



APORTACIÓN DE LA FÁBRICA MAGNÉTICA A LA CARACTERIZACIÓN CINEMÁTICA DE LA FALLA DE JARQUE (CORDILLERA IBÉRICA)

Contribution of the magnetic fabric to the kinematics of the Jarque Fault (Iberian Range)

Pablo Sierra Campos, Teresa Román Berdiel, Antonio M. Casas Sainz y Marcos Marcén

Departamento de Ciencias de la Tierra, Grupo de Investigación Geotransfer, Instituto de Investigación en Ciencias Ambientales (IUCA), Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza
 pablo.sierra4@gmail.com, mtjrb@unizar.es, acasas@unizar.es, mma@unizar.es

Abstract: In this paper the Anisotropy of the Magnetic Susceptibility (AMS) is applied together with the structural analysis along the Jarque Fault (Iberian Range) in its north-western sector. The Jarque Fault has a NW-SE direction, and extends longitudinally along at least 50 km, being one of the main structures that compartmentalize the Aragonese Branch of the Iberian Range. The S-C structures observed in the Jarque outcrop show a dextral-reverse component on planes with NW-SE trend and strong dip to W, consistent with the subhorizontal striae measured in fault planes of the Oseja outcrop. The dominant magnetic foliation coincides with the intermediate orientation between the S and C planes, and the magnetic lineation shows two maxima. The main maximum has a subvertical plunge being parallel to the direction of maximum slope of the planes of foliation and faults and also approximates the intersection lineation between S and C planes. The second maximum has a subhorizontal plunge that approximates the transport direction inferred from striae and S-C structures. The geological map shows structures oblique to the trace of the main fault, such as minor faults with WNW-SES trend and folds with E-W direction compatible with the dextral movement of the Jarque Fault. The results obtained indicate a structure resulting from the reactivation of an ancient (late-Variscan to Triassic) fault during the Alpine Orogeny associated with the NNE-SSW compression.

Keywords: magnetic fabric, AMS, fault rocks, Jarque Fault, Iberian Range.

Resumen: En este trabajo se aplica la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) junto con el análisis estructural a la Falla de Jarque (Cordillera Ibérica) en su tramo noroccidental. La Falla de Jarque, de dirección NW-SE, se extiende longitudinalmente a lo largo de al menos 50 km, siendo una de las principales estructuras que compartimentan la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. Las estructuras S-C observadas en el afloramiento de Jarque muestran una componente dextral-inversa sobre planos de orientación NW-SE y fuerte buzamiento al W, consistente con las estrias subhorizontales medidas en planos de falla del afloramiento de Oseja. La foliación magnética dominante coincide con la orientación intermedia entre los planos S y C, y la lineación magnética muestra dos máximos. El máximo principal es subvertical, paralelo a la dirección de máxima pendiente de los planos de foliación y fallas y próximo a la lineación de intersección entre planos S y C. El segundo máximo es subhorizontal y próximo a la dirección de transporte deducida a partir de las estrias y las estructuras S-C. Los resultados obtenidos indican una estructura resultante de la reactivación de una antigua falla (tardivarisca a triásica) durante la Orogenia Alpina asociada a la compresión NNE-SSW.

Palabras clave: fábrica magnética, ASM, rocas de falla, Falla de Jarque, Cordillera Ibérica.

Sierra Campos, P., Román Berdiel, T., Casas Sainz, A.M., Marcén, M., 2019. Aportación de la fábrica magnética a la caracterización cinemática de la Falla de Jarque (Cordillera Ibérica). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (1): 77-96

Introducción

La Falla de Jarque es una de las estructuras más importantes en la evolución tectónica del sector norte de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (Fig. 1). La Falla de Jarque, también llamada por algunos autores Falla de Tablado-Jarque (Sanz *et al.*, 2012, 2013), tiene una dirección subparalela a la dirección NW-SE de la Cordillera Ibérica. Se dispone ligeramente oblicua a la Falla de Río Grio, estudiada en detalle por Marcén Albero y Román Berdiel (2015), y corta a la Falla de Datos (renombrada como Cabalgamiento de Nigüella-Monforte por Casas *et al.*, 2016), una de las estructuras más importantes durante la Orogenia Varisca de la Cordillera Ibérica. Además, la Falla de Jarque está cortada por estructuras más recientes y se caracteriza por la presencia de escalones (*jogs*) compresivos (Casas *et al.*, 2016). A pesar de su importancia estructural, la Falla de Jarque solamente se nombra en trabajos centrados en el estudio de la esquistosidad alpina en zonas adyacentes (Gil Imaz, 1995; Gil Imaz y Pocoví Juan, 1994) y del magmatismo alcalino del Triásico superior (Sanz *et al.*, 2012). Si bien se atribuye un origen tardivarisco a esta falla y una actividad posterior tanto de tipo compresivo

durante el ciclo Alpino como de tipo extensional en etapas más recientes, hasta la fecha no se han realizado estudios de detalle sobre la misma que permitan establecer con precisión sus características estructurales y cinemáticas. La caracterización de las zonas de fallas asociadas a este tipo de estructuras no es tarea fácil debido a su complejidad estructural relacionada con posibles reactivaciones en diferentes regímenes tectónicos y a la frecuente escasez de marcadores cinemáticos en rocas de falla brechificadas. En estos contextos es muy útil aplicar técnicas indirectas como el análisis de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM), que en los últimos años ha demostrado aportar información para caracterizar rocas y zonas de falla (Hirono *et al.*, 2006; Solum y Van der Pluijm, 2009; Mertainen y Karell, 2012; Levi *et al.*, 2014; Pomella, 2014; Moreno *et al.*, 2014; Braun *et al.*, 2015; Keskinen *et al.*, 2016).

Debido a la dificultad de observar estructuras en rocas de falla formadas en el nivel estructural superior (microbrechas y harinas de falla), recientemente se ha utilizado esta técnica en varias fallas de la Península Ibérica. Así, se ha aplicado la ASM al estudio de la cinemática de cabalgamientos (Casas-Sainz *et al.*, 2017, 2018; Román-Berdiel *et al.*, 2018; Vernet *et al.*, 2018) y de fallas de

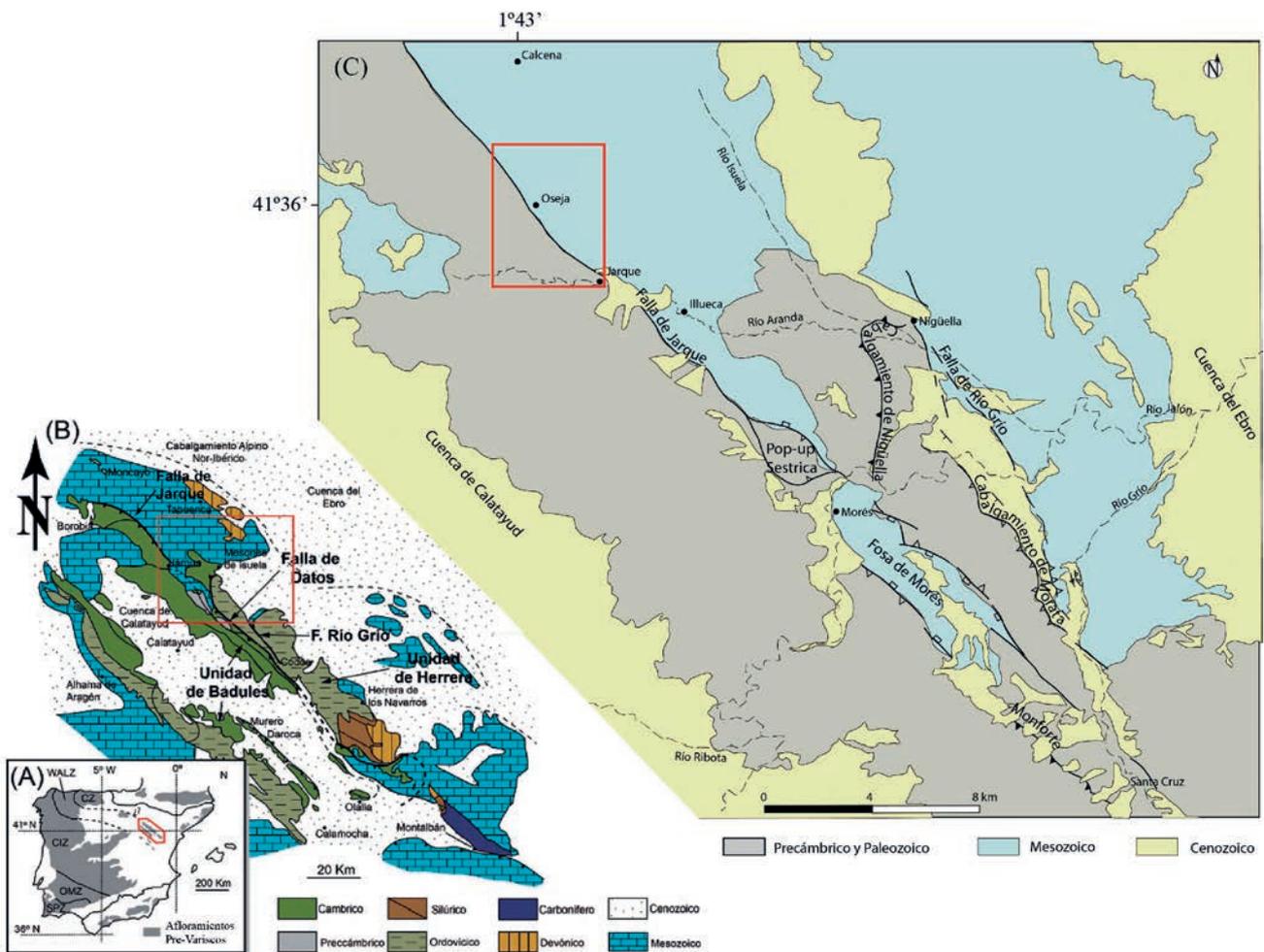


Fig. 1.- A y B. Mapa geológico simplificado de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica y su localización en la Península Ibérica (modificado de Calvin-Ballester y Casas, 2014); CZ, Zona Cantábrica; WALZ, Zona Asturooccidental-Leonesa; CIZ, Zona Centroibérica; OMZ, Zona de Ossa-Morena; SPZ, Zona Sudportuguesa. C. Mapa geológico simplificado que muestra las principales estructuras del sector norte de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (modificado de Casas *et al.*, 2016) con la localización del área estudiada.

desgarre (Marcén *et al.*, 2015, 2016, 2018). En todos ellos, la lineación magnética puede relacionarse con la dirección de transporte tectónico de la falla o con su perpendicular (*i.e.*, la lineación de intersección entre planos S y C). Esto aporta un mayor número de datos distribuidos a lo largo de la zona de falla para tener una mejor caracterización cinemática de las estructuras.

En este trabajo se caracteriza desde el punto de vista estructural la geometría y cinemática de la Falla de Jarque en su sector centro-occidental (Fig. 1C). Para ello se han realizado análisis de ASM y estructurales (*i.e.*, medida de orientación de planos de falla y de foliaciones, así como observaciones de láminas delgadas) de las rocas de falla asociadas. Además, se han llevado a cabo experimentos de magnetismo de rocas (*i.e.*, curvas termomagnéticas k/T) para corroborar los resultados obtenidos de la ASM.

Situación geológica

La Cordillera Ibérica es una cadena intraplaca formada durante el Cenozoico debido a la convergencia entre Europa, África e Iberia (Alvaro *et al.*, 1979; Casas Sainz y Faccenna, 2001; Capote *et al.*, 2002; De Vicente, 2004; De Vicente *et al.*, 2009). Esta cadena es el resultado de la inversión tectónica de cuencas sedimentarias mesozoicas (De Vicente, 2004), excepto en su parte central, donde una potente serie paleozoica de hasta 11 km de espesor fue replegada durante la compresión cenozoica (Cortés Gracia y Casas Sainz, 1996; Calvín-Ballester y Casas, 2014). Este sector central de la Cordillera Ibérica se denomina Rama Aragonesa (Fig. 1A, B) y su estructura está definida por dos altos estructurales de dirección NW-SE constituidos por rocas paleozoicas separados por la cuenca cenozoica de Calatayud (Fig. 1B). En la Rama Aragonesa se reconocen varias fallas de desgarre de escala cortical (De Vicente *et al.*, 2011; Casas-Sainz *et al.*, 2017) probablemente heredadas de la

