

# Estructura del plutón de La Paya (Sierra de Cachi, Argentina)

## Structure of the La Paya pluton (Sierra de Cachi, Argentina)

Néstor Vegas<sup>1</sup>, Fernando Hongn<sup>2</sup>, Aitor Aranguren<sup>1</sup> y José María Tubía<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU). Apartado 644, 48080 Bilbao, España.  
nestor.vegas@ehu.es, aitor.aranguren@ehu.es, jm.tubia@ehu.es

<sup>2</sup> Departamento Conicet-Universidad Nacional de Salta. Buenos Aires 177, 4400-Salta, Argentina. fhongn@aol.com

### ABSTRACT

The La Paya granite is located in the Sierra de Cachi (Salta, Argentina) and belongs to the Eastern Cordillera of the Andean belt. New structural and cartographic data combined with the study of the magnetic fabric of the granite indicate that: 1) the pluton is a sheeted body, about 400 metres thick, that outlines an antiformal fold, 2) its roof is coincident with a folded ductile shear zone. Moreover, field and microstructural observations point to a syn-kinematic emplacement of the pluton linked to an extensional shear zone that was folded by a subsequent compressional event.

**Key-words:** La Paya pluton, Argentina, magnetic fabric, extensional emplacement, folded granite.

### RESUMEN

El granito de La Paya se localiza en la Sierra de Cachi (Salta, Argentina), que pertenece a la Cordillera Oriental de Los Andes. Los nuevos datos estructurales y cartográficos disponibles, combinados con el estudio de la fábrica magnética del granito, ponen de manifiesto que: 1) El plutón es un cuerpo laminar, de unos 400 metros de espesor, que dibuja un pliegue antiforme, 2) su techo corresponde a una zona de cizalla dúctil plegada. Las observaciones de campo y microestructurales indican un emplazamiento sincinemático del plutón, asociado al funcionamiento de una zona de cizalla extensional que se plegó durante un episodio posterior compresivo.

**Palabras clave:** Plutón de La Paya, Argentina, fábrica magnética, emplazamiento extensional, granito plegado.

Geogaceta, 58 (2015), 99-102  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 30 de enero de 2015  
Fecha de revisión: 29 de abril de 2015  
Fecha de aceptación: 15 de mayo de 2015

## Introducción

La Sierra de Cachi, una alineación montañosa localizada en la provincia de Salta (noroeste de Argentina), se extiende aproximadamente 50 km en dirección N-S a lo largo del lado occidental de los Valles Calchaquíes. Esta sierra, que se eleva entre 2000 y 6000 m s.n.m. y es parte de la Cordillera Oriental de Los Andes, está constituida por un domo plutono-metamórfico de edad Ordovícico inferior, donde aflora extensamente el basamento pre-andino de la cordillera de Los Andes. Este basamento está formado por tres grupos litológicos principales: a) pizarras y metagrauvascas, incluidas en la Formación Puncoviscana, de edad neoproterozoica/eocámbrica (Omarini *et al.*, 1999); b) esquistos con andalucita, cordierita y sillimanita, gneises y migmatitas, que integran la Formación La Paya, y c) plutones graníticos y trondhjemiticos que intruyen en diferentes niveles dentro de la Formación La Paya (Fig. 1).

La estructura en domo de la Sierra de Cachi es debida a un proceso de inversión tectónica positiva, originado por la superposición de un evento de acortamiento sobre un episodio extensional previo generado en condiciones dúctiles. Ligado al episodio extensional hay un metamorfismo, de alta temperatura y baja presión, que alcanzó condiciones de fusión parcial e indujo el emplazamiento de plutones graníticos sincinemáticos (Hongn *et al.*, 2014). Estos autores también proponen que el evento metamórfico y plutónico se produjo durante el Ordovícico Inferior (~ 475 Ma, de acuerdo con dataciones U-Pb SHRIMP en circones de migmatitas y granitos), en una zona de retro-arco asociada a la subducción famatiniana del borde occidental de Gondwana. El evento compresivo subsiguiente desarrolló pliegues de dimensiones kilométricas, vergentes al Este y con una foliación de plano axial de dirección N-S y buzamiento al oeste. Como consecuencia del plegamiento, la zonación metamórfica apa-

rece invertida, lo que se expresa a escala regional en la ubicación de la Formación Puncoviscana por debajo de la Formación La Paya y, dentro de esta última, por el aumento del grado metamórfico hacia el oeste, disponiéndose las migmatitas y gneises que ocupan el núcleo del domo sobre los esquistos que afloran en el lado oriental del domo.

