

# Pliegues magmáticos en el plutón trondhjemítico de La Fronda, Sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina.

*Magmatic folds in the La Fronda trondhjemite pluton, Sierras Pampeanas at Córdoba, Argentina.*

F.J. D'Eramo <sup>(1)</sup>, N. Vegas <sup>(2)</sup>, L.P. Pinotti <sup>(1)</sup>, J.M. Tubía <sup>(2)</sup> y J.E. Coniglio <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geología, Facultad de CEFQyNat. Universidad Nacional de Río Cuarto (5800), a.p. 3, Río Cuarto, Argentina. CONICET

<sup>(2)</sup> Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad del País Vasco, a. p. 644, Bilbao 48080.

Fernando J. D'Eramo: fjderamo@exa.unrc.edu.ar

Néstor Vegas: gobvetun@lg.ehu.es

Lucio P. Pinotti: lpinotti@exa.unrc.edu.ar

José María Tubía: jm.tubia@ehu.es

Jorge E. Coniglio: jconiglio@exa.unrc.edu.ar

## ABSTRACT

*From structural and magnetic fabric patterns, this work reports a complex folded structure in the La Fronda pluton, a small trondhjemite massif located in the Sierras de Córdoba which form the eastern part of the Sierras Pampeanas in Argentina. Isoclinal folds with no thickening at the hinge zones deform the compositional banding of these igneous rocks. Both the orientation of axial surfaces and fold axes vary from place to place and do not concur with the orientation of folds from the metamorphic country rocks. Microstructural data point to a fabric formed by grain-supported flow in a crystal-rich magma during the imprint of a vanishing regional stress field.*