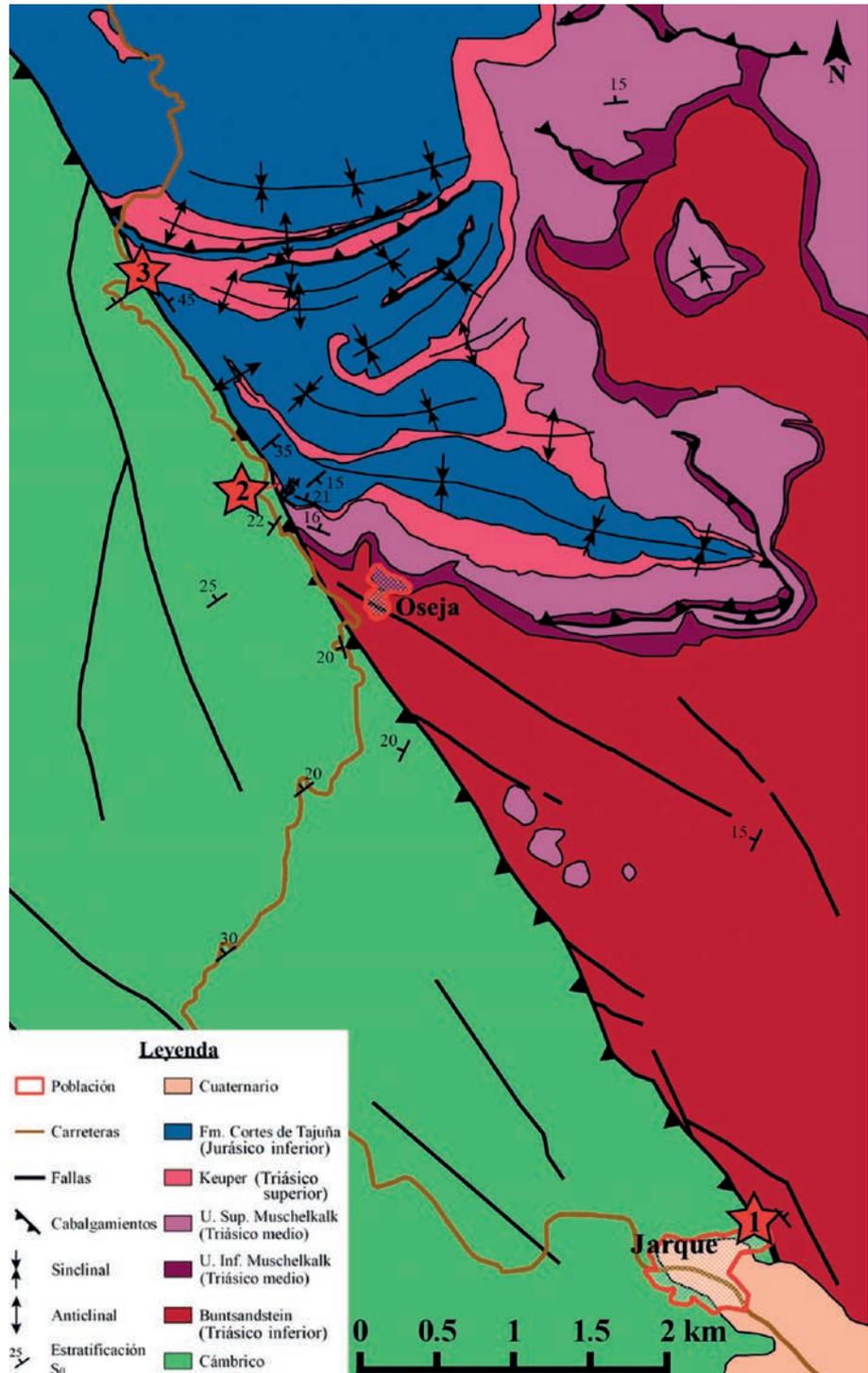


Fig. 2.- Cartografía detallada de la zona de estudio con la situación de los afloramientos estudiados (estrellas rojas): 1) Jarque; 2) Oseja; 3) Collado. Modificado de Ramírez del Pozo (1981).

fracturación tardihercínica (Arthaud y Matte, 1975, 1977) (Fig. 1B, C). Estas fallas son subparalelas a la dirección estructural cenozoica de la cadena (NW-SE) y cortan los materiales del Paleógeno y Neógeno de las cuencas sedimentarias intramontañosas. Una de estas fallas mayores es la Falla de Jarque, objeto de estudio de este trabajo (Fig. 1C).

El trazado de la Falla de Jarque es fácil de identificar en su sector centro-occidental, entre las localidades de Jarque y Calcena (Fig. 1C) donde afloran materiales pa-

leozoicos y mesozoicos. Los materiales paleozoicos se asocian al Cámbrico de la Unidad de Badules (Lotze, 1929) y los materiales mesozoicos aflorantes pertenecen a la serie triásica y base del Jurásico (facies Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper y Fms. Imón y Cortes de Tajuña; Ramírez del Pozo, 1981). La Falla de Jarque pone en contacto los materiales cámbricos de la Unidad de Badules con materiales mesozoicos (Fig. 1).

La Falla de Jarque tiene una dirección subparalela a la dirección NW-SE de la Cordillera Ibérica, y es ligeramente oblicua a la Falla de Río Grío, que aflora al este (Fig. 1). Ambas fallas cortan al cabalgamiento de Nigüella-Monforte, la estructura varisca más importante de este sector de la Cordillera Ibérica y que pone en contacto la Unidad de Badules con la Unidad de Herrera (Fig. 1) (Carls, 1983; Gozalo y Liñán, 1988). Este contacto se ha interpretado como el límite entre la zona Asturoccidental-Leonesa y la zona Cantábrica en este sector (Gozalo y Liñán, 1988; Calvín y Casas, 2014).

Metodología

Se han estudiado tres afloramientos de rocas de falla situados a lo largo de la traza de la Falla de Jarque en su sector noroccidental (Fig. 2). Estos tres afloramientos se seleccionaron fundamentalmente por su buena calidad. El primer afloramiento (Jarque) se sitúa junto al cementerio de la localidad de Jarque. El segundo afloramiento (Oseja) se encuentra a las afueras de Oseja y el tercero (Collado) en un collado a 1,5 km hacia el NW desde Oseja, ambos en la carretera entre Oseja y Calcena (Fig. 2).

Se han realizado observaciones a escala cartográfica (macroestructura), y análisis estructural a partir de datos de planos de estratificación, planos de fallas, estrías, estrilolitos, foliaciones y estructuras S-C medidos en los afloramientos (mesoestructura). Estos datos han sido representados en proyección estereográfica y tratados con el programa Stereonet (versión 9.3.2; Allmendinger *et al.*, 2013; Cardozo y Allmendinger, 2013). También se han realizado observaciones microestructurales en cuatro láminas delgadas provenientes de tres muestras orientadas, una muestra de cada afloramiento; la muestra J12 corresponde a materiales del Triásico inferior del afloramiento de Jarque; la muestra J5 corresponde a materiales del Triásico medio del afloramiento de Oseja, de la que se realizaron dos láminas delgadas perpendiculares entre sí; y la muestra J8 a materiales del Jurásico inferior del afloramiento del Collado. Las observaciones se han realizado con un microscopio óptico de luz transmitida, para determinar microestructuras y sentidos de desplazamiento. La orientación de las láminas delgadas corresponde aproximadamente con los planos XZ (láminas J12 y J5-oblicua) y YZ (láminas J5-vertical y J8) del elipsoide de deformación finito deducido a partir de las observaciones realizadas en el afloramiento (foliaciones y estructuras S-C) y de los resultados del análisis de la ASM (foliaciones y lineaciones magnéticas).

Se extrajeron un total de 14 muestras de mano orientadas, 6 en el afloramiento de Jarque (J10 a J15), 5 en el afloramiento de Oseja (J1 a J5) y 3 en el afloramiento del Collado (J6, J7 y J8). Para el análisis de la ASM, las muestras de mano se cortaron en el laboratorio para obtener especímenes estándar de forma cúbica de 2,1 cm de lado convenientemente orientados. Se ha medido la ASM en un total de 238 especímenes cúbicos (entre 8 y 38 por muestra de mano, una media de 17 por muestra; Tabla 1) con un susceptómetro KLY-3S Kappabridge (AGICO, República Checa), disponible en el laboratorio de fábricas magnéticas del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza. Este aparato es un puente de bajo campo magnético que trabaja a 300 A/m y 875 Hz. Los valores medios de ASM han sido calculados utilizando la estadística de Jelinek (Jelinek, 1978) mediante el programa Anisoft 4.2. (Chadima y Jelinek, 2009). El programa representa las orientaciones y magnitudes de los ejes k_{\max} , k_{int} y k_{\min} del elipsoide magnético, a partir de los cuales se define la fábrica magnética caracterizada por la lineación magnética (k_{\max}) y la foliación magnética (plano perpendicular a k_{\min}). Con la relación de las magnitudes de los ejes resultantes el programa calcula la susceptibilidad total (K_m), el grado de anisotropía corregido (P'), que indica la intensidad de la orientación preferente de los minerales, y el parámetro de forma (T), que indica la forma del elipsoide, $-1 < T < 0$ prolato; $0 < T < +1$ oblató (Jelinek, 1981), siguiendo las siguientes fórmulas:

$$P' = \exp \sqrt{2[(\mu_1 - \mu_m)^2 + (\mu_2 - \mu_m)^2 + [(\mu_3 - \mu_m)^2]}$$

Siendo $\mu_1 = \ln k_{\max}$ $\mu_2 = \ln k_{\text{int}}$ $\mu_3 = \ln k_{\min}$ $\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}{3}$

$$T = \frac{2\mu_2 - \mu_1 - \mu_3}{\mu_1 - \mu_3}$$

$$K_m = \frac{K_{\max} + K_{\text{int}} + K_{\min}}{3}$$

Una selección de 5 especímenes de 3 muestras representativas de cada uno de los afloramientos (15 especímenes en total) se han medido a baja temperatura (nitrógeno líquido, 70K) con la finalidad de realzar la contribución de la fábrica paramagnética y diferenciarla de la fábrica magnética total (separación de subfábricas). La susceptibilidad de los minerales paramagnéticos se realiza exponencialmente a bajas temperaturas, tal como indica la ley de Curie-Weiss para el comportamiento paramagnético (Ritcher y Van der Pluijm 1994; Biedermann *et al.*, 2014; Ihmlé *et al.*, 1989). Las medidas de ASM a baja temperatura se han realizado en el mismo susceptómetro KLY-3S. La cuba del aparato se protege térmicamente colocando una lámina de silicona en su interior para evitar la deriva del aparato debido a la muestra fría (Issachar *et al.*, 2016). Una muestra paramagnética pura medida a baja temperatura (77K) debe mostrar un incremento de la susceptibilidad de aproximadamente 3,8 veces la susceptibilidad a temperatura ambiente (Lüneburg *et al.*, 1999).

Para identificar la mineralogía portadora de la susceptibilidad magnética se han realizado 12 curvas termomagnéticas ($k-T$) en especímenes cúbicos seleccionados de los

tres afloramientos. Estas curvas miden la variación de la susceptibilidad magnética con la temperatura. Las curvas se han realizado con un horno CS-3 que trabaja acoplado al KLY-3S. Las curvas se han hecho para un rango de temperatura entre 40 y 700°C, con una velocidad de calentamiento de 13°C/min, y en atmósfera de argón para evitar que se oxiden los minerales. Los datos de las curvas termomagnéticas de variación de la susceptibilidad con la temperatura han sido corregidos para el horno vacío y procesados utilizando el programa Cureval 8.0 (Chadima y Hrouda, 2009).

Macroestructura

La Falla de Jarque tiene una dirección NW-SE, aproximadamente dirección Ibérica, y se extiende longitudinalmente unos 50 km. Afecta a materiales del Cámbrico correspondientes a la Unidad de Badules en el bloque occidental de la falla, y materiales de la serie Mesozoica comenzando por las facies Buntsandstein hasta la Fm. Cortes de Tajuña en el bloque oriental. Asociadas a la Falla de Jarque aparecen fallas oblicuas de mucha menor entidad orientadas WNW-ESE, formando un ángulo de entre 30° y 45° con respecto a la traza de la Falla de Jarque y terminando algunas contra ella (Fig. 2). Los materiales mesozoicos del bloque oriental de la Falla de Jarque están afectados por un conjunto de pliegues de escala cartográfica en el sector norte de la zona estudiada, al norte de la localidad de Oseja, con una continuidad lateral entre 1 y 3 km y una longitud de onda de unos 300 m (Fig. 3A). Estos pliegues, cuya traza axial aparece curvada, presentan una dirección que varía desde ESE-WNW a ENE-SWS y también se disponen de manera oblicua a la Falla de Jarque formando ángulos en torno a 40°-45°. La curvatura en planta que presentan sus trazas axiales va disminuyendo de N a S, de manera que el anticlinal más meridional ya no presenta curvatura. Asociados a los anticlinales de la zona más septentrional de dicho tren de pliegues se pueden apreciar varios cabalgamientos, paralelos a sus trazas axiales de vergencia S (Fig. 2).

En el afloramiento de Jarque los materiales están muy brechificados (Fig. 3B). En esta zona, la Falla de Jarque pone en contacto materiales del Cámbrico con areniscas y lutitas de las facies Buntsandstein (Fig. 2). La zona de falla está compuesta por arenas y lutitas versicolores (Fig. 3B). En el afloramiento de Oseja la Falla de Jarque pone en contacto los materiales del Cámbrico con lutitas de las facies Keuper, del Triásico superior, que están acuñadas y tienen pocos metros de espesor. También en las proximidades del afloramiento aparecen materiales correspondientes a las facies Muschelkalk, del Triásico medio, y a la Fm. Cortes de Tajuña, del Jurásico inferior (Figs. 2 y 3A, C). El afloramiento se caracteriza por la presencia de bloques de material calcáreo, fragmentados y movilizados por la falla dentro de los materiales de las facies Keuper (Fig. 3C). En las proximidades de este afloramiento los materiales de la Fm. Cortes de Tajuña describen un conjunto de pliegues apretados de dirección NW-SE, aproximadamente de 20 m de longitud, una longitud de onda de unos pocos metros y vergencia SW, coherentes con los pliegues

observados de escala hectométrica y cartografiados (Figs. 2 y 3A). En el afloramiento del Collado la Falla de Jarque pone en contacto los materiales cámbricos con lutitas de las facies Keuper y calizas de la Fm. Cortes de Tajuña (Figs. 2 y 3D). En este afloramiento también aparecen bloques calcáreos aislados pero de mucho menor tamaño que en el afloramiento de Oseja y con pocos planos de falla observables.

