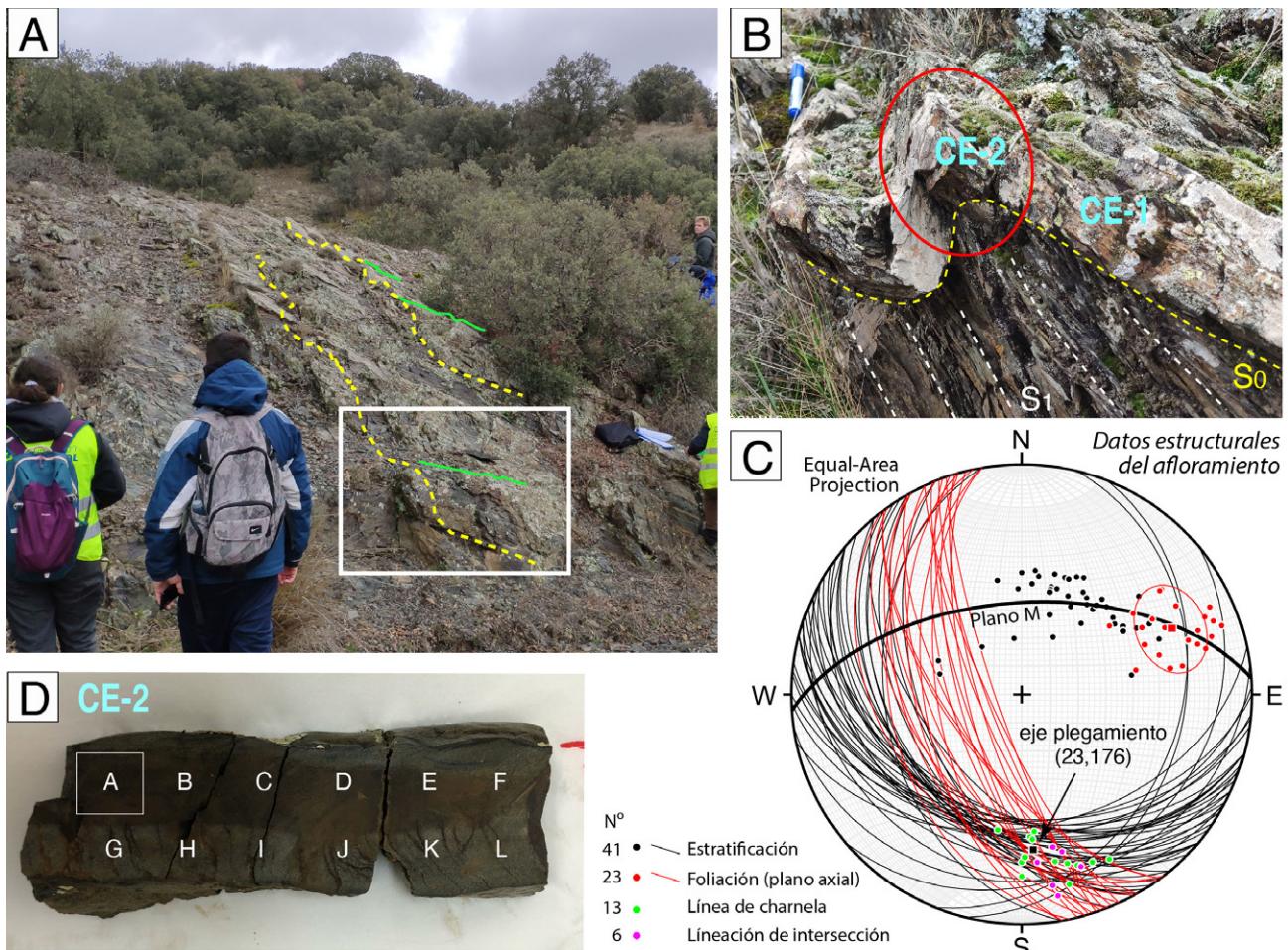
Se ha usado Anisoft para el cálculo de los parámetros y orientación de la ASM en 8 especímenes (A-H) para CE-1 (flanco largo) y 12 (A-L) para CE-2 (charnela) (Fig. 2D). La componente paleomagnética más estable se ha intentado calcular con el programa Remasoft a partir de la desmagnetización de 6 a 8 especímenes por estación.

Para realizar el test de Lowrie la muestra se ha saturado en tres ejes mutuamente perpendiculares con un "pulse magnetizer" con tres campos decrecientes y posteriormente se ha sometido a una desmagnetización térmica por pasos. No se ha podido calcular una componente paleomagnética estable en las 14 muestras analizadas.

