

# Acortamiento paralelo a las capas y dirección de transporte tectónico deducido a partir del análisis de la fábrica magnética (ASM) de rocas post-hercínicas del Pirineo Central, valle del río Aragón-Subordán, Pirineo Oscense

*Layer parallel shortening and tectonic transport direction inferred by the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) from Central-Pyrenees post-hercynian rocks, Aragón-Subordán valley, Pirineo Oscense.*

Ó. Pueyo <sup>(1)</sup>, A. Gil <sup>(1)</sup>, A. Pocoví <sup>(1)</sup>, T. Mochales <sup>(1)</sup>, D. Ansón <sup>(2)</sup>, P. del Río <sup>(3)</sup> y E. Pueyo <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Área de Geodinámica Interna. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza (C/ Pedro Cerbuna, nº 12. CP. 50.009. Zaragoza)

<sup>(2)</sup> Arcotecnos S.A. (Polígono Molino del Pilar, nº 15. Zaragoza).

<sup>(3)</sup> Facultad de Ciencias del Mar. Cádiz

<sup>(4)</sup> IGME. Oficina de Zaragoza.

## ABSTRACT.

*A N-S section has been studied in post-hercynian rocks of a Central Pyrenees sector in order to search for a relationship between magnetic fabric (ASM) and the regional deformation pattern. The section, which is normal to the main ESE-WNW macrostructures, comprises materials from Upper Cretaceous to Eocene (nine sites, 253 samples). Two main types of stretching lineations have been interpreted from the ASM fabrics: The first one is defined by a magnetic lineation parallel to the major structures and interpreted by layer-parallel shortening. The second one is normal to the bedding-cleavage intersection lineation and thus coincides with the regional tectonic transport direction. Both magnetic lineations fit into the bedding surface and them are not related with the regional cleavage, suggesting its early acquisition.*

**Key words:** Magnetic fabric, Central Pyrenees, deformation, stretching lineation, transport direction

*Geogaceta*, 42 (2007), 15-18  
ISSN: 0213683X

## Introducción

La fábrica magnética determinada a partir de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) es un reflejo de la orientación preferente de granos (anisotropía de forma) o redes cristalinas (anisotropía cristalina) de minerales fundamentalmente ferro y paramagnéticos. En materiales anisótropos la susceptibilidad magnética ( $k$ ) puede describirse como un tensor simétrico de segundo orden que relaciona la magnetización inducida ( $M$ ) en un espécimen de volumen estándar y el campo aplicado ( $H$ ) de baja intensidad ( $\leq 0.1$  mT);  $M = kH$ . La susceptibilidad se expresa como un elipsoide cuyos tres ejes ( $K1$ ,  $K2$  y  $K3$ ) representan las direcciones de susceptibilidad máxima, intermedia y mínima respectivamente. Para elipsoides oblatos  $K1 \geq K2 > K3$  y para elipsoides prolatos  $K1 > K2 \geq K3$ .

Una de las aplicaciones más extendidas de la técnica de la ASM es la comparación de la fábrica magnética con la tectofábrica y su significado en relación con los mecanismos de deformación. En el caso de los minerales paramagnéticos,

tales como minerales de la arcilla o micras, la anisotropía de forma de los cristales se relaciona de un modo directo con los factores responsables de su configuración espacial en la roca. De este modo, al igual que el análisis estructural, la ASM puede ser empleada para analizar distintos aspectos relacionados con la historia deformacional sufrida por las rocas (Avervuch *et al.*, 1992; Parés *et al.*, 1999)