**Key words:** Sierras Pampeanas, magmatic folds, magnetic fabric, trondhjemite.

*Geogaceta*, 39 (2006), 15-18

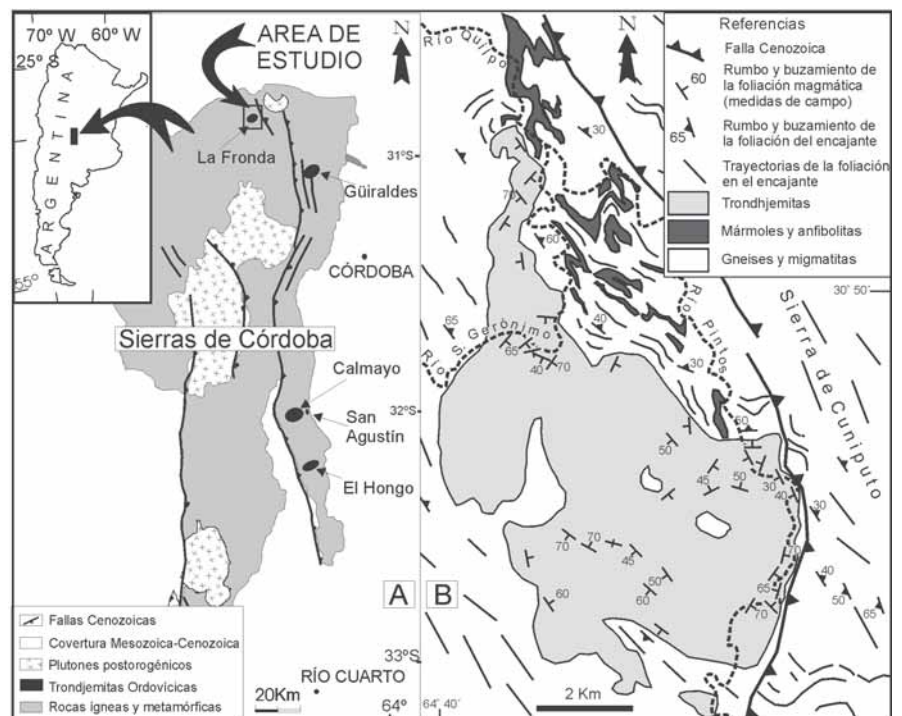
ISSN: 0213683X

## Introducción

El plutón de La Fronda forma parte de un conjunto de macizos trondhjemíticos emplazados en las Sierras Pampeanas de Córdoba (Fig. 1A) a comienzos de la orogenia Famatiniana, hace unos 500 Ma (Caffé y Baldo, 1994; Rapela *et al.*, 1998; Pankhurst *et al.*, 2000; D'Eramo, 2003). Este plutón se caracteriza por poseer estructuras internas inhabituales en rocas graníticas, entre las que destacan numerosos pliegues observables en excelentes afloramientos. Mediante la combinación de datos estructurales de campo, microestructurales y del estudio de la fábrica magnética de los granitos, se propone que los pliegues postdatan al bandeado composicional que se aprecia en el plutón, pero que su formación tuvo lugar en condiciones magmáticas cuando aún no había concluido la cristalización del plutón.