Mesoestructuras e indicadores cinemáticos

En el afloramiento de Jarque los planos de falla son escasos y presentan gran variabilidad en sus orientaciones y se observa una gran cantidad de estructuras S-C (Fig. 4A). Los planos C tienen una orientación media N145, 70 W, próxima a la dirección de la Falla de Jarque y los planos S tienen una orientación media N112, 90 (Fig. 4C). Esta disposición de las estructuras S-C permite inferir una dirección de transporte NW-SE subhorizontal, coherente con una cizalla dextral.

En el afloramiento de Oseja la mayor parte de los planos de falla presentan una dirección NW-SE y fuertes buzamientos al SW, similar a la orientación de la Falla de Jarque. Gran parte de las estrías medidas (y estrilolitos en algunos casos) en estos planos de falla son subhorizontales (Fig. 4B, E), lo que indica un movimiento dominante de desgarre dextral. No obstante, algunas estrías presentan cabeceos más altos, en torno a 25° (algunos alcanzan los 45°), que conjuntamente con la presencia, cerca del afloramiento estudiado, de pliegues con vergencia SW afectando a materiales de la Fm. Cortes de Tajuña indicarían una componente inversa de menor entidad (Figs. 3A y 4D).

En el afloramiento del Collado apenas se han encontrado planos de falla y los que se han podido medir no se encuentran muy bien conservados por lo que la información estructural es escasa (Fig. 4F-H). Además, los planos de foliación tampoco están bien definidos por lo que este afloramiento en su conjunto no aporta una información estructural muy completa debido a la escasez de medidas y a su pobre conservación. Los planos de falla medidos tienen una orientación predominante NW-SE, similar a la dirección obtenida en los otros afloramientos y a la traza general de la Falla de Jarque (Fig. 4G). En este afloramiento no aparecen estrías ni ningún tipo de indicador cinemático. Los planos de foliación tienen una dirección nortada aunque presentan bastante variedad y buzamientos altos y medios (Fig. 4H).

Características microestructurales

En este apartado se describen las observaciones realizadas en muestras de mano y en láminas delgadas.

La lámina delgada J12 (afloramiento de Jarque) muestra una brecha de falla con bandeado cataclástico (Fig. 5E). La roca contiene fragmentos de cuarzo de diferentes tamaños muy deformados e inmersos en una matriz lutítica con presencia de filosilicatos. Se observa una zona de la lámina con numerosas fracturas sin dirección predominante (Fig. 5E, F), mientras que en el resto de la lámina se observa dicho bandeado (Fig. 5E, G). Estas bandas tienen una dirección aproximada N140-150, similar a la dirección de los planos C medidos en este afloramiento y a la orientación general de la Falla de Jarque.



Fig. 3.- A. Pliegues de escala hectométrica en materiales de la Fm. Cortes de Tajuña en el entorno del afloramiento de Oseja. B. Aspecto del afloramiento de las rocas de falla derivadas de materiales lutíticos y arenosos del Triásico inferior (Buntsandstein), en el afloramiento de Jarque. C. Aspecto del entorno del afloramiento de Oseja donde pueden observarse grandes bloques calcáreos del Triásico medio (unidad superior del Muschelkalk) rodeados por material lutítico rojizo del Triásico medio (unidad inferior del Muschelkalk) y del Triásico superior (Keuper). D. Aspecto del entorno del afloramiento de Collado donde se observan materiales calcáreos del Jurásico inferior (Cortes de Tajuña) en contacto con materiales rojizos del Triásico superior (Keuper).

En la muestra J5 (afloramiento de Oseja), se observan estructuras S-C en la sección pulida (muestra de mano) que indican un movimiento dextro (Fig. 5A). Se han realizado dos láminas delgadas perpendiculares a la foliación, una de ellas vertical (Fig. 5C) y la otra inclinada conteniendo a la

dirección de la foliación (Fig. 5B). En lámina delgada se observa una roca de falla con granos heterométricos. En la lámina oblicua se aprecian, estructuras S-C y fracturas que indican movimiento dextro (Fig. 5B, D). La dirección predominante de los planos de cizalla es N153E, lo que co-

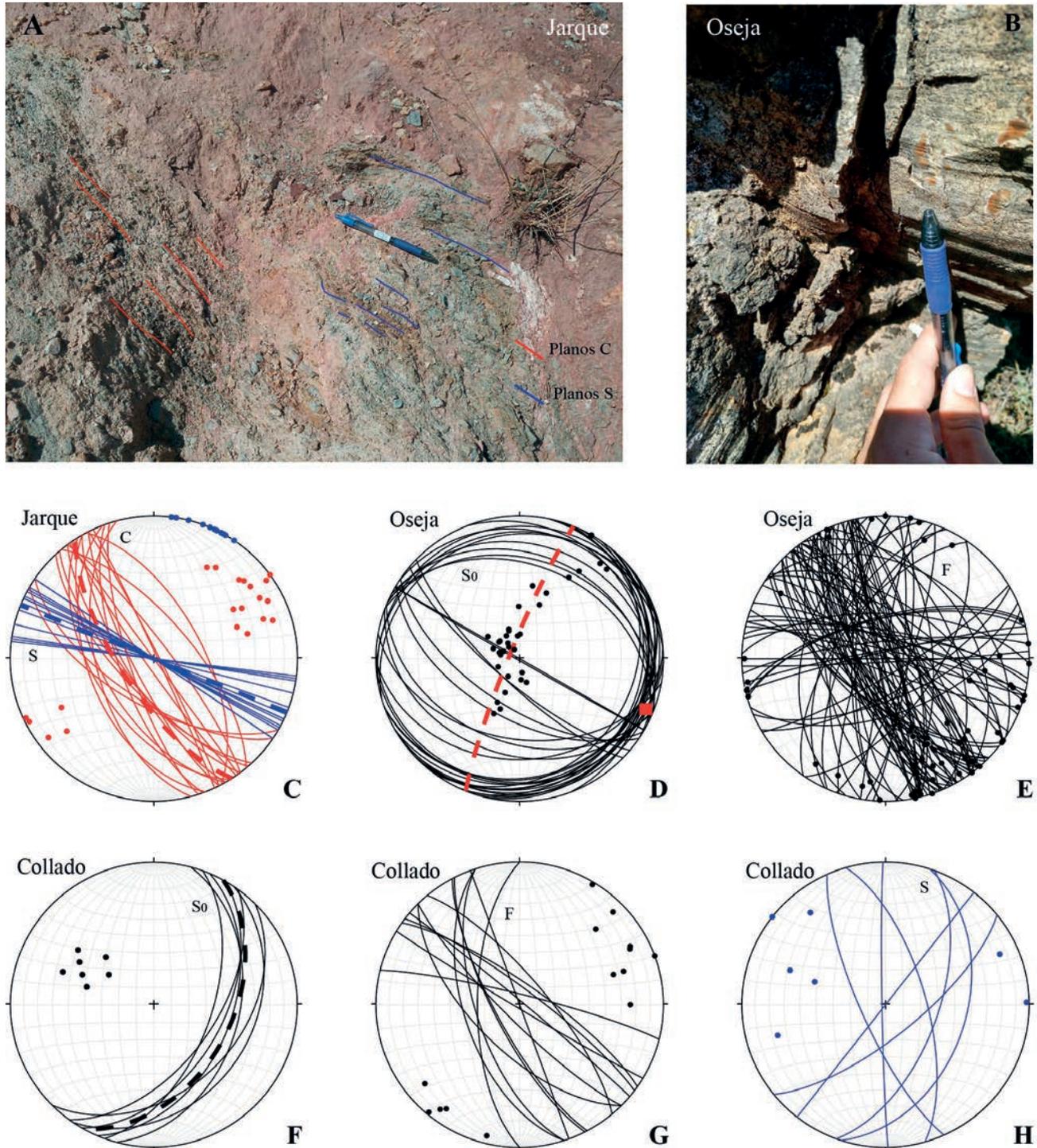


Fig. 4.- A. Fotografía de las estructuras S-C medidas en la zona de falla del afloramiento de Jarque. B. Detalle de un plano de falla con indicador de movimiento en el afloramiento de Oseja. C. Proyección estereográfica de las estructuras S-C del afloramiento de Jarque con sus planos medios. En rojo planos C y en azul planos S. D. Proyección estereográfica de la estratificación (planos y polos en negro) en el entorno del afloramiento de Oseja. En rojo plano de movimiento y eje de plegamiento. E. Proyección estereográfica de los planos de falla con sus estrías del afloramiento de Oseja. F. Proyección estereográfica de los planos de estratificación con el plano medio del afloramiento del Collado. G. Proyección estereográfica de los planos de falla con sus polos del afloramiento del Collado. H. Proyección estereográfica de los planos de foliación con sus polos en el afloramiento del Collado. Proyección de Schmidt, hemisferio inferior, programa Stereonet (Allmendinger *et al.*, 2013; Cardoso y Allmendinger, 2013). S0: estratificación; S: foliación; C: planos de cizalla; F: fallas.

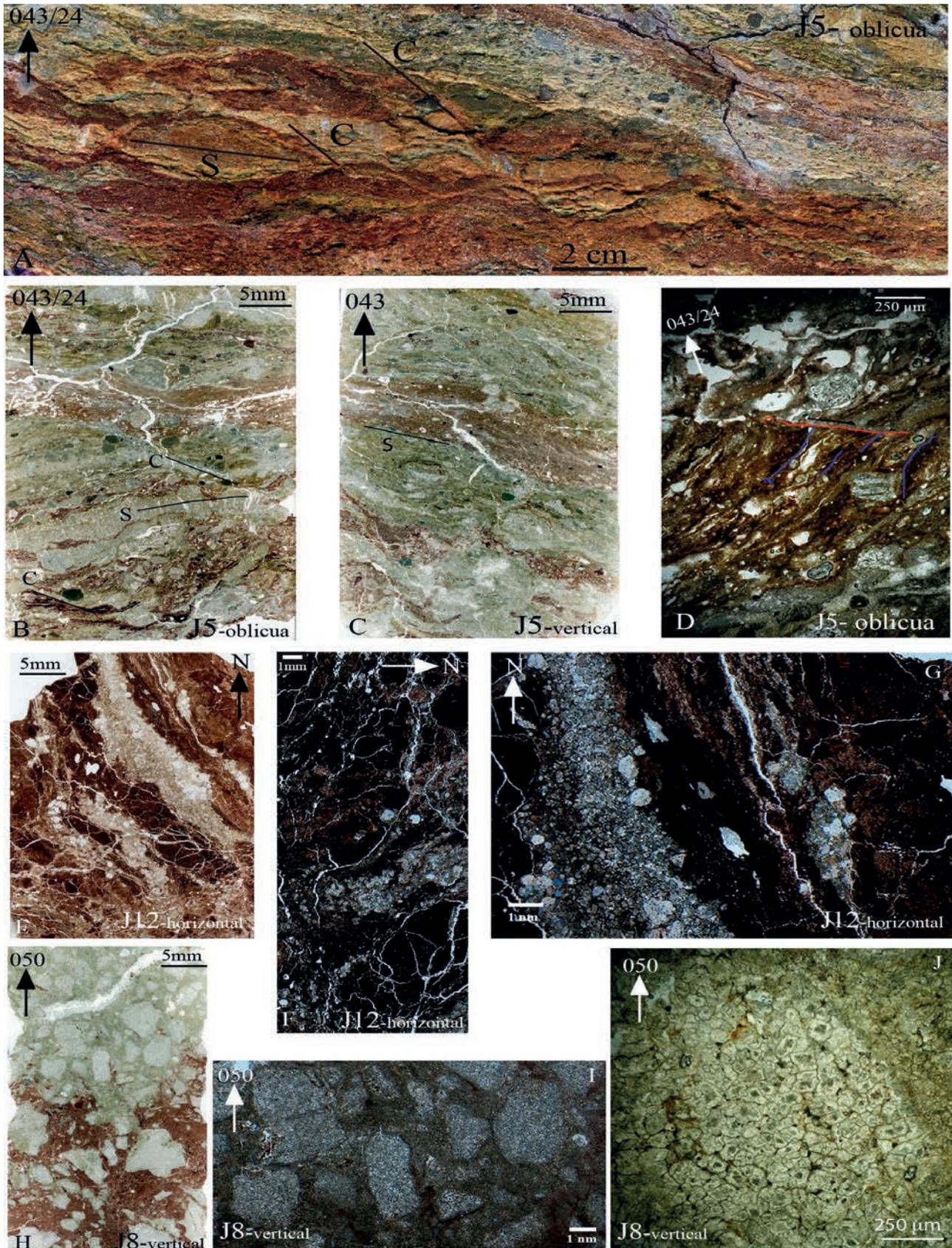


Fig. 5.- A. Sección pulida perpendicular a la foliación y conteniendo la dirección de la foliación, de la muestra de mano J5, correspondiente al afloramiento de Oseja. B. Lámina delgada de la muestra J5 con la misma orientación que la sección pulida. C. Lámina delgada de la muestra J5 perpendicular a la foliación y vertical. D. Detalle de las estructuras S-C en la lámina J5 (nícoles paralelos). E. Lámina delgada horizontal de la muestra J12, correspondiente al afloramiento de Jarque. F. Detalle de la lámina J12 donde se observa la intensa brechificación (nícoles cruzados). G. Detalle de la lámina J12 donde se observa el bandeo (nícoles cruzados). H. Aspecto general de la lámina J8, correspondiente al afloramiento del Collado. I. Detalle de la lámina J8 (nícoles cruzados). J. Detalle de los clastos de cuarzo de la lámina J8 (nícoles paralelos).