Los plutones de la Sierra de Cachi tienen formas laminares y son concordantes con la zonación metamórfica y con la foliación principal de los materiales encajantes. Este trabajo analiza la estructura del plutón de La Paya, el cuerpo granítico más oriental de la Sierra de Cachi y el que alcanzó el nivel de emplazamiento más somero. El plutón de La Paya cubre una superficie aproximada de 10 km<sup>2</sup> y presenta una forma elíptica, alargada en dirección norte-sur (Fig. 1). Tanto el contacto occidental del plutón como el oriental buzaban hacia el Oeste (Fig. 2A), lo que ha llevado a interpretar al granito de La Paya como una intrusión laminar,

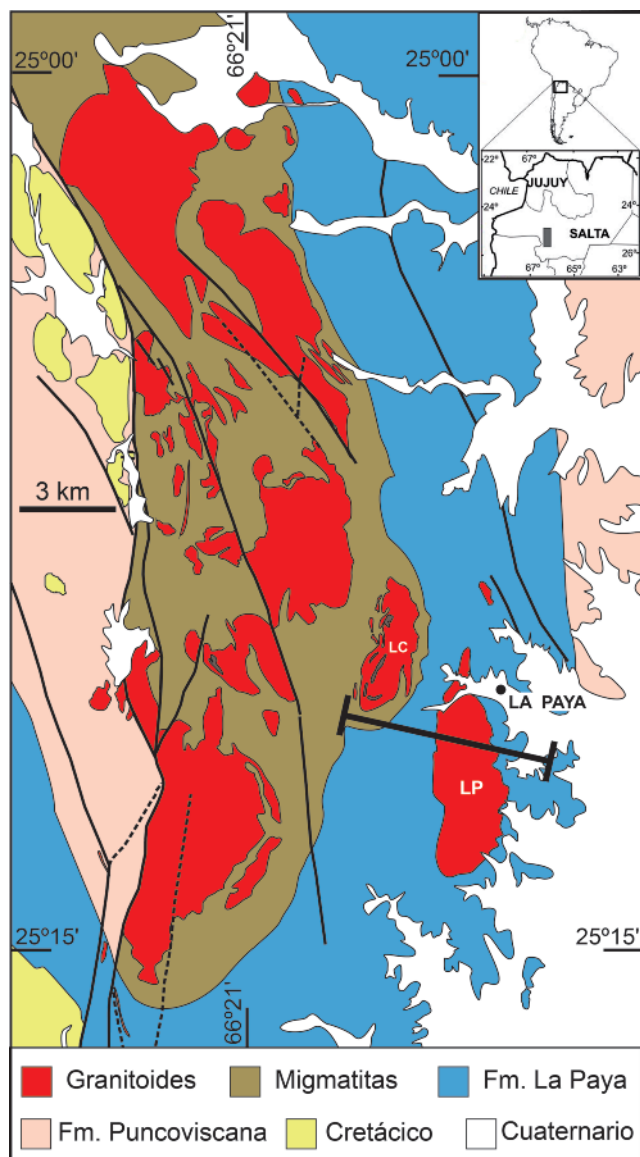


Fig. 1.- Mapa geológico simplificado del domo plutono-metamórfico de la Sierra de Cachi, con la situación del corte geológico de la figura 4 (LP: plutón de La Paya y LC: plutón de Las Cabritas).

Fig. 1.- Simplified geological map of the Sierra de Cachi dome, showing the location of the cross-section of figure 4 (LP: La Paya pluton; LC: Las Cabritas pluton).

sión alargadas formadas en torno a esos porfídoblatos. En el encajante occidental la lineación de estiramiento se hunde  $20^\circ$  a  $60^\circ$  hacia direcciones que varían entre  $N175^\circ E$  y  $N215^\circ E$ . En el encajante oriental, en cambio, la lineación de estiramiento se inclina  $35^\circ$  a  $60^\circ$  hacia  $N290^\circ-320^\circ E$ . Estas variaciones en la orientación de la lineación son debidas a la superposición del evento compresivo que produce los pliegues vergentes al Este. Los esquistos en contacto con el granito de La Paya o con los gneises y migmatitas muestran localmente estructuras S/C, con lineaciones de estiramiento asociadas con orientaciones similares a las mencionadas previamente. La asimetría de las estructuras S/C indica, *grosso modo*, un movimiento del bloque superior hacia el E, equivalente aparentemente a una cinemática inversa.