En el presente trabajo se estudia la fábrica magnética de rocas, a lo largo de un corte N-S en el sector central del Pirineo, involucradas en distintos dominios estructurales con el fin de analizar el comportamiento de las fábricas magnéticas en relación con el patrón de deformación. La zona objeto de estudio se sitúa en el valle del río Aragón-Subordán (Pirineo de Huesca), entre la localidad de Puente la Reina de Jaca y la Selva de Oza, abarcando Sierras Interiores, Cuenca turbidítica de Jaca y borde septentrional de la Cuenca Molásica de Jaca (Puigdefabregas, 1975). Los materiales se encuentran afectados por una serie de cabalgamientos y pliegues vergentes al sur (Fig.1). En este sector la orientación

preferente de la macroestructura es N110E y la dirección de transporte tectónico es hacia el SSW (Choukroune y Seguret, 1972; Teixell, 1992). Además de las estructuras cabalgantes y pliegues asociados, desde el punto de vista de la deformación interna, este sector se encuentra afectado por una esquistosidad (esquistosidad regional de Teixell, 1992) que muestra una reducción de penetratividad hacia el S. En las unidades margosas del Eoceno es muy patente esta reducción, de modo que en las estaciones más meridionales del corte estudiado ya no hay evidencia de esquistosidad o se limita a una fisilidad apenas perceptible y sólo observable en los niveles meteorizados. El frente meridional de la esquistosidad macroscópica se sitúa entre las estaciones EC-07 y EC-09 del presente trabajo.

## Metodología

En las nuevas estaciones situadas sobre este corte (Fig. 2) se extrajeron un total de 70 muestras (cores) que representan un total de 253 especímenes. La ex-

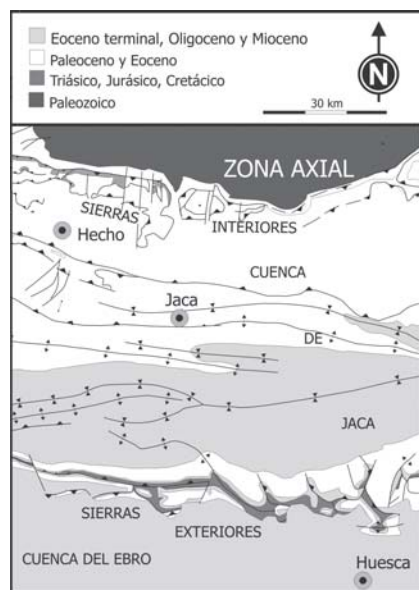


Fig. 1.- Mapa geológico del Pirineo central y localización del área estudiada (Modificado de Teixell, 1992).

Fig. 1.- Geological map from the Central Pyrenees and the studied area (Modified from Teixell, 1992).

tracción se realizó a través de una perforadora refrigerada por agua. Las medidas de la ASM se ha determinado con un susceptómetro KLY-3 (AGICO), con un campo magnético de baja intensidad ( $>300 \text{ Am}^{-1}$ ), basado en la medida de las susceptibilidades a lo largo de 15 direcciones preestablecidas (Jelinek, 1981). La media aritmética de los datos de ASM de todos los especímenes se muestran en la tabla I. La susceptibilidad magnética media de cada espécimen viene expresada por el parámetro  $K_m = (K_1 + K_2 + K_3)/3$ , donde  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  representan los ejes de susceptibilidad máxima, intermedia y mínima del elipsoide de susceptibilidad magnética. La forma de los elipsoides magnéticos se ha caracterizado mediante el parámetro  $T_j = 2(\ln K_2 - \ln K_3) / (\ln K_1 - \ln K_3) - 1$  (Jelinek 1981; Hrouda, 1982). Por último, el grado de anisotropía magnética se ha cuantificado mediante el parámetro  $P' = \exp [2(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)]^{1/2}$  donde  $a_1 = \ln(K_1 / K_b)$ , etc. y  $K_b = K_m$  (Jelinek, 1981; Hrouda, 1982).

Con el fin de analizar el patrón de relación entre la tectofábrica y la fábrica magnética en rocas con un distinto grado y estilo de deformación, involucradas en una estructura de pliegues y cabalgamientos, se ha realizado un muestreo a lo largo de una sección de N-S incluyendo distintas litologías a lo largo de distintos entornos tectónicos incluyendo las Sierras Interiores y el borde septentrional de la Cuenca de Jaca.