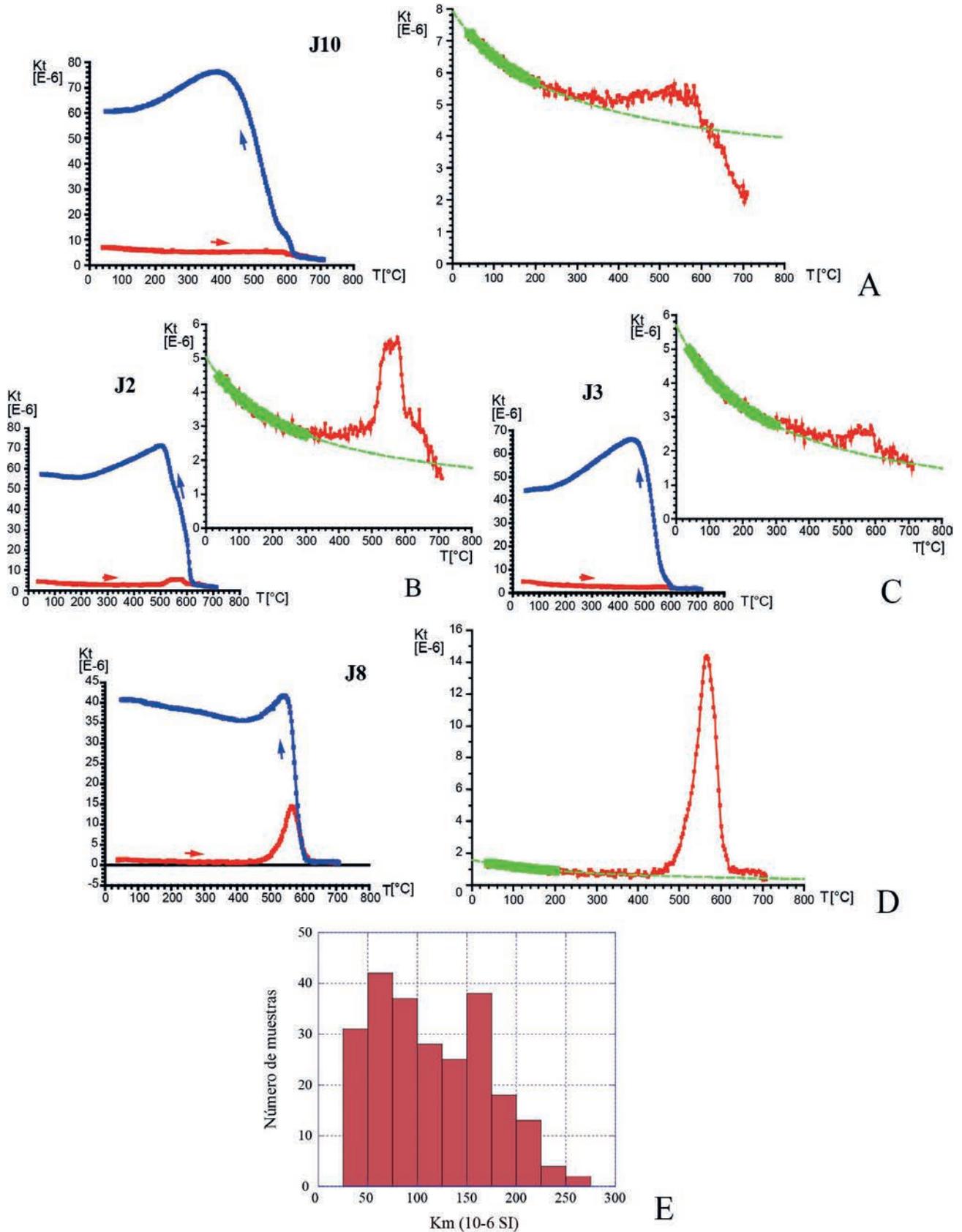


Fig. 6.- Curvas termomagnéticas k-T de muestras seleccionadas. A. Muestra J10 correspondiente a materiales del afloramiento de Jarque. B. Muestra J2 correspondiente a materiales del afloramiento de Oseja. C. Muestra J3 correspondiente al afloramiento de Oseja. D. Muestra J8 correspondiente a materiales del afloramiento del Collado. E. Histograma de la susceptibilidad magnética para el total de los especímenes. En todos casos se muestran dos gráficas, una con la curva k-T completa (en rojo la curva de calentamiento y en azul la de enfriamiento) y otra gráfica con la ampliación de la curva de calentamiento (en verde se muestra el ajuste hiperbólico al comportamiento paramagnético según el método de Hrouda *et al.* (1997).

responde aproximadamente a la dirección general de los planos de falla medidos en este afloramiento. En la lámina vertical se aprecia únicamente un bandeado o foliación de dirección N150E (Fig. 5C).

En el afloramiento del Collado se ha analizado microestructuralmente la lámina delgada de la muestra J8. Esta lámina contiene clastos de cuarzo alterados, rotos y deformados (Fig. 5H–J) inmersos en una matriz que varía de lutítica (en mitad de la lámina, Fig. 5H) a aparentemente la misma composición que los clastos (en la otra mitad de la lámina, Fig. 5H, I). En esta muestra no se aprecian bandeados ni zonas de cizalla. Sin embargo, se puede apreciar una ligera alineación de los clastos en dirección N050E (Fig. 5H, I).

Mineralogía magnética

Las cuatro curvas termomagnéticas correspondientes al afloramiento de Jarque (J10, J11, J12 y J15) presentan una disminución de la susceptibilidad con geometría hiperbólica en su tramo inicial, que indica contribución de minerales paramagnéticos, en una proporción entre un 60% y un 70%, porcentajes estimados de acuerdo con el método de Hrouda *et al.* (1997). Todas ellas presentan una temperatura final de caída próxima a 680°C, que se corresponde con la temperatura de Néel de la hematites. Las curvas no son reversibles, la curva de vuelta presenta mayores susceptibilidades que la de ida, debido a la neoforración de minerales durante el calentamiento (Fig. 6A).

Aflora- miento	Muestra de mano	Litología/ Unidad	n/N	Km ($\times 10^{-6}$ SI)	Dev. st. ($\times 10^{-6}$ SI)	P'	Dev. st.	T	Dev. st.
Jarque	J10	Lutitas rojas/TI	21/21	164	22	1,044	0,020	0,080	0,342
	J11	Lutitas rojas/TI	8/9	157	36	1,057	0,017	0,550	0,379
	J12	Lutitas rojas/TI	9/9	142	40	1,043	0,015	0,204	0,388
	J13	Lutitas rojas/TI	9/9	163	40	1,032	0,016	0,289	0,421
	J14	Lutitas rojas/TI	10/10	79	26	1,049	0,033	0,161	0,248
	J15	Lutitas rojas/TI	23/23	151	29	1,027	0,011	0,320	0,416
	J12+J13		18/18	153	41	1,037	0,016	0,247	0,396
	J10+J11+ J14+J15		62/63	145	40	1,040	0,022	0,243	0,389
Oseja	J1	Calizas ocres/ TM-TS	38/38	89	13	1,036	0,035	0,119	0,454
	J2	Lutitas rojas y grises/ TM-TS	14/14	137	41	1,065	0,017	0,695	0,134
	J3	Lutitas grises/TM	12/12	154	25	1,024	0,003	-0,061	0,198
	J4	Lutitas rojas/TS	26/26	187	47	1,073	0,023	0,398	0,374
	J5	Calizas grises/TM	18/18	64	13	1,071	0,039	0,289	0,395
	J1+J2+J3		64/64	112	37	1,040	0,032	0,212	0,450
	J4+J5		44/44	137	71	1,072	0,030	0,117	0,509
	J1+J2+J3+ J4+J5		108/108	112	37	1,040	0,032	0,212	0,450
Collado	J6	Calizas grises/JI	15/15	48	8	1,035	0,025	-0,102	0,362
	J7	Lutitas rojas/TS	12/12	71	18	1,020	0,011	0,177	0,412
	J8	Calizas grises/JI	23/23	46	8	1,034	0,012	-0,328	0,293
	J6+J7		27/27	58	18	1,028	0,021	0,022	0,403

Tabla 1.- Valores medios de los parámetros escalares obtenidos de la medida de la ASM para cada muestra de mano: n/N: número de especímenes considerados/analizados para cada muestra; Km: magnitud de la susceptibilidad magnética (en 10^{-6} SI); P': grado de anisotropía corregido; T: parámetro de forma; Dev. st.: desviación estándar. TI: Triásico inferior (Buntsandstein), TM: Triásico medio (Muschelkalk), TS: Triásico superior (Keuper), JI: Jurásico inferior (Cortes de Tajuña).

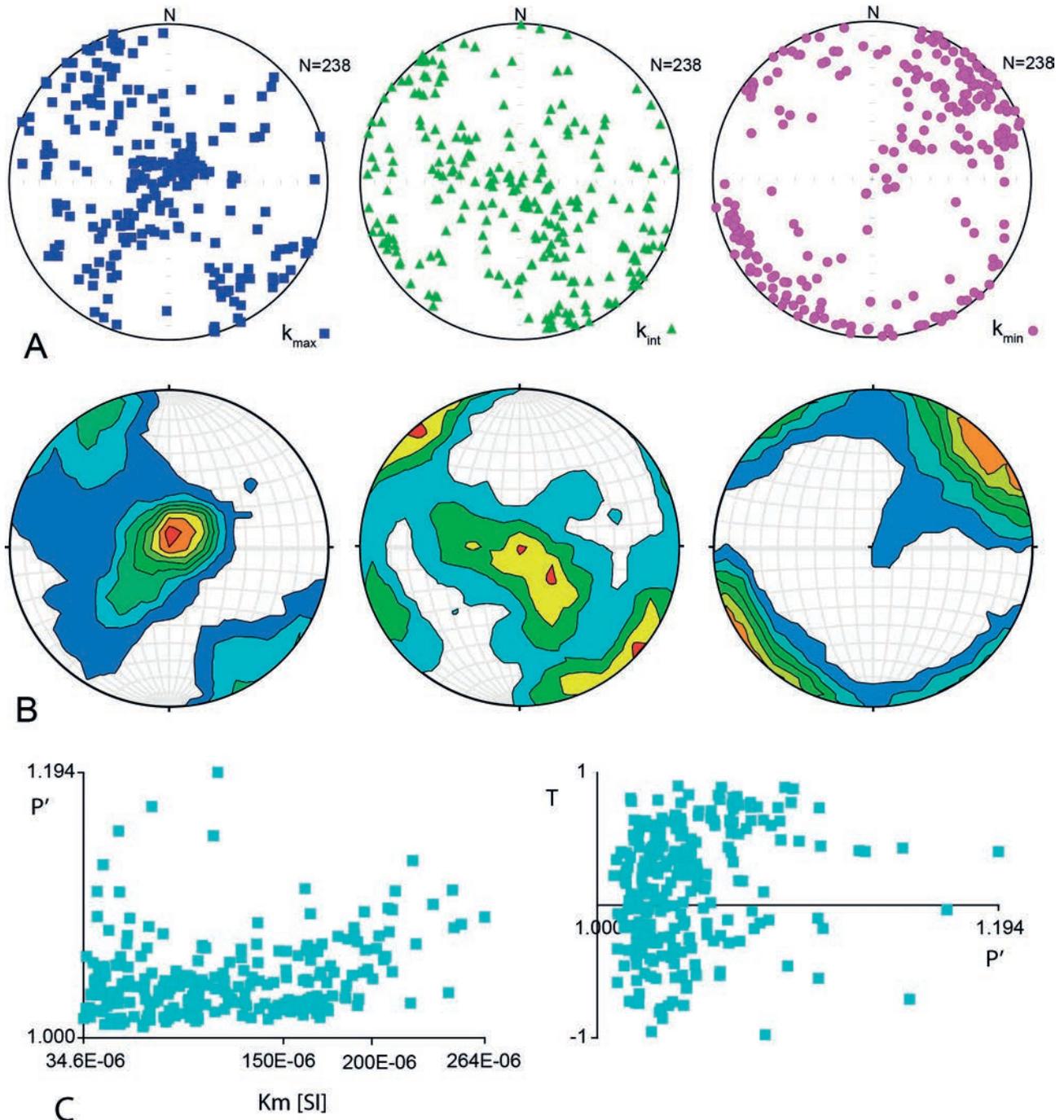


Fig. 7.- A. Análisis direccional de los datos de ASM: estereogramas globales (k_{max} , k_{int} , k_{min}) de todos los especímenes (proyección en el hemisferio inferior, equiareal, estadística de Jelinek, 1978). B. Diagramas de densidad de los datos de ASM (k_{max} , k_{int} , k_{min}) para todos los especímenes (Kamb Contouring, intervalo de contorno = 2 sigma, significance level = 3; Stereonet software; Allmendinger *et al.*, 2013; Cardozo y Allmendinger, 2013). C. Gráficos Km versus P' , y P' versus T para el total de los datos.