El granito presenta estructuras S/C relacionadas con el desarrollo de zonas de cizalla dúctil (Fig. 2C). Estas estructuras se agrupan en bandas de cizalla, localizadas preferentemente a lo largo de los contactos de la mitad septentrional del plutón y, en menor medida, en el interior del macizo granítico. También hay amplios sectores donde se conservan estructuras magmáticas. Las muestras procedentes de esos sectores proporcionan numerosos ejemplos de microfracturas en feldspatos que están rellenas de cuarzo, lo que indica la existencia de una deformación en condiciones submagmáticas (Bouchez *et al.*, 1992). También se aprecian granos de cuarzo con microestructuras en damero, propias de deformaciones en estado sólido a alta temperatura.

Las bandas de cizalla dúctiles en el plutón alcanzan espesores decamétricos, en contraste con las de los esquistos adyacentes que raramente alcanzan el medio metro de potencia. Al igual que en los esquistos, las estructuras S/C presentes en el granito tienen direcciones N-S y buzan hacia el oeste. Asimismo, las lineaciones de estiramiento proporcionan orientaciones similares a las reconocidas en los esquistos, y también las estructuras S/C observables a lo largo de los bordes oriental y occidental del plutón indican cinemáticas aparentemente inversas. Hay una característica cartográfica relevante para la correcta interpretación estructural del plutón de La Paya, correspondiente al hecho de que la zona de cizalla dúctil que jalona el borde occidental del granito se sigue, sin interrupción, hasta conectar con la que recorre su borde orien-

de unos 850 metros de espesor, en el seno de los esquistos de la Formación La Paya (Hongn *et al.*, 1999). Este trabajo incluye nuevos datos cartográficos, estructurales, petrográficos y sobre la fábrica magnética del plutón, que modifican la interpretación previa.

### Datos estructurales

El plutón de La Paya está formado por granitos con moscovita, biotita, oligoclasa y microclina, es de grano medio a grueso y tiene textura equigranular (Fig. 2B); localmente, contienen granate y turmalina como minerales accesorios. En su borde oriental afloran mayoritariamente esquistos de grado metamórfico medio a bajo, con biotita y andalucita, mientras que en su lado occidental contacta con esquistos de grado más alto, con cordierita. Hacia el Oeste el grado metamórfico aumenta, apareciendo

gneises y migmatitas (Fig. 1) en los que se emplaza el Plutón de Las Cabritas. No se aprecian aureolas de metamorfismo de contacto, lo que sugiere que durante el emplazamiento de los granitos no habría un gran contraste térmico con los materiales encajantes.

Los esquistos que rodean al plutón de La Paya presentan una foliación principal de dirección media N-S que buza entre  $40^\circ$  y  $70^\circ$  al oeste. La foliación principal, que envuelve íntegramente al plutón (Fig. 3), corresponde a una esquistosidad de crenulación paralela a la superficie axial de los pliegues vergentes hacia el Este. En los esquistos más cuarcíticos, donde los efectos del plegamiento son menos severos, se reconoce en el campo la foliación pre-crenulación y sobre ella se aprecia una lineación mineral de estiramiento, definida por la orientación preferente de cordierita, plagioclasa o andalucita y por las sombras de pre-