## Resultados

La susceptibilidad media ( $K_m$ ) de las muestras analizadas varía desde  $80 \times 10^{-6} \text{ SI}$ , en rocas pertenecientes a las Margas de Arguis, hasta  $225 \times 10^{-6} \text{ SI}$  en especímenes del flysch eoceno (Tabla I). Estos datos son similares a los obtenidos en rocas sedimentarias de este mismo entorno, caracterizadas por la presencia de fases predominantemente paramagnéticas (Pueyo Morer, 2000; Larrasoana, 2000, Oliva Urcía, 2004). Por su parte, el grado de anisotropía muestra valores promedio entre 1.02 y 1.15, ambos en muestras del flysch eoceno, con fluctuaciones notables a lo largo de la sección estudiada en función de su ubicación estructural (Fig. 2). Tal como muestra el gráfico de la figura 3, confeccionado para los tres tipos litológicos dominantes, la no relación entre grado de anisotropía  $P'$  de las muestras estudiadas y el valor del parámetro  $K_m$ , permite una interpretación semicuantitativa de la fábrica magnética. En cuanto a la forma de los elipsoides magnéticos, tal y como muestran los gráficos de anisotropía (Fig. 2), abundan las formas triaxiales ( $-0.5 \leq T_j \leq 0.5$ ) aunque con predominio de formas oblatas ( $1 \geq T_j \geq 0$ ) sobre las prolatas ( $0 \geq T_j \geq -1$ ).

El análisis direccional de la fábrica magnética se ha realizado mediante la proyección estereográfica de los ejes principales de susceptibilidad (Fig. 2). También se han representado las superficies medias de estratificación y esquistosidad medidas en afloramiento. Se incluyen también los datos de orientación de los ejes principales de susceptibilidad abatidos según la estratificación. A continuación se describen de N a S las estaciones analizadas a lo largo de la sección realizada.

La estación Sb04, situada en la unidad Margas de Zuriza (Teixell, 1992), muestra una lineación magnética contenida en la estratificación con una orientación NNE-SSW (tanto «in situ» como en su posición abatida puesto que la lineación magnética es paralela a la dirección de la capa). La estación Sb05, correspondiente a la unidad de Arenisca de Marboré (Teixell, 1992), muestra una lineación magnética próxima al plano medio de la esquistosidad y una orientación media NNE-SSO.

Las estaciones Sb06, Sb07, Sb02, Ec09 y Ec-07 se han muestreado en facies turbidíticas (flysch). Excepto la estación Sb05, la lineación magnética se encuentra contenida en el plano de estratificación. Desde el punto de vista direccional, en este grupo, se distinguen varios patrones direccionales. En el primero (estaciones Sb06, Ec09 y Ec07), la lineación muestra

una orientación media N110E que, en aquellos casos donde esta presente una esquistosidad, coincide con la lineación de intersección entre aquella y la estratificación. En el segundo grupo (Sb07 y Sb02), la lineación magnética es subperpendicular a la lineación de intersección.

Por último las estaciones Sb03 y Ec03, que se encuentran en el bloque inferior del cabalgamiento de Javierregay (Puigdefábregas, 1975) o de Jaca (Teixell, 1992), obtenidas en las unidades margosas del Eoceno (Margas de Larrés y Margas de Arguis) y situadas al S del frente de esquistosidad regional (Choukroune y Seguret, 1973), muestran una lineación magnética de orientación general E-W y paralela a las estructuras mayores de la zona.

## Interpretación estructural de la fábrica magnética

La correcta interpretación estructural de fábricas magnéticas pasa por reconocer su carácter «normal» o «inverso» (Rochette *et al.*, 1992). Este problema requiere la comparación de la fábrica magnética con indicadores estructurales (esquistosidad, dirección de pliegues y cabalgamientos, dirección de transporte tectónico, etc). Desde este punto de vista, el análisis comparativo entre los distintos patrones direccionales de las fábricas magnéticas analizadas y los elementos petro-estructurales considerados permite considerar las fábricas como normales cuando es posible establecer una compatibilidad cinemática entre la fábrica magnética y los elementos petro-estructurales: coincidencia del vector medio de los ejes  $K_3$  con el polo de la estratificación y la lineación magnética paralela bien a la dirección de las principales macroestructuras (pliegues y cabalgamientos) (estaciones EC03, SB03, EC07), de transporte tectónico (SB02, SB04) o a la lineación de intersección entre la esquistosidad y la estratificación (EC09, SB06).