Las cinco curvas del afloramiento de Oseja (J1, J2, J3, J4 y J5) presentan más variabilidad. En todas ellas se puede apreciar también el comportamiento paramagnético ya que presentan una disminución de la susceptibilidad con geometría hiperbólica en su tramo inicial, con porcentajes de minerales paramagnéticos superiores al 70%, llegando en algunas muestras (J3) al 100% (Hroudá *et al.*, 1997). Sin embargo, las muestras J1, J2 y J5 presentan pico de Hopkinson y caída parcial de la susceptibilidad en torno a 580°C que corresponde a la temperatura de Curie de la magnetita (Fig. 6B). Final-

mente, todas las curvas terminan de caer en torno a 680°C lo que indica presencia de hematites en todas las muestras analizadas. Las curvas no son reversibles, lo que indica que hay neoformación de minerales durante la fase de calentamiento (Fig. 6B, C).

En las tres curvas termomagnéticas obtenidas de muestras recogidas en el afloramiento del Collado (J6, J7 y J8) el porcentaje de minerales paramagnéticos es también elevado, siendo de 70% en J6, 63% en J7 y 100% en J8 (Fig. 6D). Como en los casos anteriores las curvas no son reversibles lo que indica que hay neo-

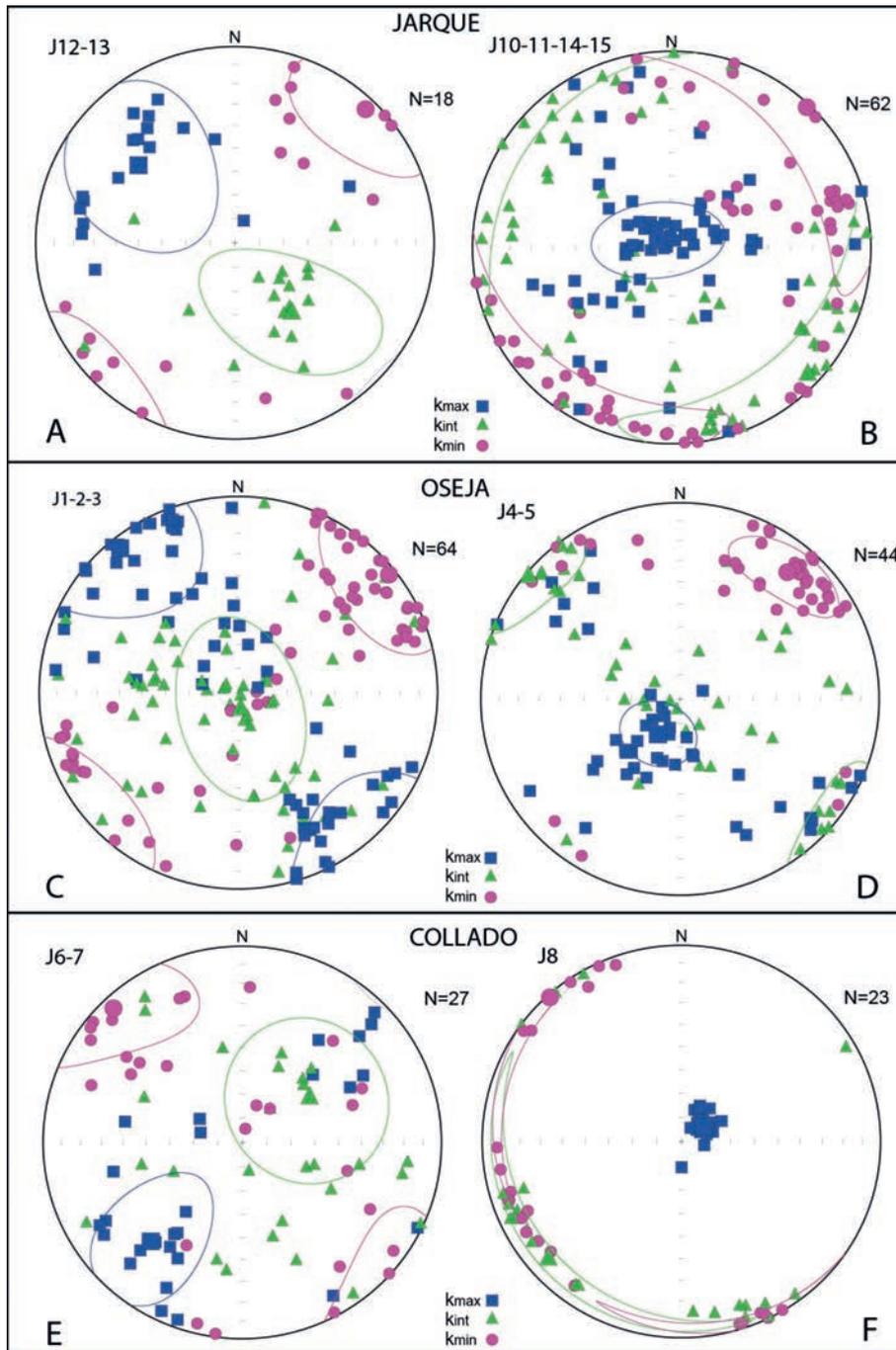


Fig. 8.- Datos direccionales obtenidos a partir del análisis de ASM (hemisferio inferior, proyección equiareal, vectores medios y elipses de confianza calculados según la estadística de Jelinek, 1978) para todos los especímenes de los tres afloramientos, agrupados según la orientación de los ejes de ASM. A y B. Afloramiento de Jarque. C y D. Afloramiento de Oseja. E y F. Afloramiento del Collado.

formación de minerales. Las tres curvas presentan la caída final en torno a 580°C, temperatura de Curie de la magnetita.

Resumiendo, en las muestras tomadas de los tres afloramientos dominan los minerales paramagnéticos (probablemente filosilicatos) como portadores de la susceptibilidad magnética. En cuanto a la mineralogía ferromagnética, los resultados muestran que en las rocas muestreadas en el afloramiento de Jarque hay presencia de hematites, en el de Oseja hay hematites en una pro-

porción menor y en algunas muestras también puede haber presencia de magnetita, y en el afloramiento del Collado solo hay presencia residual de magnetita. Estos datos indican un cambio mineralógico en las muestras recogidas de SE a NW por la traza de la falla, coherente con las diferentes facies muestreadas: lutitas correspondientes a las facies Buntsandstein en Jarque, calizas pertenecientes a las facies Muschelkalk y lutitas de las facies Keuper en Oseja y lutitas correspondientes a las facies Keuper y calizas pertenecientes a la Fm. Cortes de Tajuña en el Collado.

Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética

Los resultados globales de la orientación de los ejes del elipsoide magnético obtenido al analizar la ASM muestran bimodalidad en la orientación del eje k_{\max} (o lineación magnética) con un máximo en la vertical y otro próximo a la horizontal en dirección NW-SE (Fig. 7A, B). El eje k_{\min} (eje perpendicular a la foliación magnética) también muestra dos máximos, ambos subhorizontales: el principal se sitúa en dirección NE-SW, y el secundario en dirección NW-SE (Fig. 7A, B). La susceptibilidad media varía entre 46 y 187 $\times 10^{-6}$ SI considerando las medias para cada muestra de mano (Tabla 1) y entre 34 y 264 $\times 10^{-6}$ SI considerando todos los especímenes, presentando el 92% de los especímenes valores inferiores a 200 $\times 10^{-6}$ SI (Figs. 6E y 7C). Estos valores

son coherentes con el comportamiento predominantemente paramagnético obtenido de las curvas termomagnéticas y analizado en el apartado anterior. El grado de anisotropía P' varía entre 1,020 y 1,073 considerando las medias de las muestras de mano (Tabla 1) y aunque se puede apreciar cierta correlación positiva con la susceptibilidad magnética en los valores más altos de ésta (Fig. 7C), lo que podría indicar que la fábrica magnética está controlada en cierta medida por la mineralogía magnética, para valores de K_m por debajo de 200 $\times 10^{-6}$

Muestra	Latitud/Longitud	k_{\max} Dec/Inc	Ang. conf.	k_{int} Dec/Inc	Ang. conf.	k_{\min} Dec/Inc	Angles conf.
J10	N41°33'37,88"/W1°40'16,77"	061/79	15/10	301/5	31/15	211/9	31/10
J11	N41°33'37,88"/W1°40'16,77"	292/66	27/3	166/15	29/8	071/18	15/3
J12	N41°33'37,88"/W1°40'16,77"	327/30	12/4	141/59	16/8	235/2	16/8
J13	N41°33'37,88"/W1°40'16,77"	268/35	34/8	122/50	49/14	010/17	45/12
J14	N41°33'37,88"/W1°40'16,77"	051/68	30/11	249/21	47/29	157/6	47/8
J15	N41°33'37,88"/W1°40'16,77"	234/59	33/14	331/4	49/18	063/30	50/23
J12+J13		309/38	41/27	142/52	42/22	044/6	28/24
J10+J11+ J14+J15		298/84	27/16	134/6	63/18	043/2	63/21
J1	N41°36'10,75"/W1°42'29,73"	336/15	23/15	179/74	47/23	068/6	48/8
J2	N41°36'10,75"/W1°42'29,73"	123/7	18/6	295/83	18/7	033/1	8/7
J3	N41°36'10,75"/W1°42'29,73"	150/25	8/4	284/54	11/5	048/24	10/5
J4	N41°36'10,75"/W1°42'29,73"	218/79	34/5	314/1	34/13	044/11	13/4
J5	N41°36'10,75"/W1°42'29,73"	219/62	17/6	087/19	60/15	350/20	60/7
J1+J2+J3		321/6	38/25	173/83	40/26	051/4	29/26
J4+J5		211/73	16/13	309/2	21/15	040/17	21/13
J6	N41°36'56,28"/W1°43'00,75"	218/35	24/12	061/53	24/23	316/11	25/11
J7	N41°36'56,28"/W1°43'00,75"	237/20	61/25	023/66	61/49	142/12	52/31
J8	N41°36'56,28"/W1°43'00,75"	055/79	6/3	228/11	70/5	318/1	70/4
J6+J7		222/32	35/19	057/57	35/34	317/7	34/20

Tabla 2.- Datos direccionales del análisis de la ASM (orientaciones medias para cada muestra de mano): k_{\max} , k_{int} , k_{\min} : orientación media (Dec/Inc: declinación/inclinación) considerando la estadística de Jelinek (Jelinek, 1978); Ang. conf.: ángulos de confianza.

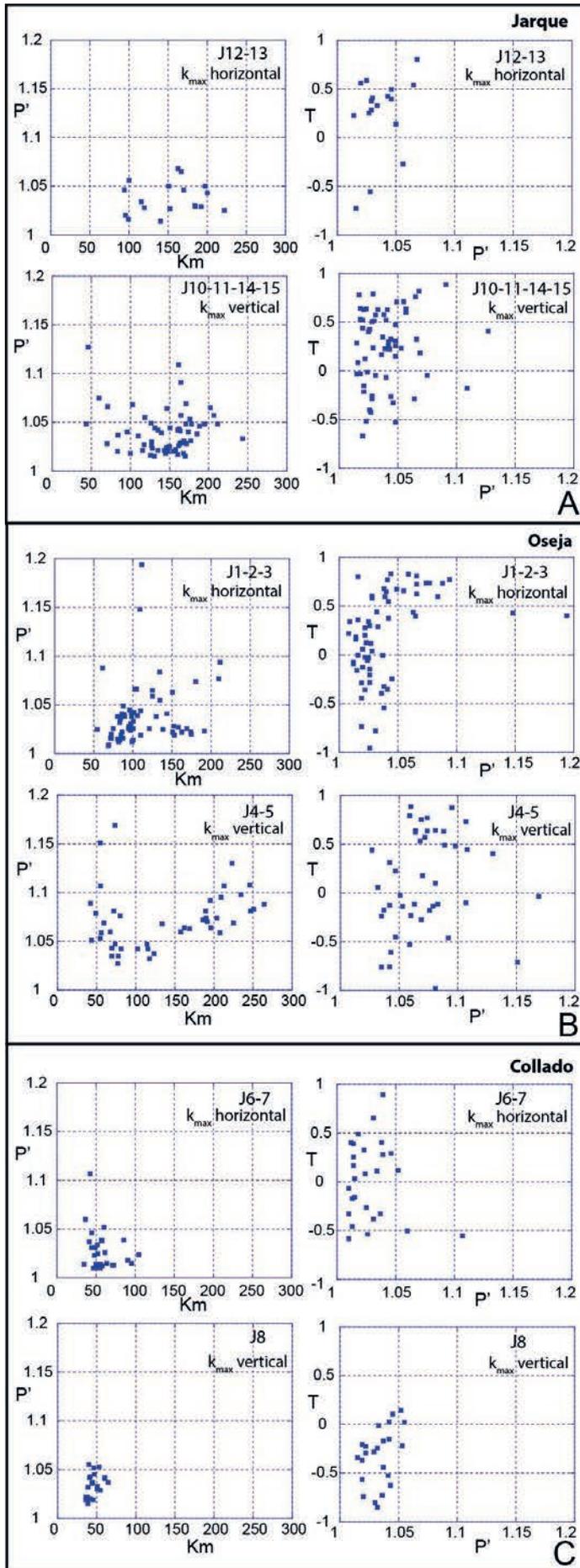
⁶ Si los valores de P' son constantes al aumentar K_m , lo que indica que en estos casos no depende de la mineralogía magnética (Fig. 7C). Aunque se observan los tres tipos de forma del elipsoide magnético (oblatos, prolato y triaxial), dominan los elipsoides oblatos (Fig. 7C y Tabla 1). Al igual que en otras zonas de falla, se observa una cierta correlación entre la forma del elipsoide y el grado de anisotropía del elipsoide magnético, aumentando P' en los elipsoides más oblatos, frente a los triaxiales y especialmente los prolato que presentan valores de P' menores (Fig. 7C).