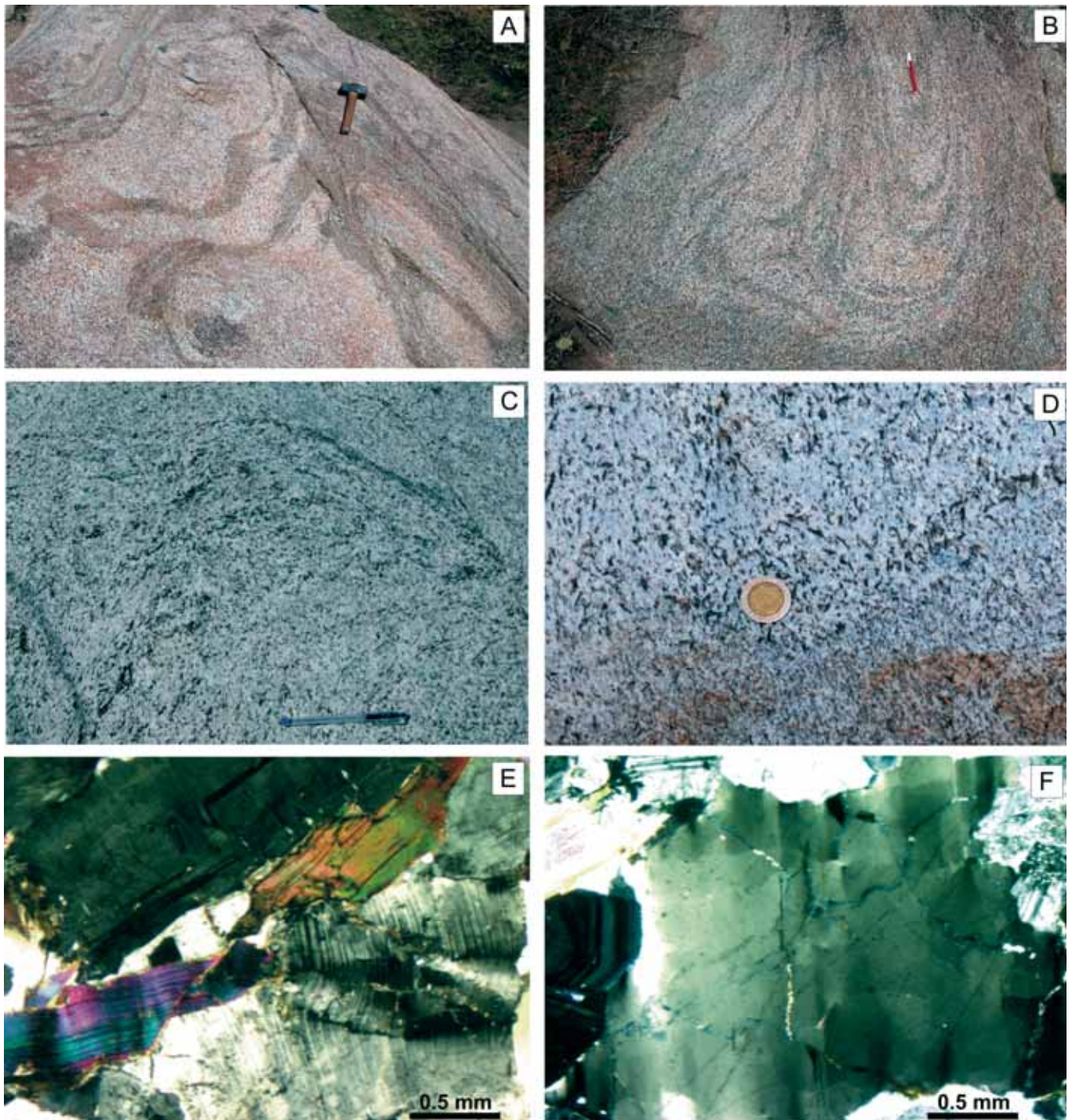
## Características estructurales

El plutón de La Fronda es un cuerpo alargado, de 11 km de largo y de 1 a 6 de ancho, intruido en migmatitas, gneises, anfíbolitas y mármoles que presentan una foliación penetrativa de



**Fig. 1. A:** Localización del área de estudio dentro de las Sierras de Córdoba. Distribución del magmatismo trondhjemítico Famatiniano. **B:** Mapa geológico del plutón de La Fronda, con los datos de campo de las foliaciones.

*Fig. 1. A:* Location of the studied area within the Sierras Pampeanas de Córdoba showing the distribution of the Famatinian trondhjemitic magmatism. *B:* Geological map of the La Fronda pluton showing the foliations.



**Fig.2.- A-D:** Fotografías de estructuras observadas en afloramientos del plutón de La Fronda A y B: Pliegues complejos que afectan a un bandeo composicional. C: Bandeado afectado por pliegues superpuestos del tipo 3 de Ramsay (1976). D: Bandeado (paralelo al eje mayor de la fotografía) y foliación perpendicular al mismo. E y F: Microfotografías de láminas delgadas donde se observan kink bands en biotita, maclas curvadas y kink bands en plagioclasa (E), y subgranos de cuarzo en damero (F).

*Fig. 2. A-D : Field photographs of the La Fronda pluton. A and B : Complex folding of the compositional layering. C: Type 3 folds interference pattern outlined by the layering. E and F: Microphotographs of high-temperature microstructures with kinked biotite and bent and kinked plagioclase (E), and chessboard-like pattern in quartz (F).*

dirección dominante NW-SE y buzamiento al NE (Fig. 1B). La facies principal del plutón está formada por trondhjemitas de grano grueso, compuestas en más de un 90 % por cuarzo y plagioclasa ( $An_{16-35}$ ), con microclina,

moscovita y biotita en menor proporción, y apatito, circón e ilmenita como minerales accesorios. En muchos afloramientos se reconoce un bandeo composicional, determinado por la alternancia de la facies principal con ni-

veles delgados, de espesor milimétrico a centimétrico, enriquecidos en micas y con menor tamaño de grano. Además, existen numerosos diques monzograníticos, segregados micáceos y xenolitos del encajante.