A diferencia de estos casos, la fábrica magnética de las estaciones SB07 y SB05 no muestra una relación direccional inmediata con los elementos petro-estructurales. En la estación SB07, muestreada en una serie turbidítica, pueden observarse dos grupos de orientaciones diferentes para los ejes  $K_1$ . Algunos, correspondientes a especímenes calcareníticos, se concentran en una disposición subhorizontal con un azimut hacia el SW (Fig. 2). El resto, correspondientes a especímenes de niveles margosos, se encuentran contenidos en la estratificación y aparecen asociados a los ejes  $K_3$  del grupo anterior. Independientemente de las variaciones litológicas,

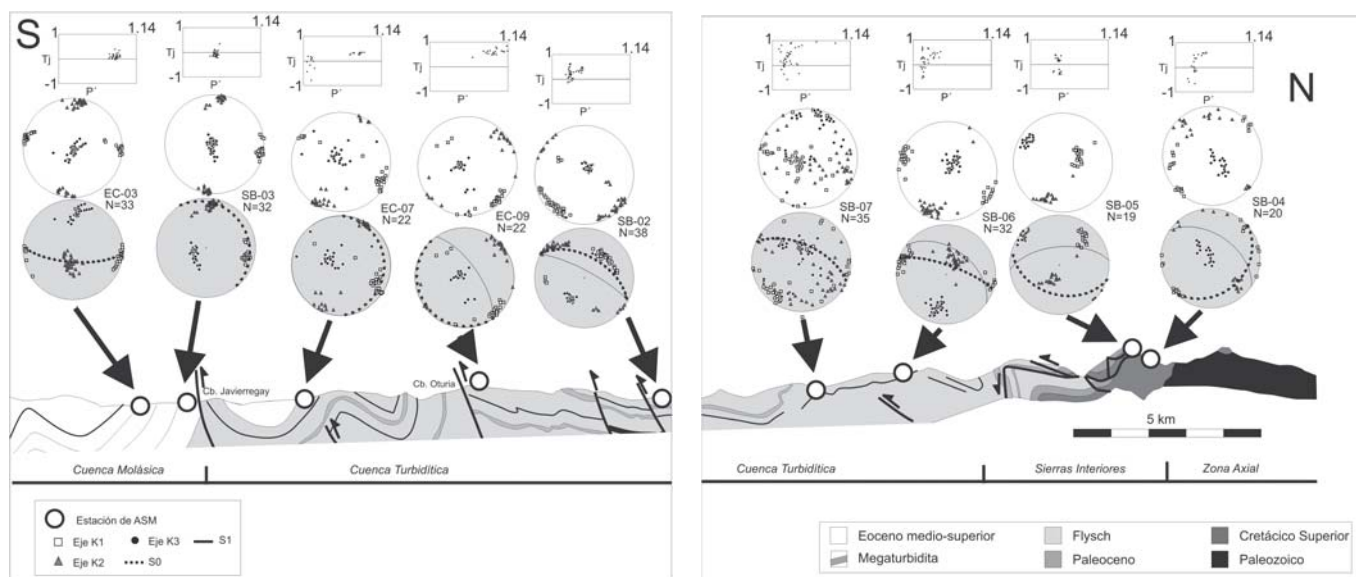


Fig. 2.- Corte N-S del borde septentrional de la Cuenca de Jaca, Sierras Interiores y borde meridional de la Zona Axial (corte basado en Teixell, 1992). Proyección estereográfica, «in situ» y abatida (estereogramas en blanco), de los datos de susceptibilidad magnética. Se incluyen los gráficos de anisotropía de las estaciones analizadas.