Analizando los resultados para cada afloramiento por separado (Fig. 8), tanto en el afloramiento de Jarque como en el de Oseja, los resultados obtenidos se muestran en dos proyecciones estereográficas separados en función de la orientación de la lineación magnética, k_{\max} . Así, los resultados muestran que para los especímenes analizados extraídos de las muestras de mano J10, J11, J14, J15, J4 y J5 la media de k_{\max} se orienta en torno a la vertical (Tabla 2 y Fig. 8B, D), y para los especímenes de las muestras J12, J13, J1, J2 y J3 en torno a la horizontal con dirección NW-SE (Tabla 2 y Fig. 8A, C). El eje k_{\min} se dispone en la horizontal en todos los casos, y en dirección aproximada NE, y por tanto perpendicular a la dirección de la falla principal y de las fallas medidas en el afloramiento (comparar con la Fig. 4E).

En el afloramiento del Collado, los ejes k_{\max} obtenidos también muestran diferente orientación en función de la muestra de mano analizada. Para los especímenes analizados extraídos de la muestra de mano J8, la media de k_{\max} se encuentra en la vertical y

el eje k_{\min} se distribuye a su vez en dos máximos (Fig. 8F), uno de dirección NE-SW, coherente con la perpendicular a las fallas medidas en este afloramiento (comparar con la Fig. 4G), y otro NW-SE coherente con la perpendicular a la foliación y a la orientación preferente de los clastos en lámina delgada (comparar con la Fig. 4H). En cambio, para los especímenes extraídos de las muestras J6 y J7, el eje k_{\max} se encuentra próximo a la horizontal, en una dirección NE-SW, los ejes k_{int} y k_{\min} se encuentran dispersos en torno a un plano no muy claramente definido de dirección NW-SE, siendo el máximo de k_{\min} subhorizontal en dirección NW-SE (Fig. 8E). Estas diferencias en la orientación de los ejes principales no obedecen a diferencias litológicas (Tabla 1).

Analizando los parámetros escalares del análisis de la ASM de los especímenes obtenidos en cada afloramiento y en función de la diferente orientación de la lineación magnética obtenida para los especímenes de cada muestra de mano (Fig. 9), se observa que el grado de anisotropía P' no presenta correlación con la variación de los valores de K_m en las muestras del afloramiento de Jarque (Fig. 9A, gráficos K_m - P'). En el afloramiento de Oseja, los especímenes extraídos de las muestras de mano J4 y J5 muestran valores algo más altos de susceptibilidad magnética que se correlacionan de forma positiva con valores crecientes de P' (especialmente los especímenes correspondientes a la muestra J4, Fig. 9B). Tampoco se observa variación en el parámetro de forma T en función de la orientación de la lineación magnética para los especímenes analizados en ninguno de estos dos afloramientos, observándose el



mismo patrón que para el conjunto de los datos (se observan los tres tipos de forma del elipsoide magnético, dominando los elipsoides oblatos; gráficos P' - T en Fig. 9A, B).

Los especímenes analizados del afloramiento del Collado son los que presentan los valores de susceptibilidad magnética K_m más bajos, inferiores a 71×10^{-6} SI (considerando la media de las muestras; Tabla 1) e inferiores a 100×10^{-6} SI considerando todos los especímenes (gráficos K_m - P' en Fig. 9C). Sin embargo, sí que se observa un control sobre el parámetro de forma del elipsoide magnético T , pudiéndose apreciar que el elipsoide magnético es claramente prolato cuando la lineación magnética es vertical. En el caso de los especímenes con la lineación magnética horizontal, el elipsoide magnético presenta tanto valores negativos (prolato), como cercanos a cero (triaxial) y positivos (oblatos) (gráficos P' - T en Fig. 9C) siguiendo el mismo patrón que para el conjunto de los datos. Estas diferencias en la orientación de los ejes principales no obedecen a diferencias litológicas ya que las muestras J6 y J8 corresponden a la misma litología y edad (Tabla 1).

Las medidas de ASM a baja temperatura (ASM-LT) indican que el incremento en la susceptibilidad magnética con respecto a las medidas realizadas a temperatura ambiente (ASM-RT) corresponde a un factor de 2,8 para J15 (afloramiento de Jarque), de 1,7 para J1 (afloramiento de Oseja), y de 2,4 para J6 (afloramiento del Collado) (Fig. 10D). Estos valores (inferiores a 3,8 y por encima de 1) indican una contribución parcial de las fases ferromagnéticas a la ASM, y el factor más alto obtenido para J15 indica que la contribución de la fase paramagnética a la ASM es mayor en esas muestras (Fig. 10D).

Los ejes magnéticos de los especímenes medidos en los tres afloramientos permanecen en general con la misma orientación a bajas temperaturas que a temperatura ambiente. En especial, en los especímenes de J15 la superposición es casi perfecta (Fig. 10C). En el caso de los especímenes de J6 y J1, k_{\max} se mantiene prácticamente en la misma orientación, mientras k_{\min} y k_{int} pasan a distribuirse en una ciclográfica (Fig. 10A, B). La coincidencia de la orientación de los ejes magnéticos indica que la ASM-RT y la ASM-LT vienen dadas por la misma mineralogía, o que los portadores de la ASM-RT presentan la misma orientación que los portadores de la ASM-LT.

Fig. 9.- Gráficos K_m versus P' , y P' versus T para todos los especímenes de los tres afloramientos agrupados según la orientación de los ejes de ASM. A. Afloramiento de Jarque. B. Afloramiento de Oseja. C. Afloramiento del Collado.

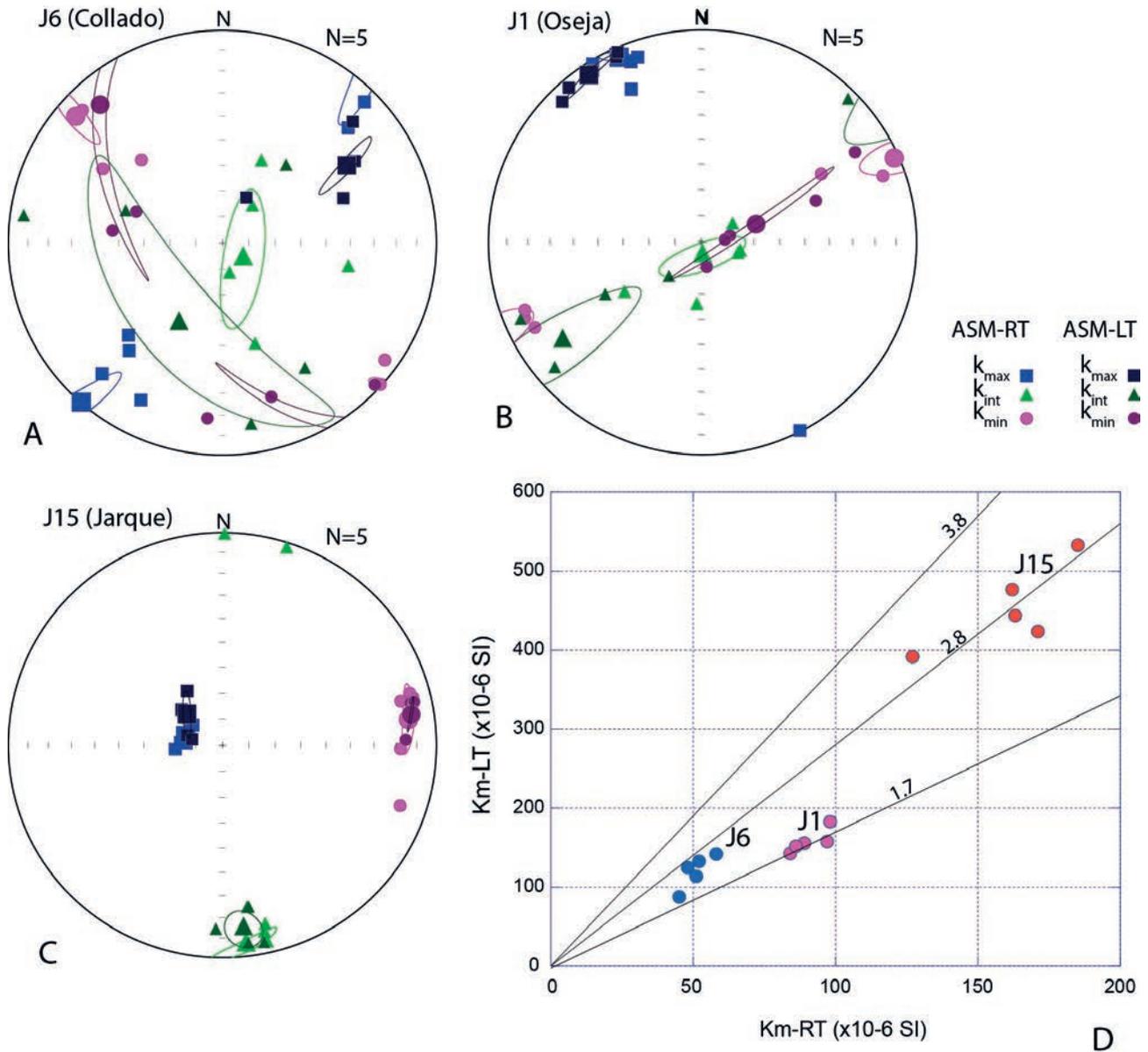


Fig. 10.- A, B y C. Estereogramas que muestran los resultados de la ASM a baja temperatura (ASM-LT) y su comparación con la ASM a temperatura ambiente (ASM-RT) para una selección de muestras de cada afloramiento. D. Gráfico mostrando la relación de Km a temperatura ambiente (RT) frente a Km a baja temperatura (LT).

Interpretación y discusión

La aplicación de la ASM ha permitido obtener datos de foliaciones y lineaciones magnéticas bien definidos a partir del análisis de un número de muestras relativamente importante, y por tanto representativo del conjunto de las rocas de falla que afloran a lo largo de los tres afloramientos. La ASM proporciona también parámetros escalares que dan información sobre la intensidad de la deformación (grado de anisotropía P') y sobre la forma del elipsoide (parámetro de forma T), enriqueciendo la información estructural. Estos datos complementan los resultados del análisis estructural, haciendo más robustas las interpretaciones. En este apartado se analiza la representatividad de los datos y el significado de la orientación de los ejes de la ASM en relación con las foliaciones y las direcciones de transporte en la zona

de falla. Los resultados obtenidos, coherentes con los del análisis estructural, refuerzan la interpretación de los mismos, y permiten analizarlos en el contexto de la tectónica regional.

Cinemática de la Falla de Jarque a partir de datos estructurales

Los datos estructurales recopilados en los tres afloramientos son muy heterogéneos, y aparecen distribuidos de forma desigual en cada uno de los tres afloramientos. Los planos de falla medidos principalmente en el afloramiento de Oseja y en menor medida en el del Collado muestran una dirección predominante NW-SE y alto buzamiento al SW, similar a la traza de la Falla de Jarque en la cartografía, por lo que estos planos de falla se interpretan como sintéticos con la misma

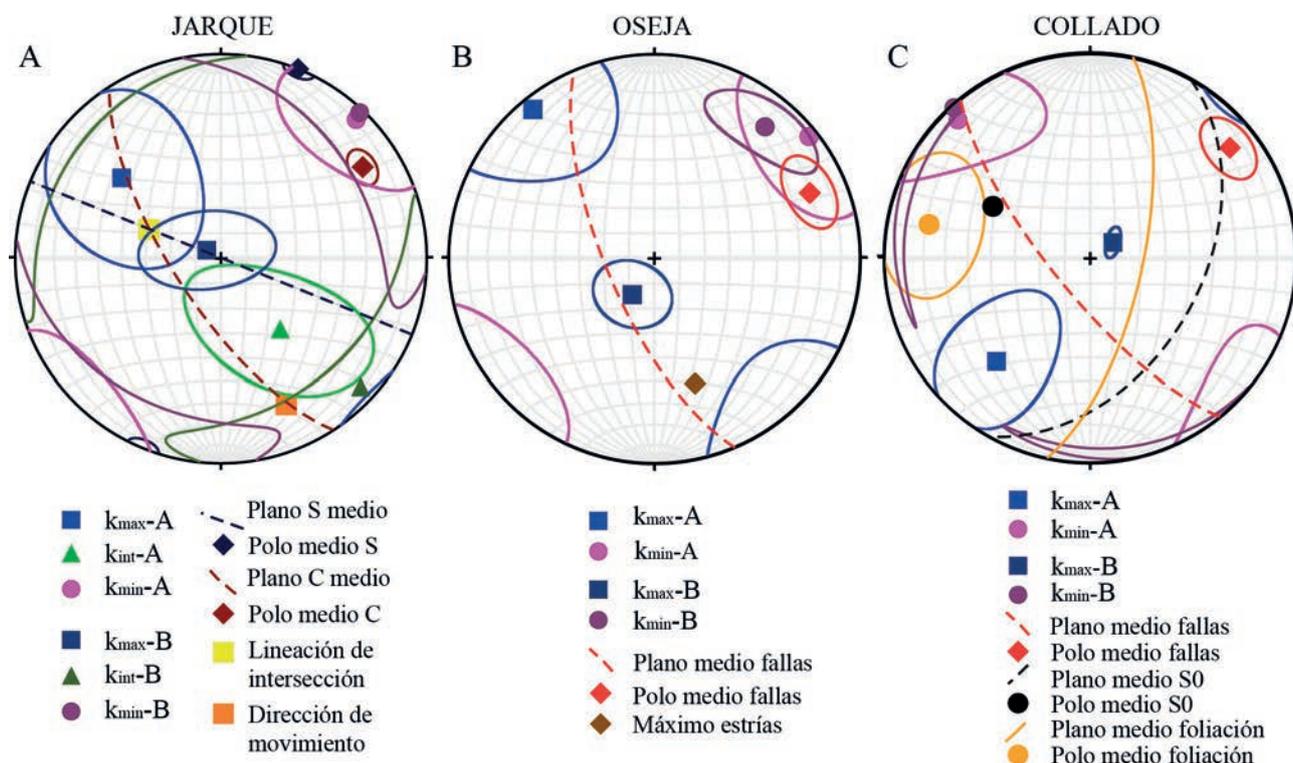


Fig. 11.- Estereogramas con las medias de las diferentes estructuras y ejes magnéticos de los afloramientos de Jarque (A), Oseja (B) y Collado (C). $k_{máx-A}$, k_{int-A} , $k_{mín-A}$ corresponden a las medias de los ejes cuando $k_{máx}$ se aproxima a la horizontal. $k_{máx-B}$, k_{int-B} , $k_{mín-B}$ corresponden a las medias de los ejes cuando $k_{máx}$ se aproxima a la vertical.