## Resultados

Las pizarras, limolitas y cuarcitas de la Formación Santed en el afloramiento estudiado muestran una serie de pliegues de escala decimétrica a métrica (Fig. 2A-B). Los pliegues tienen en las capas competentes (areniscas) una geometría normalmente circular y son relativamente isópacos. En las capas incompetentes (pizarras), en cambio, los pliegues tienen una charnela claramente engrosada (pliegues de clase 3; Ramsay, 1967) y muestran una foliación de plano axial bien desarrollada (Fig. 2B). Se trata de pliegues asimétricos, vergentes al este, con una foliación de plano axial de orientación NNW-SSE y un buzamiento medio-alto (40-70° hacia el oeste) (Fig. 2C). El flanco largo de los pliegues tiene una dirección NW-SE a WNW-ESE y suave buzamiento (30-40°) al suroeste, y el flanco corto una dirección NNE-SSW a E-W y un buzamiento similar, en ocasiones más elevados, al sureste. El análisis de la orientación de los planos de estratificación ( $S_0$ ) y de foliación de plano axial ( $S_1$ ) sugiere un eje de plegamiento prácticamente norte-sur (N176°E) y con suave inmersión (23°) hacia el sur. Esta orientación es compatible con la orientación de las líneas de charnela y las lineaciones de intersección entre planos de foliación y estratificación observadas y medidas en el campo, aunque estas muestran una mayor dispersión, con orientaciones entre NNW-SSE y N-S (Fig. 2C).

La fábrica magnética del material lítico en CE-1 sigue el comportamiento esperado para fábricas donde hay un desarrollo de foliación tectónica ( $S_1$ ), esto es: el eje máximo (la lineación magnética) se agrupa en la lineación de intersección (entre  $S_0$  y  $S_1$ ) y el eje mínimo se agrupa en el polo de la foliación tectónica (Fig. 3A). En el bloque tomado siguiendo la línea de charnela (CE-2), los materiales de tamaño de grano menor situados en la parte interna de la charnela presentan una orientación similar, pero es el eje  $k_{int}$  el que aparece en la lineación de intersección. El eje  $k_{min}$  es prácticamente perpendicular a la foliación tectónica (Fig. 3B). En la parte externa de la



**Fig. 2.- A)** Imagen del afloramiento estudiado de la Formación Santed donde se ha muestreado CE-1 y CE-2 (línea amarilla discontinua: capas plegadas, línea verde: línea de charnela, inclinada hacia el sur). **B)** Detalle de uno de los pliegues con foliación de plano axial. Se muestra la localización en el flanco o charnela de las muestras. **C)** Estereograma (falsilla de Schmidt, hemisferio inferior) de los datos estructurales medidos en el afloramiento y su interpretación. **D)** Submuestras (A-L) estudiadas en el bloque CE-2 con la diferente litología que corresponde con diferente fábrica magnética (A-F: arenisca; G-L: pizarra). Nótese el mayor desarrollo de la foliación en la pizarra. Ver figura en color en la web.

*Fig. 2.- A) Image of the studied outcrop of the Santed Formation where CE-1 and CE-2 have been sampled (dashed yellow line: folded layers, green line: hinge line, inclined towards the south). B) Detail of one of the folds with axial plane foliation. The location on the flank or hinge of the samples is shown. C) Stereogram (Schmidt net, lower hemisphere) of the structural data measured in the outcrop and its interpretation. D) Subsamples (A-L) studied in block CE-2 with the different lithology that corresponds to different magnetic fabric (A-F: sandstone; G-L: slate). Note the greater development of foliation in the slate. See coloured figure on the web.*

charnela los ejes presentan mayor dispersión,  $k_{\max}$  y  $k_{\text{int}}$  entre  $S_0$  y  $S_r$ , con  $k_{\max}$  próximo a la lineación de intersección.

El test de Lowrie, que combina coercitividad y temperatura de desbloqueo en una muestra estándar por estación, ha permitido deducir la presencia de sulfuros ferromagnéticos s.l. en ambas muestras (caída de la remanencia en el eje intermedio en verde a 300 °C, Fig. 4). En CE-1 se constata la presencia de magnetita (caída de la remanencia a 500 °C en el "eje blando" en azul) y en CE-2 de hematites (caída de la remanencia a 680 °C en el "eje duro", en naranja en la Fig. 4).