Fig. 2.- N-S Cross-section from the septentrional zone of the Jaca Basin, Internal Sierras and southern part of the Axial Zone (based in Teixell, 1992). Stereographic projection of «in situ» AMS data (in grey), restored AMS ellipsoid to the horizontal (in white) and anisotropy plots of the studied sites.

la falta de una compatibilidad cinemática entre la orientación de la fábrica magnética y la petrofábrica (vector medio de los ejes K3 contenidos en la estratificación y la lineación magnética sin relación geométrica con ella) y las características estructurales de este sector, sugiere un intercambio de los ejes K1 y K3, lo que le confiere el carácter de fábrica «inversa». Esto sugiere que existe un cambio del comportamiento magnético entre los niveles margosos (tramo e de la secuencia de Bouma) y los tramos calcareníticos (tramos a-d de Bouma).

Por lo que se refiere a la estación SB05, la discrepancia cinemática es aún más evidente. En este caso la foliación magnética presenta una orientación subperpendicular respecto, tanto, a la estratificación como a la esquistosidad, quedando el vector medio de los ejes K3 muy alejado de los polos de ambas superficies (Fig. 2). De nuevo el intercambio de los ejes K1 y K3 confiere a la fábrica resultante un mayor grado de coaxialidad respecto a la petrofábrica (vector medio de los ejes K3 perpendiculares a la estratificación y lineación magnética próxima a la lineación de intersección entre estratificación y esquistosidad).

**Discusión**

Del análisis comparado entre la fábrica magnética direccional y la petrofábrica, se puede asegurar que todas las estaciones muestran una fábrica magnética de carácter tectónico. La interpretación estructu-

ral de todas ellas, y su explicación cinemática, supone contemplarlas dentro del desarrollo y propagación progresivo de una gran estructura de pliegues y cabalgamientos caracterizada por una dirección de plegamiento media N110E y vergencia meridional, propia del orógeno pirenaico. En este sentido las características de las fábricas magnéticas consideradas son compatibles tanto con un acortamiento paralelo a las capas como con la dirección de transporte tectónico.

El acortamiento paralelo a las capas es un proceso frecuente en ambientes de pliegues y cabalgamientos que, en cualquier caso, pre-data a ambos tipos de estructuras. La principal característica de fábrica es el desarrollo de una lineación de estiramiento contenida en la estratificación y paralela a la dirección de estiramiento

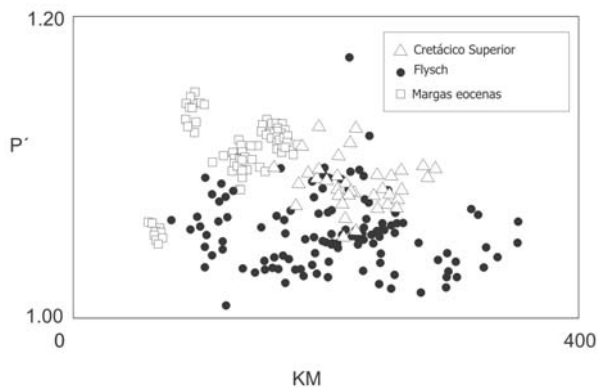
longitudinal. Este mecanismo ha sido reconocido en otros sectores del Pirineo (p.e. Larrasoña *et al.*, 2004). La presencia de fábricas magnéticas caracterizadas por mostrar una foliación magnética paralela a la estratificación y una lineación magnética subhorizontal y paralela a la macroestructura (estaciones EC03, SB03, EC07, EC09, SB06 y la fábrica inversa de la estación SB05), representan buenos ejemplos de la intervención de acortamiento paralelo a las capas en la adquisición de estas fábricas. La falta de relación entre la lineación magnética, contenida en la estratificación, y la esquistosidad asociada a los pliegues, sugiere el carácter temprano del proceso de acortamiento paralelo a las capas. Claros ejemplos representan las estaciones SB06 y SB05. El amplio desarrollo areal de este tipo de fá-

Tabla I.- Valores promedio (media aritmética) de los distintos parámetros magnéticos utilizados.

Table I.- Mean values from the different magnetic parameters used in this work.