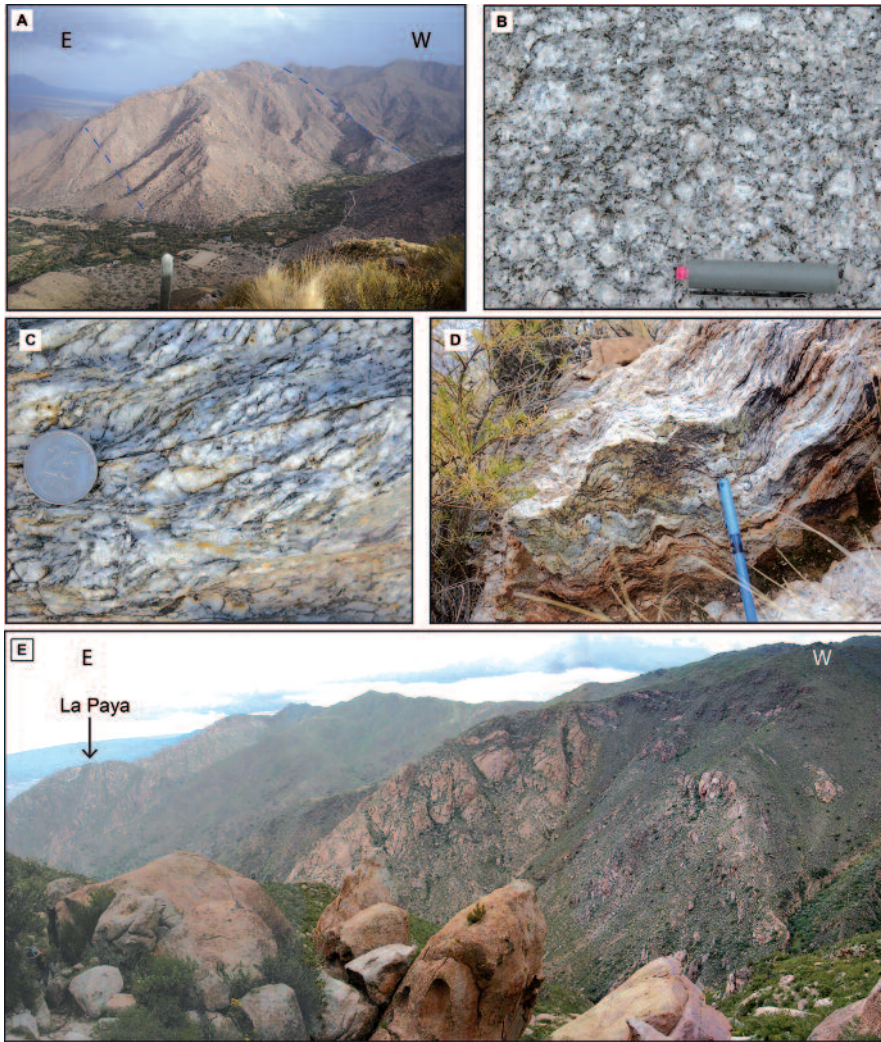


Fig. 2.- A) Vista general del plutón de La Paya mostrando la disposición de los contactos oriental y occidental. B) Textura magmática conservada en una zona no deformada. C) Aspecto de las milonitas S/C en la zona de cizalla dúctil del techo del plutón. D) Milonitas plegadas que afloran en el extremo norte del plutón de La Paya. E) Cierre perianticlinal sur del plutón de Las Cabritas. Al fondo, el plutón de La Paya.

Fig. 2.- A) General view of the La Paya pluton showing the westward dips of the eastern and western contacts. B) Equigranular texture of magmatic origin. C) S/C mylonite from the roof shear zone. D) Folded S/C mylonite from the northern tip of the La Paya pluton. E) Antiformal fold outlined by the Las Cabritas pluton. See the La Paya pluton at the background.

tal (Fig. 3A); es decir, se trata de la misma zona de cizalla dúctil, deformada por los pliegues vergentes al Este. Este hecho coincide con observaciones de afloramiento en el cierre norte del plutón, que muestran milonitas S/C crenuladas (Fig. 2D).

### La fábrica magnética del granito de La Paya

La textura equigranular del granito (Fig. 2B) dificulta el reconocimiento y medida de las estructuras magmáticas en el campo, por lo que se ha abordado su estudio mediante la técnica geofísica de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética. Esta técnica permite obtener la orientación de la fá-

brica magnética, que se expresa geométricamente como un elipsoide con valores diferentes de la susceptibilidad magnética,  $k$ , a lo largo de sus tres ejes principales ( $k_1 > k_2 > k_3$ ), siendo  $k_3$  el polo de la foliación magnética y  $k_1$  la lineación magnética (Tarlinton y Hroudá, 1993). Las medidas se han realizado en un aparato Kappabridge KLY-2. El estudio de la fábrica magnética del Plutón de La Paya está basado en la medida de 37 muestras orientadas obtenidas en 16 estaciones de sondeo, todas ellas procedentes de zonas carentes de deformación en estado sólido a simple vista. Las muestras analizadas presentan valores muy bajos de susceptibilidad magnética ( $k = 1/3 (k_1 + k_2 + k_3)$ ), que varían entre  $1,9$  y  $6,7 \times 10^{-5}$

SI. Estos valores son propios de granitos de tipo paramagnético, lo que permite correlacionar la fábrica magnética con la fábrica mineral, e indican que las micas son las principales responsables de la señal magnética del plutón (Bouchez, 1997). El parámetro de anisotropía corregido  $P_j$  (Jelinek, 1981) refleja la intensidad de la orientación preferente de los minerales magnéticos y como cabe esperar de fábricas magmáticas, estos valores son bajos y varían entre  $1,03$  y  $1,07$  (con una única estación de  $1,12$ ) y un valor medio de  $1,05$ . Los valores más altos corresponden a afloramientos en los que se detecta una deformación incipiente en estado sólido.