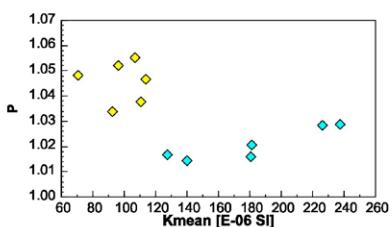
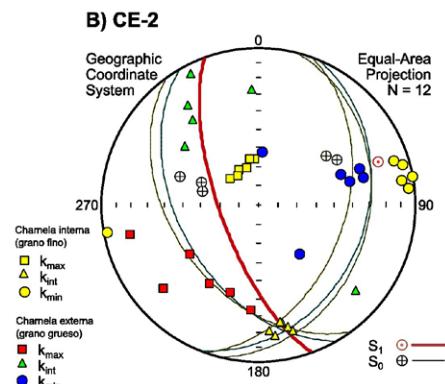
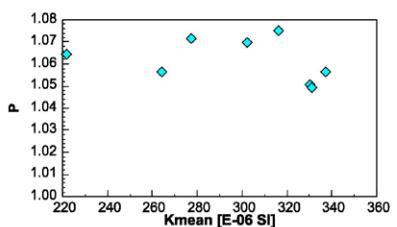
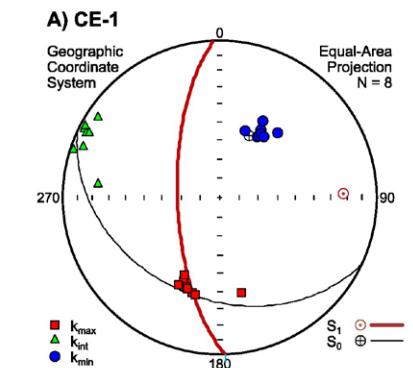
## Discusión y conclusiones

En las rocas del Ordovícico analizadas se infiere que la fábrica magnética

es un buen indicador de la orientación preferente de minerales afectados por deformación, en especial con el desarrollo de la foliación tectónica. Esta correspondencia es buena en rocas siliciclasticas de tamaño de grano fino, como en CE-1, donde la lineación magnética (ejes  $k_{\max}$ ) se localiza en la lineación de intersección. Sin embargo, en las muestras de la charnela del pliegue, la relación con la deformación es algo distinta y varía entre litologías/posición. Así, las muestras de tamaño de grano más fino situadas en la parte interna de la charnela presentan los ejes  $k_{\text{int}}$  en la lineación de intersección y los ejes  $k_{\min}$  próximos al polo de la foliación tectónica, mientras que las muestras de grano más grueso presentan los ejes  $k_{\max}$  y  $k_{\text{int}}$  sobre el plano de estratificación y los ejes  $k_{\min}$  próximos

al polo de ese plano de estratificación, algo similar a lo que ocurre en la muestra de flanco CE-1, donde los ejes están más agrupados (Figs. 2D y 3). Esto puede ser debido a un diferente desarrollo de la foliación, mucho más penetrativa en las rocas de grano fino. La diferente posición de los ejes de la fábrica magnética en uno y otro tipo de rocas podría estar reflejando procesos de refracción de la foliación que han quedado registrados también en la fábrica magnética de las rocas deformadas (Fig. 3B).

Los resultados del magnetismo de rocas indican que los minerales portadores de la remanencia son principalmente sulfuros de hierro, con predominio de magnetita en los materiales de grano fino y de hematites en los materiales de grano más grueso.



**Fig. 3.- Los datos de la fábrica magnética y de los planos de estratificación (en negro) y foliación (en rojo) en proyección estereográfica, así como representación de los datos escalares Km, P y T. A) Muestra CE-1 (flanco largo). B) Muestra CE-2 (charnela); en amarillo, los especímenes de la parte más interna de la charnela de litología pizarrosa. Ver figura en color en la web.**