Prof. (cm)	Laboratorio	Método	Edad (a. <sup>14</sup> C BP)	Edad calibrada (a. Cal <sup>14</sup> C BP)	
				2σ (95% prob.)	Mediana 2σ
45	Beta-141665	Convencional	330 ± 110	540-250	130
				230-130	
				115-70	
95	Beta-141666	Convencional	2.760 ± 50	2.960-2.765	2.855
				7.010-6.790	
205	Beta-145039	AMS	6.070 ± 40	8.960-8.940	6.900
270	Beta-156222	Convencional	7.820 ± 70	8.850-8.840	8.845
				8.780-8.430	
325	Beta-145040	AMS	8.010 ± 30	9.010-8.770	8.990
535	Beta-145041	AMS	9.700 ± 50	11.200-11.080	11.010
				10.940-10.870	
547	Beta-175915	AMS	10.400 ± 90	12.850-11.890	12.340
585	Beta-141667	AMS	10.650 ± 60	12.945-12.610	12.600
				12.490-12.355	
645	Beta-141668	AMS	11.420 ± 70	13.795-13.665	13.588
				13.510-13.150	
				15.115-14.760	
755	Beta-135634	AMS	12.040 ± 40	14.290-14.185	14.237
				14.150-13.830	
				20.250-19.400	
845	Beta-135633	AMS	16.630 ± 50	20.250-19.400	19.825
875	Beta-141669	AMS	17.150 ± 100	20.965-19.875	20.420





**Fig. 3.- Gráfico de susceptibilidad media (Km) frente al grado de anisotropía (P') para todos los especímenes. Se han utilizado diferentes símbolos en función de la litología.**

*Fig. 3.- Mean susceptibility (Km) versus anisotropy degree (P') graph. Different symbols have been used depending on the lithology.*

bricas sugiere un carácter marcadamente homogéneo del mecanismo de acortamiento paralelo a las capas.

La dirección de transporte tectónico materializa el desplazamiento de la cobertera, en relación a un zócalo rígido. Independientemente del modelo de deformación involucrado en tal desplazamiento (cizalla simple, plegamiento, fracturación), la característica más importante de fábrica es el desarrollo de una lineación de estiramiento paralela al vector desplazamiento. Este esquema se observa en las fábricas magnéticas de las estaciones SB02 y SB07 (considerando, en este último caso, el intercambio de ejes K1 y K3 al tratarse de una fábrica inversa). En ambos casos la lineación magnética muestra un acimut NNE, compatible con una dirección de transporte tectónico hacia el sur. Al igual que en las fábricas asociadas a acortamiento paralelo a las capas, la lineación magnética está contenida en la estratificación y es independiente de la esquistosidad; situación compatible con una adquisición temprana de esta fábrica magnética. De este modo el desarrollo de la lineación magnética paralela a la dirección de transporte tectónico e independiente de la esquistosidad, es posible asociarla a un proceso de cizalla simple, previa al plegamiento y, por tanto, al desarrollo de esquistosidad de la región. A falta de datos regionales, la presencia no uniforme de este tipo de fábrica (estaciones SB02 y SB07) sugiere un carácter marcadamente heterogéneo del mecanismo de deformación. Un modelo análogo ha sido obtenido en otros sectores de tectónica de pliegues y cabalgamientos de cobertera (Aubourg *et al.*, 1991; Pueyo *et al.*, 2004).

### Conclusiones

El estudio de la fábrica magnética en un sector de cabalgamientos, pliegues y esquistosidad permite hacer interpretaciones estructurales relativas a procesos tectónicos de desarrollo regional.

El análisis de la fábrica magnética en rocas de cobertera del Pirineo central ha

permitido reconocer dos orientaciones diferentes de la lineación magnética. La lineación magnética aparece contenida en la estratificación y presenta dos orientaciones diferentes. La primera de ellas es paralela a las estructuras tectónicas y la segunda tiene una orientación perpendicular a las estructuras, por tanto, paralela a la dirección de transporte tectónico. Ambas lineaciones son cinemáticamente compatibles con: 1) un acortamiento paralelo a las capas y 2) la dirección de transporte tectónico.