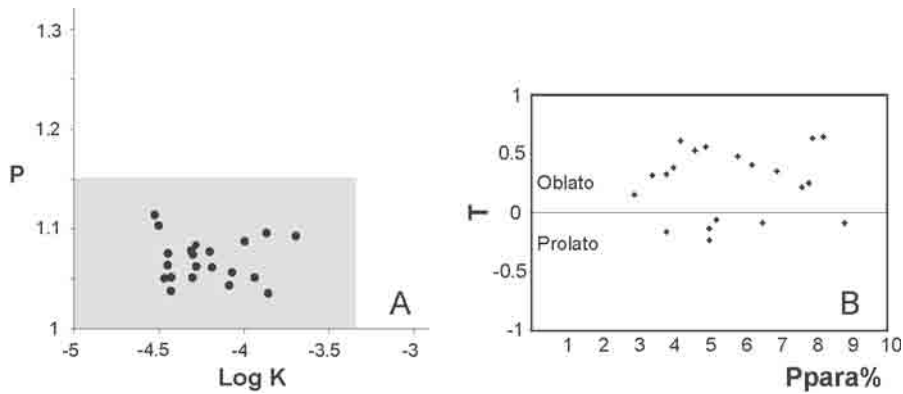


Fig.3. A: Diagrama del parámetro P frente al logaritmo de K; el campo gris enmarca a los granitos paramagnéticos con microestructuras magmáticas según Bouchez (1997). B: Gráfica de T (el parámetro de forma de Jelinek, 1981) frente al valor de la anisotropía total Ppara%.

Fig.3. A: *P versus log of K plot, the grey rectangle is the domain of strain-free paramagnetic granites based on Bouchez (1997)* B: *T (shape parameter of Jelinek, 1981) versus Ppara%.*

En gran parte de los afloramientos se aprecia claramente una foliación, reconocible esencialmente por la orientación paralela de cristales de moscovita. Habitualmente la foliación y el bandeo composicional son concordantes, pero en varios sectores se aprecia una oblicuidad notoria, e incluso perpendicularidad, entre esas dos estructuras planares. Estos sectores anómalos están relacionados invariablemente con la presencia de pliegues de dimensiones, morfologías y orientaciones sumamente variables (Fig. 2 A-D). La mayoría de los pliegues son isoclinales y carecen de engrosamiento en la zona de charnela. En ocasiones se aprecian figuras de pliegues superpuestos del tipo 3 de Ramsay (1976) (Fig. 2 C). Las zonas de charnela permiten distinguir dos grupos de cristales de mica: el primero está integrado por cristales en los que se llegan a reconocer kink bands a simple vista y que dibujan el bandeo composicional, mientras que el segundo corresponde a cristales euhédricos que definen una foliación de plano axial de los pliegues (Fig. 2 D).

Las evidencias microestructurales de deformación en estado sólido son patentes en todo el macizo. No obstante, las placas de mica que definen la foliación coexisten con agregados policristalinos de cuarzo que conservan formas equiaxiales, lo que sugiere que se trata de una deformación en condiciones subsolidus, previa a la cristalización completa del magma. La presencia de mirmequitas, maclas curvadas y maclas mecánicas en plagioclasa o de agregados de cuarzo con subestructura en damero (Fig. 2 E-F), avalan que la deformación se produjo en condiciones de alta temperatura.

### Fábrica magnética

Los datos sobre la fábrica magnética del plutón de La Fronza proceden del estudio de 84 muestras orientadas correspondientes a 21 estaciones de muestreo. Las medidas se han realizado en un susceptómetro Kappabridge KLY-2, que trabaja en campo magnético débil, con una intensidad de  $4 \times 10^{-4}$  T y una frecuencia de 920 Hz. Los valores de susceptibilidad magnética ( $K$ ) obtenidos oscilan entre  $30 \mu\text{SI}$  y  $200 \mu\text{SI}$ . Estos valores de  $K$  son característicos de granitos

cuya fábrica magnética está controlada por minerales paramagnéticos (Bouchez, 1997). Como se observa en la figura 3A, que representa la variación de  $K$  en función de la anisotropía de la susceptibilidad magnética,  $P$ , todas las muestras quedan dentro del campo correspondiente a los granitos paramagnéticos y que conservan estructuras de origen magmático. Los bajos valores de  $P$  y su escasa variabilidad demuestran que la influencia de deformaciones en estado sólido es débil. A partir de la gráfica de  $T$  (el parámetro de forma de Jelinek, 1981) frente al valor de la anisotropía total  $P_{\text{para}}\%$  (Fig. 3B) se ilustra el predominio de las fábricas planares y de elipsoide oblatos.