Las foliaciones magnéticas presentan una dirección aproximada N-S y buzan al oeste. Las trayectorias de la foliación magnética son aproximadamente paralelas al contorno del plutón (Figs. 3A y 3B). Las lineaciones magnéticas se distribuyen sobre un círculo máximo, con dos máximos bien diferenciados (Fig. 3C). El máximo en dirección SW corresponde a estaciones situadas en la mitad oeste del plutón y el máximo de dirección NW corresponde a estaciones situadas en la mitad este.

### Discusión y conclusiones

La presencia de microestructuras de deformación en estado submagmático y sólido apunta a un proceso de deformación activo durante los últimos estadios de cristalización del magma, todavía en presencia de fundidos residuales, y que prosiguió en estado sólido, en condiciones de temperaturas decrecientes. Esta evolución de la deformación y el alto grado de paralelismo entre la orientación de las fábricas magnéticas, procedentes de los sectores con estructuras de origen magmático y las de deformación en estado sólido, son coherentes con un emplazamiento del plutón sincinemático con respecto al desarrollo de las zonas de cizalla dúctil observadas en el granito y en los materiales encajantes. Los criterios cinemáticos de estas zonas de cizalla indican un movimiento inverso en su posición actual. Sin embargo, los datos aportados en este trabajo demuestran que se trata de una zona de cizalla deformada por un pliegue antiforme vergente hacia el Este (Fig. 4). Desplegando ese antiforme, se obtiene la misma orientación, NE-SW, para las lineaciones de estiramiento en los sectores oriental y occidental del plutón, y un único

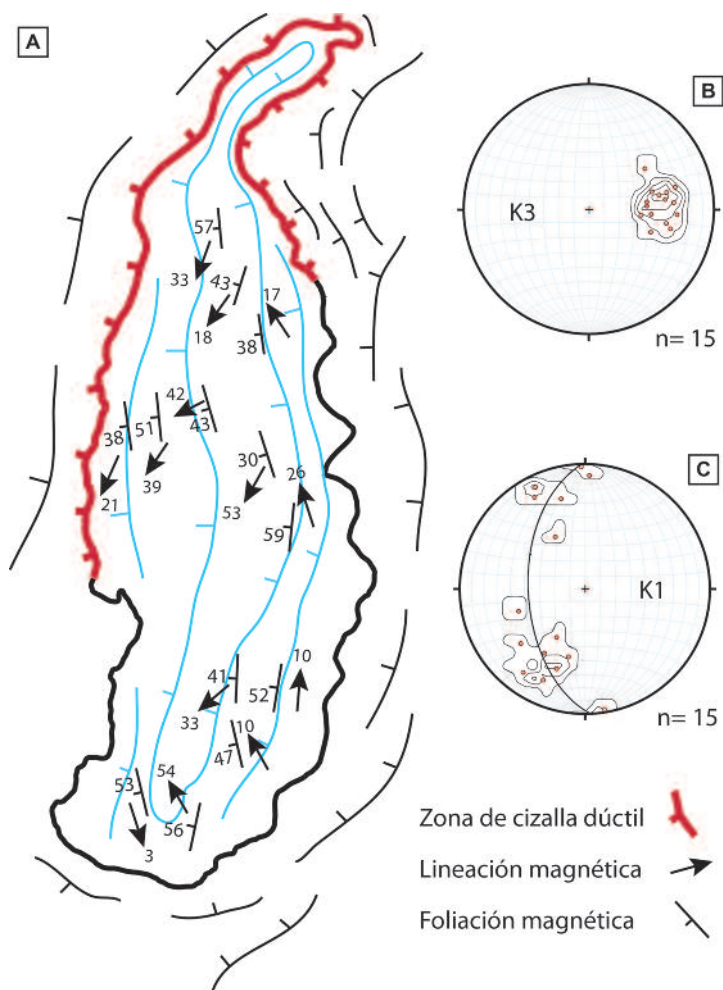


Fig. 3.- A) Mapa de foliaciones del Plutón de La Paya y su encajante. Las trayectorias de la foliación están basadas en el análisis de la fábrica magnética y en medidas realizadas sobre afloramiento. Diagramas de proyección estereográfica (hemisferio inferior) de: B) la foliación magnética (k3, polo de la foliación) y C) de la lineación magnética (k1).