(Fig. 4F, H). La falla ha tenido un movimiento predominantemente de desgarre, inferido a partir de las estrías de falla subhorizontales medidas en el afloramiento de Oseja (Fig. 4B), aunque pudo tener movimientos direccionales con una componente vertical más importante, tal como indican algunos planos de falla del mismo afloramiento que presentan estrías con cabeceos cercanos a 45° (Fig. 4F) y la presencia de pliegues a escala deca- a hectométrica claramente asimétricos (Fig. 3A). En este afloramiento se ha inferido un movimiento de desgarre dextral a partir de los escasos indicadores de movimiento encontrados sobre algunos de los planos de falla (estrilolitos). Este movimiento es coherente con el inferido a partir de las estructuras S-C observadas en las muestras de mano y en lámina delgada del afloramiento de Oseja (Fig. 5A, B, D), así como a partir de las estructuras S-C encontradas en el afloramiento de Jarque (Fig. 4A, C). En el afloramiento del Collado los datos estructurales son realmente escasos, y los indicadores cinemáticos inexistentes. A una escala mayor de observación, la curvatura las trazas axiales de los pliegues observados en los materiales mesozoicos del bloque NE de la falla (Fig. 2) sugiere un desarrollo de los mismos coetáneo al movimiento dextro de la falla.

Interpretación y discusión de los datos de fábricas magnéticas en relación con los datos estructurales y su significado

Tanto en el afloramiento de Jarque como en el de Oseja los resultados del análisis de la ASM muestran

una fábrica magnética tectónica (Fig. 11A, B). En particular, en las muestras analizadas del afloramiento de Jarque los resultados de la ASM muestran una foliación magnética media que coincide con la orientación intermedia entre los planos S y los C (Fig. 11A). Esto indica que, tanto la foliación como los planos C contribuyen en la orientación de la foliación magnética, bien por la reorientación de los filosilicatos en los planos S o bien por la concentración de minerales ferromagnéticos con orientación preferente (fundamentalmente hematites) en los planos C (Aranguren *et al.*, 1996; Casas *et al.*, 2017). En las muestras analizadas del afloramiento de Oseja la media de la foliación magnética muestra una orientación próxima a la media de la orientación de los planos de falla medidos en dicho afloramiento (Fig. 11B). En ambos afloramientos la presencia de un grupo de muestras con el eje magnético $k_{máx}$ dispuesto en la vertical se interpreta como la dirección de máxima pendiente de los planos de foliación y próximo a la línea de intersección entre los planos S y los planos C. La familia que muestra los ejes magnéticos $k_{máx}$ próximos a la horizontal y con dirección NW-SE, definiría la dirección de transporte de la falla, si bien presenta una inmersión NW tanto en el afloramiento de Jarque como en el de Oseja que contrasta con la inmersión SE obtenida a partir de las estructuras S-C en el afloramiento de Jarque (Fig. 11A) y de las estrías en el afloramiento de Oseja (Fig. 11B). De acuerdo con lo observado en otras zonas de falla, el tránsito de la línea magnética desde posiciones perpendiculares a la dirección de transporte (vertical) hasta una posición paralela a la di-

rección de transporte (subhorizontal en dirección NW-SE) es indicativo de un incremento en el grado de deformación (Casas-Sainz *et al.*, 2017, 2018). El hecho de que aparezcan en los dos afloramientos ambos tipos de lineaciones magnéticas es indicativo de la naturaleza heterogénea de la deformación asociada a la zona de Falla de Jarque.

Los resultados de ASM obtenidos en el afloramiento del Collado difieren de los otros dos, de manera que el eje k_{\max} próximo a la horizontal se orienta NE-SW paralelo al rumbo de las capas y el eje k_{\min} se mantiene subhorizontal pero en dirección NW-SE, siendo coherente en este caso con los polos de los planos de estratificación y foliación medidos en este afloramiento. Esto puede ser debido a que en este afloramiento la intensidad de la deformación asociada a la zona de falla sea menor (los valores del grado de anisotropía P', obtenidos en este afloramiento son algo menores; Tabla 1 y Fig. 9), a que la deformación sea más frágil en las calizas de la Fm. Cortes de Tajuña (no hay evidencias ni en afloramiento ni en lámina delgada de estructuras S-C), o a que las rocas muestreadas correspondan a la periferia de la zona de falla, y que por tanto la fábrica magnética esté relacionada con la fábrica original de la roca (*i.e.*, fábrica magnética de tipo sedimentario). Por otro lado, cabe destacar que sigue apareciendo un grupo de muestras con el eje k_{\max} próximo a la vertical y con el eje k_{\min} en dirección NE-SW, indicativo de una fábrica tectónica, coherente con la registrada en los otros afloramientos, pero sin llegar a alcanzar la intensidad suficiente para registrar la dirección de transporte tectónico. Esto podría estar relacionado también con las diferencias en la mineralogía magnética portadora de la ASM encontradas. El afloramiento del Collado es el único en el que no hay hematites, y la fracción paramagnética en algunas muestras es del 100% (*e.g.*, J8). Tal como se ha mencionado anteriormente, cuando la lineación magnética esta principalmente definida por minerales paramagnéticos, evoluciona desde ser paralela a la lineación de intersección a paralela a la dirección de transporte tectónico con el grado de deformación (Parés *et al.*, 1999; Pueyo *et al.*, 2010), mientras que si la lineación magnética está relacionada con minerales ferromagnéticos (*e.g.*, hematites), normalmente es paralela a la dirección de transporte tectónico (Oliva Urcia *et al.*, 2009; Casas *et al.*, 2017).

Implicaciones regionales

Debido a la orientación NW-SE y su elevado buzamiento, a la Falla de Jarque se le atribuye un origen tardivarisco, al igual que a la Falla de Río Grío aflorante al SE (Marcén Albero y Román Berdiel, 2015). Ambas fallas se disponen en relevo y la Falla de Río Grío muestra además evidencias de actividad extensional ligada a vulcanitas y mineralizaciones durante la etapa tardivarisca (Pocoví *et al.*, 1990). En el caso de la Falla de Jarque, en su prolongación hacia el SE aparece la denominada fosa de Morés, cuya formación ha sido atribuida a la extensión durante el Triásico (Hernández Samaniego *et al.*, 1978) y cuyas fallas asociadas cortarían o reactivarían a la Falla de Jarque como falla extensional en este tramo (Casas *et al.*, 2016). Durante el Cenozoico se produjo la inversión del *rift* ibérico y la reactivación de estructuras (Guimerà *et al.*, 2004). En este contexto se produciría la reactivación de la Falla de Jarque si tenemos en cuenta que los marcadores cinemáticos encontrados en los tres afloramientos reflejan el movimiento de la falla en esta última etapa tectónica. A partir de los datos analizados, tanto de análisis estructural como de ASM, atribuimos a la Falla de Jarque un movimiento transpresivo predominantemente dextro con componente inversa. Además, las estructuras asociadas a la falla, como los pliegues de escala cartográfica y los del afloramiento de Oseja, y las fallas oblicuas presentan orientaciones coherentes con un movimiento dextro de la falla. A escala regional esta cinemática queda enmarcada en el modelo transpresional aplicado al conjunto de las estructuras de orientación NW-SE del sector central de la Cordillera Ibérica (Casas *et al.*, 1998; De Vicente *et al.*, 2009). El estilo estructural de inversión tectónica propuesto por dichos autores sugiere principalmente desplazamientos de desgarre a lo largo de las fallas normales preexistentes desarrolladas principalmente durante el Mesozoico. Este movimiento de desgarre dextro sería similar al movimiento deducido para la vecina Falla de Río Grío (Marcén Albero, 2014; Marcén Albero y Román Berdiel, 2015), y coherente con una compresión de dirección NNE, como la descrita en el Mioceno inferior para la Cordillera Ibérica (Liesa y Simón, 2009).

buida a la extensión durante el Triásico (Hernández Samaniego *et al.*, 1978) y cuyas fallas asociadas cortarían o reactivarían a la Falla de Jarque como falla extensional en este tramo (Casas *et al.*, 2016). Durante el Cenozoico se produjo la inversión del *rift* ibérico y la reactivación de estructuras (Guimerà *et al.*, 2004). En este contexto se produciría la reactivación de la Falla de Jarque si tenemos en cuenta que los marcadores cinemáticos encontrados en los tres afloramientos reflejan el movimiento de la falla en esta última etapa tectónica. A partir de los datos analizados, tanto de análisis estructural como de ASM, atribuimos a la Falla de Jarque un movimiento transpresivo predominantemente dextro con componente inversa. Además, las estructuras asociadas a la falla, como los pliegues de escala cartográfica y los del afloramiento de Oseja, y las fallas oblicuas presentan orientaciones coherentes con un movimiento dextro de la falla. A escala regional esta cinemática queda enmarcada en el modelo transpresional aplicado al conjunto de las estructuras de orientación NW-SE del sector central de la Cordillera Ibérica (Casas *et al.*, 1998; De Vicente *et al.*, 2009). El estilo estructural de inversión tectónica propuesto por dichos autores sugiere principalmente desplazamientos de desgarre a lo largo de las fallas normales preexistentes desarrolladas principalmente durante el Mesozoico. Este movimiento de desgarre dextro sería similar al movimiento deducido para la vecina Falla de Río Grío (Marcén Albero, 2014; Marcén Albero y Román Berdiel, 2015), y coherente con una compresión de dirección NNE, como la descrita en el Mioceno inferior para la Cordillera Ibérica (Liesa y Simón, 2009).

Conclusiones

Las principales características estructurales de la Falla de Jarque en su sector centro-occidental pueden resumirse en: 1) Estructuras S-C de dirección NW-SE compatibles con una cizalla dextra; 2) Fallas con una dirección dominante N145E y alto buzamiento al W, con una familia dominante de estrías subhorizontales, que indican un movimiento dominante transcurrente dextro y algunas estrías con cabeceos comprendidos entre 25° y 45° que indicarían una cierta componente de *dip slip* inversa; y 3) Pliegues tanto a escala de afloramiento como a escala cartográfica oblicuos a la traza de la falla y coherentes con un movimiento transpresivo dextro de la falla.

Los minerales portadores de la mineralogía magnética son mayoritariamente paramagnéticos, aunque también se encuentran minerales ferromagnéticos como la hematites y la magnetita.

Los resultados de la ASM muestran una orientación dominante de la foliación magnética NW-SE, en una posición intermedia entre los planos S y los planos C. La lineación magnética se agrupa en dos familias que coexisten en volúmenes de roca muy próximos, una vertical y perpendicular a la dirección de movimiento, y otra horizontal con una dirección NW-SE, que corresponde

con la dirección de transporte de la Falla de Jarque, indicativo de variación en el grado de deformación y de la naturaleza heterogénea de la deformación asociada a la zona de falla.

Por lo tanto, el estudio de la cinemática de la Falla de Jarque mediante técnicas magnéticas (ASM) y de geología estructural aporta resultados que permiten inferir que la Falla de Jarque de dirección NW-SE fue reactivada durante la Orogenia Alpina con un comportamiento transpresivo dextro.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Ruth Soto y Renata Nela Tomezzoli por sus revisiones, y al Servicio General de Apoyo a la Investigación-SAI, y en particular a los Servicios de Preparación de Rocas y Minerales Duros y de Líquidos Criogénicos, de la Universidad de Zaragoza por su colaboración. Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CGL2013-42670-P del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y Geotransfer-E32_17R del Gobierno de Aragón y Programa Operativo FEDER Aragón 2014-2020.