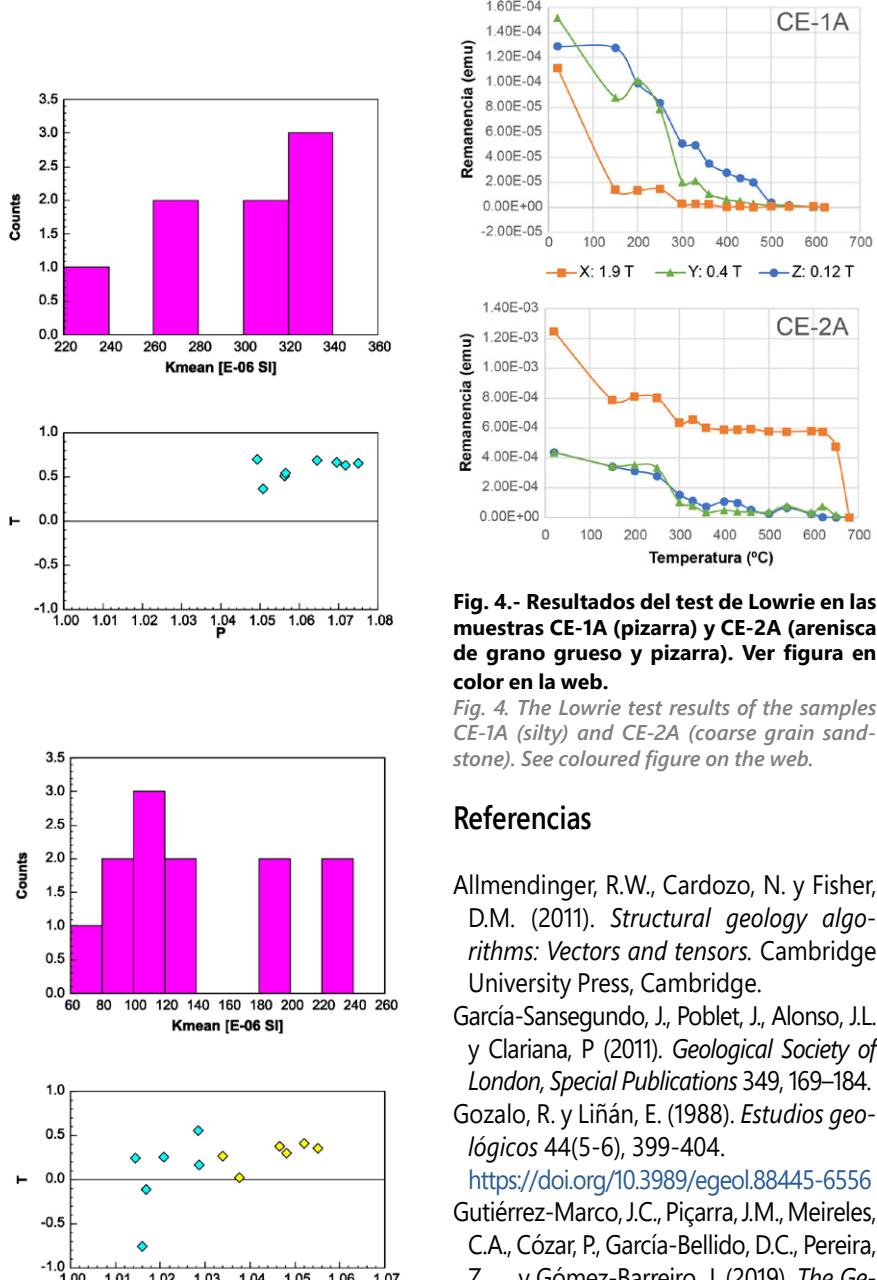
Fig. 3.- Magnetic fabric data and the stratification (in black) and foliation (in red) planes in stereographic projection, as well as representation of the scalars Km, P and T. A) Sample CE-1 (long limb). B) Sample CE-2 (hinge zone); in yellow, the specimens from the innermost part of the hinge of shaly lithology. See coloured figure on the web.

## Contribución de los autores

B. Oliva. Adquisición y análisis de datos magnéticos. C. Liesa. Adquisición de datos estructurales, en colaboración con estudiantes del grado en Geología, y su análisis e interpretación. La redacción y realización de las figuras ha sido desarrollada de manera conjunta entre los dos primeros coautores.

## Agradecimientos y financiación

Agradecemos al personal investigador del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos por facilitar el uso del laboratorio. Esta investigación ha sido financiada por el Gobierno de Aragón (E32\_23R: Grupo GEOtransfer. Investigación para la Ciencia y la Sociedad).



**Fig. 4.- Resultados del test de Lowrie en las muestras CE-1A (pizarra) y CE-2A (arenisca de grano grueso y pizarra). Ver figura en color en la web.**

Fig. 4. The Lowrie test results of the samples CE-1A (silty) and CE-2A (coarse grain sandstone). See coloured figure on the web.

## Referencias

- Allmendinger, R.W., Cardozo, N. y Fisher, D.M. (2011). *Structural geology algorithms: Vectors and tensors*. Cambridge University Press, Cambridge.
- García-Sansegundo, J., Poblet, J., Alonso, J.L. y Clariana, P. (2011). *Geological Society of London, Special Publications* 349, 169–184.
- Gozalo, R. y Liñán, E. (1988). *Estudios geológicos* 44(5-6), 399–404.  
<https://doi.org/10.3989/eged.88445-6556>
- Gutiérrez-Marco, J.C., Piçarra, J.M., Meireles, C.A., Cázaro, P., García-Bellido, D.C., Pereira, Z., ... y Gómez-Barreiro, J. (2019). *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach: Volume 2: The Variscan Cycle*, 75–98.
- Jelinek, V. (1977). *The statistical theory of measuring anisotropy of magnetic susceptibility of rocks and its application*. Geofyzika, Brno, 88 p.
- Lowrie, W. (1990). *Geophysical Research Letters* 17(2), 159–162.  
<https://doi.org/10.1029/GL017i002p00159>
- Ramsay, J.G. (1967). *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill, New York, 568 p.
- Tarling, D.H. y Rouda, F. (1993). *The magnetic anisotropy of rocks*. Chapman & Hall, London, 217 p.
- Villas, E., Vennin, E., Jiménez-Sánchez, A., Álvaro, S., Zamora J.J. y Gutiérrez-Marco, J.C. (2011). *Post-Symposium fieldtrip. 11th ISOS*.