Fig. 3.- A) Map of the trajectories of the foliation in the La Paya pluton and its country rocks. The map includes both, measurements of the magnetic fabrics and field measurements of foliations. The stereoplots show: B) the poles of the magnetic foliation (k3) and C) the magnetic lineation (k1).

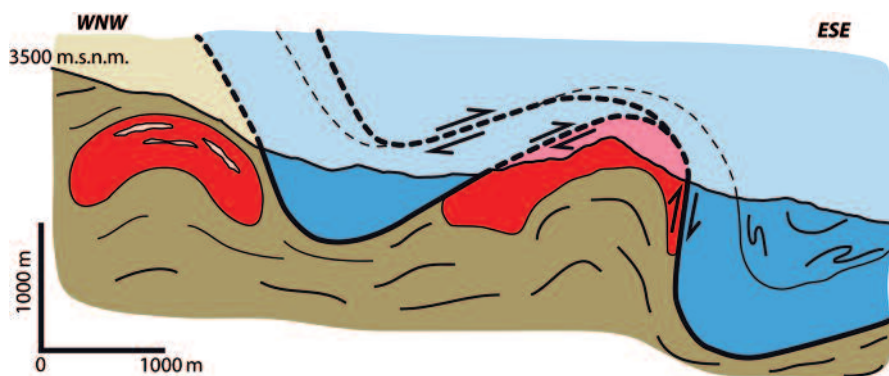


Fig. 4.- Corte geológico atravesando los plutones de La Paya y Las Cabritas (situación del corte y leyenda en la figura 1).

Fig. 4.- Cross-section from Las Cabritas to La Paya plutons (location and legend in Fig. 1).

movimiento del bloque superior hacia el NE. En consecuencia, si se restituyera el efecto de los pliegues, la zona de cizalla tendría una geometría lítrica, y el movimiento resultante correspondería al de una zona de

cizalla extensional con desplazamiento del bloque de techo hacia el NE.

Esta nueva interpretación tiene varias implicaciones: 1) el plutón de La Paya es una lámina plegada antiformalmente, cuyo

techo coincide con una zona de cizalla extensional, 2) por estar plegada, el espesor de la zona de cizalla queda reducido a unos 400 metros, en contraste con los 850 metros sugeridos en trabajos anteriores (Hongn *et al.*, 1999) y 3) la base del plutón está situada en el tramo de migmatitas de la Formación La Paya, en vez de en los esquistos; es decir, el nivel de emplazamiento del plutón es más profundo que lo propuesto previamente. Esta interpretación está avalada por observaciones realizadas en otros plutones, como el de Las Cabritas, que también está plegado (Fig. 2E). La edad de la etapa compresiva no puede fijarse con exactitud a partir de criterios de campo. Las observaciones petrográficas de láminas delgadas de las estructuras S/C, así como la paragénesis de la foliación de plano axial de los pliegues de la etapa de compresión, ponen de manifiesto que el plegamiento no produjo retrometamorfismo. Esto sugiere que la etapa de compresión ocurrió antes del enfriamiento del domo. Por ello, proponemos que la contracción final probablemente se haya producido a partir del Ordovícico superior.

**Agradecimientos**

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación a los proyectos CGL2011-23755 (MICINN, España) y PICT-FONCYT 0407 (Argentina). Agradecemos las revisiones de T. Román Berdiel, G. Gutiérrez-Alonso y C. Liesa Carrera.

**Referencias**

Bouchez, J.L. (1997). En: *Granite: From segregation of melt to emplacement fabrics* (J.L. Bouchez, D.H.W. Hutton y W.E. Stephens, Eds.). Kluwer Academic publishers, 95-112.

Bouchez, J.L., Delas, C., Gleizes, G., Nédélec, A. y Cuney, M. (1992). *Geology* 20, 35-38.

Hongn, F.D., Aranguren, A., Tubía, J.M. y Mon, R. (1999). *Acta Geologica Hispánica* 34, 301-317.

Hongn, F.D., Tubía, J.M., Esteban, J.J., Aranguren, A., Vegas, N., Sergeev, S., Larionov, A. y Basei, M. (2014). *Journal of Iberian Geology* 40, 225-240.

Jelinek, V. (1981). *Tectonophysics* 79, 63-67.

Omarini, R.H., Sureda, R.J., Götze, H. J., Seilacher, A. y Pflüger, F. (1999). *International Journal of Earth Sciences* 88, 76-97.

Tarling, D.H. y Hrouda, F. (1993). *The magnetic anisotropy of rocks*. Chapman and Hall, London, 217 p.