Referencias

- Allmendinger, R.W., Cardozo, N.C., Fisher, D., 2013. *Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors*. Cambridge University Press, Cambridge, England 289 p.
- Alvaro, M., Capote, R., Vegas, R., 1979. Un modelo de evolución geotectónica para la Cadena Celtibérica. *Acta Geológica Hispánica*, 14 (1): 172-177.
- Aranguren, A., Cuevas, J., Tubía, J.M., 1996. Composite magnetic fabrics from S-C mylonites. *Journal of Structural Geology*, 18: 863-869.
- Arthaud, F., Matte, P., 1975. Les décrochements tardi-hercyniens du Sud-Ouest de l'Europe. Géométrie et essai de reconstitution des conditions de la déformation. *Tectonophysics*, 25 (1): 139-171.
- Arthaud, F., Matte, P., 1977. Late Paleozoic strike-slip faulting in southern Europe and northern Africa: Result of a right-lateral shear zone between the Appalachians and the Urals. *Geological Society of America Bulletin*, 88 (9): 1305-1320.
- Biedermann, A.R., Bender Koch, C., Lorenz, W.E.A., Hirt, A.M., 2014. Low-temperature magnetic anisotropy in micas and chlorite. *Tectonophysics*, 629: 63-74.
- Braun, D., Weinberger, R., Eyal, Y., Feinstein, S., Harlavan, Y., Levi, T., 2015. Distinctive diamagnetic fabrics in dolostones evolved at fault cores, the Dead Sea Transform. *Journal of Structural Geology*, 77: 11-26.
- Calvín-Ballester, P., Casas, A., 2014. Folded Variscan thrusts in the Herrera unit of the Iberian Range (NE Spain). *Geological Society, London, Special Publications*, 394 (1): 39-52.
- Capote, R., Muñoz, J.A., Simón, J.L., Liesa, C.L., Arlegui, L.E., 2002. Alpine tectonics I: the Alpine system north of the Betic Cordillera. En: *The Geology of Spain*. (W. Gibbons, T. Moreno, Eds). The Geological Society London, 384-397.
- Cardozo, N., Allmendinger, R.W., 2013. Spherical projections with OSXStereonet: *Computers & Geosciences*, 51, 0: 193-205.
- Carls, P., 1983. La zona Asturoccidental-Leonesa en Aragón y el Macizo del Ebro como prolongación del Macizo Cantábrico. En: *Geología de España, Libro Jubilar J.M. Ríos*, (J.A. Comba, Coord.). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 11-32.
- Casas, A.M., Cortés, A.L., Gapais, D., Nalpas, T., Román-Berdiel, T., 1998. Modelización analógica de estructuras asociadas a compresión oblicua y transpresión. Ejemplos del NE peninsular. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 11 (3-4): 331-344.
- Casas, A., Marcén, M., Calvín, P., Gil, A., Román, T., Pocoví, A., 2016. Deformación varisca, tardi-varisca y alpina en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica: propuesta para diferenciación y denominación de estructuras. *Geo-Temas*, 16 (2): 495-498.
- Casas Sainz, A. M., Faccenna, C., 2001. Tertiary compressional deformation of the Iberian plate. *Terra Nova*, 13: 281-288.
- Casas-Sainz, A.M., Román-Berdiel, T., Oliva-Urcia, B., García-Lasanta, C., Villalaín, J.J., Aldega, L., Corrado, S., Caricchi, C., Invernizzi, C., Osácar, M.C., 2017. Multi-disciplinary approach to the study of fault zones at shallow depths: a case study from the Cameros-Demanda thrust (North Spain). *International Journal of Earth Sciences*, 106: 1023-1055.
- Casas-Sainz, A.M., Gil-Imaz, A., Simón, J.L., Izquierdo-Llavall, E., Aldega, L., Román-Berdiel, T., Osácar, M.C., Pueyo-Anchuela, Ó., Ansón, M., García-Lasanta, C., Corrado, S., Invernizzi, C., Caricchi, C., 2018. Strain indicators and magnetic fabric in intraplate fault zones: case study of Daroca thrust, Iberian Chain, Spain. *Tectonophysics*, 730: 29-47.
- Chadima, M., Hrouda, F., 2009. Cureval 8.0: Thermomagnetic Curve Browser for Windows. Agico, Inc.
- Chadima, M., Jelinek, V., 2009. Anisoft 4.2: Anisotropy Data Browser for Windows. Agico, Inc.
- Cortés Gracia, A.L., Casas Sainz, A.M., 1996. Deformación alpina de zócalo y cobertera en el borde N de la Cordillera Ibérica (Cubeta de Azuara-Sierra de Herrera). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 9: 51-66.
- De Vicente, G., 2004. Estructura alpina del Antepaís Ibérico. En: *Geología de España*, (J.A. Vera, Ed). SGE-IGME, Madrid, 587-634.
- De Vicente, G., Vegas, R., Muñoz-Martín, A., Van Wees, J.D., Casas-Sáinz, A., Sopeña, A., Sánchez-Moya, Y., Arche, A., López-Gómez, J., Olaiz, A., Fernández-Lozano, J., 2009. Oblique strain partitioning and transpression on an inverted rift: The Castilian Branch. *Tectonophysics*, 470: 224-242.
- De Vicente, G., Cloetingh, S.A.P.L., Van Wees, J.D., Cunha, P.P., 2011. Tectonic classification of Cenozoic Iberian foreland basins. *Tectonophysics*, 502 (1): 38-61.
- Gil Imaz, A., 1995. El dominio de esquistosidad alpina del extremo NW de la Cadena Ibérica oriental (Sierra del Moncayo-Tierra de Agreda). *Centro de Estudios Borjanos, Institución "Fernando el Católico", Colección "Monografías CEBSOR"*, 7: 114 p.
- Gil Imaz, A., Pocoví Juan, A., 1994. La esquistosidad alpina del extremo NW de la Cadena Ibérica Oriental (Sierra del Moncayo): Distribución, génesis y significado tectónico. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 7 (1-2): 91-112.
- Gozalo, R., Liñán, E., 1988. Los materiales hercínicos de la

- Cordillera Ibérica en el contexto del Macizo Ibérico. *Estudios geológicos*, 44 (5-6): 399-404.
- Guimerà, J., Mas, R., Alonso, A., 2004. Intraplate deformation in the NW Iberian Chain: Mesozoic extension and contractional inversion. *Journal of the Geological Society, London*, 161: 291-303.
- Hernández Samaniego, Aragonés Valls, E., Ramírez del Pozo, J., Aguilar Tomás, M.J., 1978. *Mapa geológico de España 1:50.000, hoja 409, Calatayud*. IGME, Madrid.
- Hirono, T., Lin, W., Yeh, E.C., Soh, W., Hashimoto, Y., Sone, H., Matsubayashi, O., Aoike, K., Ito, H., Kinoshita, M., Murayama, M., Song, S.R., Ma K-F., Hung, J-H., Wang, C-Y., Tsai, Y-B., 2006. High magnetic susceptibility of fault gouge within Taiwan Chelungpu fault: nondestructive continuous measurements of physical and chemical properties in fault rocks recovered from Hole B, TCDP. *Geophysical Research Letters*, 33 (15): 4, L15303.
- Hrouda, F., Jelinek, V., Zapletal, K., 1997. Refined technique for susceptibility resolution into ferromagnetic and paramagnetic components based on susceptibility temperature-variation measurement. *Geophysical Journal International*, 129: 715-719.
- Hnmlé, P.F., Hirt, A.M., Lowrie, W., Dietrich, D., 1989. Inverse fabric in deformed limestones of the Morcles Nappe, Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 16: 1383-1386.
- Issachar, R., Levi, T., Lyakhovskiy, V., Marco, S., Weinberger, R., 2016. Improving the method of low-temperature anisotropy of magnetic susceptibility (LT-AMS) measurements in air. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17, 7: 2940-2950.
- Jelinek, V., 1978. Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens. *Studia Geophysica et Geodetica*, 22: 50-62.
- Jelinek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79: 63-70.
- Keskineva, A., Georgiev, N., Naydenov, K., Jordanova, N., Jordanova, D., Dimowa, L., 2016. Magneto-structural and mineralogical study of tectonic gouge. *Bulgarian Geological Society, National Conference with international participation "Geosciences 2016"*, 89-90.
- Levi, T., Weinberger, R., Marco, S., 2014. Magnetic fabrics induced by dynamic faulting reveal damage zone sizes in soft rocks, Dead Sea basin. *Geophysical Journal International*, 199: 1214-1229.
- Liesa, C.L., Simón, J.L., 2009. Evolution of intraplate stress fields under multiple remote compressions: The case of the Iberian Chain (NE Spain). *Tectonophysics*, 474: 144-159.
- Lotze, F., 1929. Stratigraphie und Tektonik des Keltiberischen Grundgerbirges (Spanien). *Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen Mathematisch/Physikalischen*. I. K 1 (N. Ser), 14 (2): 1-320.
- Lüneburg, C.M., Lampert, S.A., Hermann, I., Lebit, D., Hirt, A.M., Casey, M., Lowrie, W., 1999. Magnetic anisotropy, rock fabrics and finite strain in deformed sediments of SW Sardinia (Italy). *Tectonophysics*, 307: 51-74.
- Marcén Albero, M., 2014. *Geometría y cinemática de la Falla de Río Grío*. Trabajo de Fin de Máster, Universidad de Zaragoza, 56 p.
- Marcén Albero, M., Román Berdiel, T., 2015. Geometría y cinemática de la zona de falla de Río Grío: evidencias de transpresión alpina en la Cadena Ibérica. *Geogaceta*, 79: 79-82.
- Marcén, M., Román-Berdiel, T., Casas, A., Calvín-Ballester, P., Oliva-Urcia, B., García-Lasanta, C., 2015. Kinematics of long lived faults in intraplate settings: case study of the Río Grío Fault (Iberian Range). *Geophysical Research Abstracts*, 17: EGU2015-5165.
- Marcén, M., Casas-Sainz, A., Román-Berdiel, T., Gil-Imaz, A., 2016. Deformación y fábricas magnéticas (ASM) en estructuras de desgarre: la falla de Alhama de Murcia. *Geotemas*, 16 (1): 913-916.
- Marcén, M., Casas-Sainz, A.M., Román-Berdiel, T., Griera, A., Santanach, P., Pocoví, A., Gil-Imaz, A., Aldega, L., Izquierdo-Llavall, E., 2018. Multiple movements recorded in a crustal weakness zone in N Iberia: the Vallès-Penedès Fault revisited. *Journal of Geodynamics*, 121:96-114.
- Mertainen, S., Karell, F., 2012. Paleomagnetic and AMS studies on Satulinmäki and Koijärvi fault shear zones. *Geological Survey of Finland Special Paper*, 52: 195-226.
- Moreno, E., Homberg, C., Schnyder, J., Person, A., du Peloux, A., Dock, P., 2014. Fault imprint in clay units: magnetic fabric, structural and mineralogical signature. *EGU General Assembly 2014, Geophysical Research Abstracts* 16, EGU2014-15479.
- Oliva-Urcia, B., Larrasoaña, J.C., Pueyo, E.L., Gil, A., Mata, P., Parés, J.M., Schleicher, A.M., Pueyo, Ó., 2009. Disentangling magnetic subfabrics and their link to deformation processes in cleaved sedimentary rocks from the Internal Sierras (west central Pyrenees, Spain). *Journal of Structural Geology*, 31 (2): 163-176.
- Parés, J.M., Van der Pluijm, B., Dinarés-Turell, J., 1999. Evolution of magnetic fabrics during incipient deformation of mudrocks (Pyrenees, northern Spain). *Tectonophysics*, 307: 1-14.
- Pocoví, A., Besteiro, J., Osácar, M.C., González, J., Lago, M., 1990. Análisis estructural de las mineralizaciones de baritina de la Unidad de Herrera (Cordillera Ibérica Oriental). *Geogaceta*, 8: 25-27.
- Pomella, H., 2014. Magnetic fabric of brittle fault rocks. *EGU General Assembly 2014, Geophysical Research Abstracts* 16, EGU2014-12505.
- Pueyo Anchueta, Ó., Gil Imaz, A., Pocoví Juan, A., 2010. Significance of the AMS in multilayer systems in fold and thrust belts. Example from the Eocene turbidites from Southern Pyrenees. *Geological Journal*, 45 (5-6): 544-561.
- Ramírez del Pozo, J. (1981). *Hoja 381 del Mapa Geológico de España E. 1:50.000*. IGME.
- Ritcher, C., Van der Pluijm, B.A., 1994. Separation of paramagnetic and ferrimagnetic susceptibilities using low temperature magnetic susceptibilities and comparison with high field methods. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 82:113-123.
- Román-Berdiel, T., Casas-Sainz, A.M., Oliva-Urcia, B., Calvín, P., Villalaín, J.J., 2018. On the influence of magnetic mineralogy in the tectonic interpretation of Anisotropy of Magnetic Susceptibility in cataclastic fault zones. *Geophysical Journal International*, 216: 1043-1061.
- Sanz, T., Lago, M., Gil, A., Pocoví, A., Galé, C., Ubide, T., Ramajo, J., Tierz, P., 2012. Magmatismo alcalino del Triásico Superior (Noriense) en el extremo NO de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica: Modelo de emplazamiento en relación con fallas sin-sedimentarias. *Geogaceta*, 5: 3-6.
- Sanz, T., Lago, M., Gil, A., Galé, C., Ramajo, J., Ubide, T., Pocoví, A., Tierz, P., Larrea, P., 2013. The Upper Triassic alkaline magmatism in the NW Iberian Chain (Spain). *Journal of Iberian Geology*, 39, 2: 203-222.

Solum, J.G., Van der Pluijm, B.A., 2009. Quantification of fabrics in clay gouge from the Carbonera fault, Spain and implications for fault behaviour. *Tectonophysics*, 475: 554-562.

Vernet, E., Casas-Sainz, A.M., Román-Berdiel, T., Marcén, M., Osácar, M. C., 2018. Variable magnetic fabrics under heterogeneous deformation across a shallow fault zone in the Iberian

Chain (Monroyo thrust, N Spain). *Journal of Iberian Geology*, <https://doi.org/10.1007/s41513-018-0090-2>.

MANUSCRITO RECIBIDO EL 31-8-2018

RECIBIDA LA REVISIÓN EL 9-12-2018

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL 21-1-2019