El acortamiento paralelo a las capas produce una lineación magnética subhorizontal paralela a la dirección de la macroestructura. Por su parte, la dirección de transporte tectónico se materializa en una lineación magnética contenida en la estratificación, paralela a su máxima pendiente y perpendicular al rumbo dominante de las estructuras mayores. La ausencia de relación entre esta fábrica magnética y la esquistosidad, sugiere un origen temprano asociado a cizalla simple.

La presencia de una fábrica magnética contenida en la estratificación y basculada por el plegamiento sugiere una adquisición anterior al plegamiento. Por otro lado la esquistosidad en el sector estudiado no se encuentra afectada por los pliegues por lo que se le puede considerar sin- o post-plegamiento. Esto significaría que el bloqueo de la fábrica magnética se produjo mientras las capas no se habían basculado, y por tanto el desarrollo de la esquistosidad no ha afectado significativamente a la fábrica magnética.

La relación entre la fábrica magnética y la petrofábrica (esquistosidad, estratificación) sugiere que la adquisición de ambas lineaciones se produce tempranamente y, en cualquier caso, con anterioridad al desarrollo de las principales estructuras de la zona (cabalgamientos, pliegues y esquistosidad).

### Agradecimientos

Este trabajo cumple los objetivos del curso de doctorado «La fábrica magnética y la Geología Estructural» del Departamento

de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza. Los autores quieren agradecer la colaboración de Javier Ipas, Angel Rodés y Diego Albero durante las labores de muestreo y redacción de este trabajo. Este trabajo ha sido financiado a través de una beca FPU (Ministerio de Educación y Ciencia) del primero de los autores y el Grupo de Investigación Geotransfer de la Universidad de Zaragoza.

### Referencias

- Aubourg, Ch., Rochette, P. y Vialon, P. (1991). *Tectonophysics*, 185, 211-223.
- Averbuch, O., Frizon de Lamotte, D. y Kissel, C. (1992). *Journal of Structural Geology*, 14, 461-474.
- Choukroune, P. y Seguret, M. (1973) *Carte structurale des Pyrenees*. Elf.
- Hrouda, F. (1982). *Geophysical Survey*, 5, 37-82.
- Jelinek, K. (1981) *Tectonophysics*, 79, 63-78.
- Larrasoña, J.C. (2000) *Estudio magnetotectónico de la zona de transición entre el Pirineo Central y Occidental. Implicaciones estructurales y geodinámicas*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 297 p.
- Larrasoña, J.C., Pueyo, E. L., Parés, J.M. (2004). En: *Magnetic Fabric: Methods and Applications* (F. Martín-Hernández, C. Lüneburg, C. Aubourg y M. Jackson, Eds.). Geological Society of London, Special Publications, 238, 127-145.
- Oliva Urcia, B. (2004) *Geometría y cinemática rotacional en las Sierras Interiores y Zona Axial (sector de Bielsa) a partir del análisis estructural y paleomagnético*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 292 p.
- Parés, J.M., Van der Pluijm, B.A. y Dinarens-Turell, J. (1999). *Tectonophysics*, 307, 1-14.
- Pueyo Morer, E.L., (2000) *Rotaciones paleomagnéticas en sistemas de pliegues y cabalgamientos. Tipos, causas, significado y aplicaciones*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 302 p.
- Pueyo, Ó., González, A., Ipas, J., Manuel, J., Orgaz, J.A., Rodés, A., Teixidó, F., Gil, A. y Millán, H. (2004). *Geotemas*, 6, 327-330
- Puigdefábregas, C. (1975). *Pirineos*, 104, 188p.
- Rochette, P., Jackson, M. y Aubourg, C. (1992). *Reviews of Geophysics*, 30 (3), 209-226.
- Teixell, A. (1992) *Estructura alpina en la transversal de la terminación occidental de la zona axial pirenaica*. Tesis Doctoral, Univ. de Barcelona, 252 p.