Tanto la foliación como la lineación magnética proporcionan orientaciones dispersas, casi al azar (Fig. 4 A y B), lo que concuerda con las medidas de la foliación apreciable en el campo (Compárense las Figs. 1B y 4A). La foliación magnética es paralela a la foliación de plano axial de los pliegues, como se comprueba en muestras procedentes de zonas de charnela, donde la foliación y el bandeo composicional se diferencian bien. Esto es debido a que la fábrica magnética del plutón de La Fronza está controlada por la orientación de las micas, cuya anisotropía magnetocristalina es de tipo planar y coincide con el clivaje (001) de este mineral (Tarling y Hrouda, 1993).

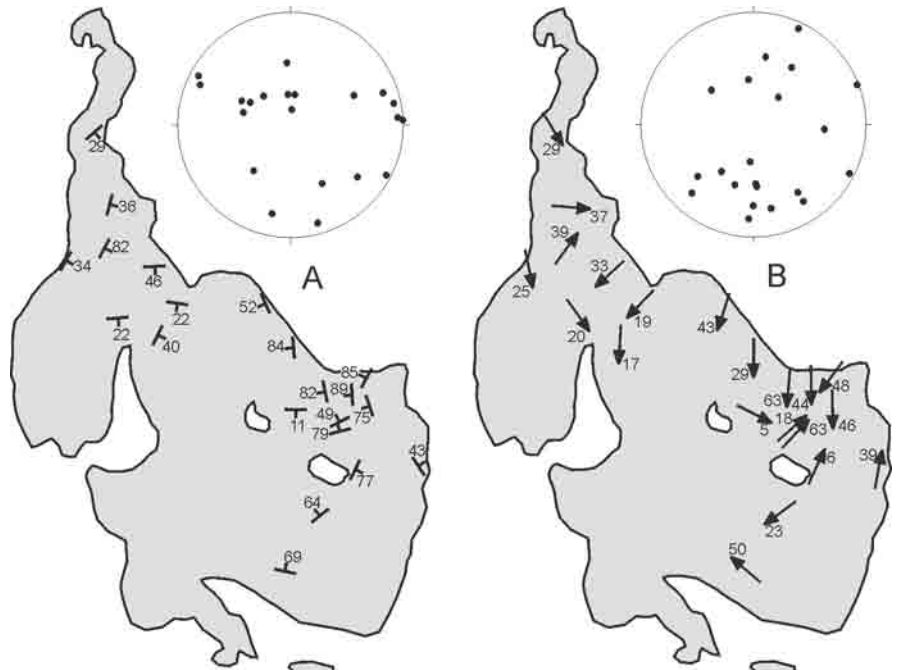


Fig.4. Fábrica magnética del plutón de La Fronza. A: Mapa y diagrama estereográfico de las foliaciones magnéticas. B: Mapa y diagrama estereográfico de las lineaciones magnéticas.

Fig.4. *Magnetic fabric in the La Fronza pluton. A: Map and stereonet of magnetic foliation. B: Map and stereonet of magnetic lineation.*

## Discusión y conclusiones

La estructura interna del plutón de La Fronda permite distinguir estructuras generadas en diferentes momentos del proceso de cristalización del magma. Las más antiguas corresponden al bandeo composicional y a una primera foliación paralela al bandeo, definida por cristales de mica y de plagioclasa. Estas estructuras planares han sido deformadas posteriormente por los pliegues y por la foliación de plano axial descritos. Tanto las características geométricas de los pliegues, como las microestructuras observadas (Fig. 2) o los bajos valores de la anisotropía de la susceptibilidad magnética avalan el origen magmático de los pliegues.

La presencia de pliegues de origen magmático en granitos es un hecho poco común, que ha sido citado en contadas ocasiones (Pitcher y Berger, 1972; Miller y Paterson, 1995; Benn, 2005). En cambio, el plutón de La Fronda conserva gran cantidad de pliegues. Además, la orientación caótica de los pliegues detectados dentro del plutón y su falta de concordancia con los pliegues de las rocas encajantes, sugieren que se trata de estructuras formadas por la propia dinámica del magma en el lugar de emplazamiento del plutón.

La dificultad de los sistemas magmáticos para preservar estructuras superpuestas, como es el caso de los pliegues, se atribuye a que las fábricas generadas en presencia de fundidos son débiles, y se destruyen fácilmente, durante el emplazamiento de los plutones, por procesos de flujo no uniforme (Paterson *et al.*, 1998). En consecuencia, se considera que la fábrica de las rocas ígneas tiende a registrar los últimos episodios de la cristalización del magma. En el presente caso, la conservación de bandeos

composicionales plegados apunta hacia la coexistencia de láminas de magma con diferente composición y/o grados de cristalización, capaces de fluir conjuntamente sin disgregarse. Asimismo, la superposición de estructuras magmáticas, sugiere que el primer conjunto de estructuras (bandeo más una primera foliación) se formó posiblemente durante la transición de un flujo en suspensión a otro grano-soportado, mientras que los pliegues y la foliación de plano axial se originaron cuando aún el magma no había cristalizado completamente, pero en un flujo grano-soportado. En tales condiciones los cristales pueden registrar deformaciones intracristalinas de alta temperatura como las observadas en las trondhjemitas de La Fronda.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a los aportes de los proyectos de investigación PICTO 07-11421 de la SECYT- Universidad Nacional de Río Cuarto y Agencia Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico, CGL2004-00701/BTE (Ministerio de Educación y Ciencia de España) y 9/UPV00001.310-14478/2002 (Universidad del País Vasco). F. D'Eramo agradece al CONICET, (Argentina) por el financiamiento parcial de una pasantía postdoctoral desarrollada en el Dpto. de Geodinámica de la Universidad del País Vasco.

## Referencias

Benn, K. (2005). En: *The Origin of Granites and Related Rocks. Fifth Hutton Symposium* (S. Ishihara, W.E. Stephens, S.L. Harley, M. Arima, y T. Nakajima, Eds.). The Geological Society of America, 297-307.

- Bouchez, J.L. (1997). En: *Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics. Petrology and Structural Geology*. (J.L. Bouchez, D.H.W. Hutton, y W.E. Stephens, Eds.). Kluwer, 95-112.
- Caffe, P.J. y Baldo, E.G. (1994). En: *6º Congreso Geológico Chileno*, Viña del Mar, Acta II, 972-976.
- D'Eramo, F. (2003) «*Petrología y emplazamiento de los plutones El Hongo y Calmayo, y su relación con la evolución de la Sierra Chica de Córdoba.*» Tesis Doctoral, Univ. Nacional de Río Cuarto, 200 p.
- Jelinek, V. (1981). *Tectonophysics*, 79, 63-70.
- Miller, R.B. y Paterson, S.R. (1995). En: *The Origin of Granites and Related Rocks. Third Hutton Symposium Abstracts* (M. Brown y M. Piccoli, Eds.) U.S. Geological Survey Circular, 1129, 111-112.
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W. y Fanning, C.M. (2000). *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91, 151-168.
- Paterson, S.R., Fowler Jr, T.K., Schmidt, K.L., Yoshinobu, A.S., Yuan, E.S. y Miller R.B. (1998). *Lithos* 44, 53-82.
- Pitcher, W.S. y Berger, A.R. (1972). *The Geology of Donegal: A Study of Granite Emplacement and Unroofing*. Wiley, 435 p.
- Ramsay, J.G. (1967). *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill Book Company, 338 p.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Casquet, C., Baldo, E., Saavedra, J., Galindo, C., Fanning, C.M., 1998. *Geological Society, London, Special Publication*, 142, 181-218.
- Tarling, D.H. y Hrouda, F. (1993). *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman and Hall, 217p.