

## **Estructura, fábrica magnética y emplazamiento de los granitos de Brealito y La Paya, basamento del valle Calchaquí, Salta, Argentina**

### **Structure, magnetic fabric and emplacement of La Paya and Brealito granites, Calchaquí valley basement, Salta, Argentina**

F.D. HONGN<sup>(1)</sup>, A. ARANGUREN<sup>(2)</sup>, J. M. TUBÍA<sup>(2)</sup> y R. MON<sup>(3)</sup>

(1) CONICET. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Av. Buenos Aires 177,  
A-4400 Salta, Argentina. hongn@ciunsa.unsa.edu.ar

(2) Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias. Universidad del País Vasco. E-48080 Bilbao, España

(3) CONICET. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Tucumán, Miguel Lillo 205, A-4000 Tucumán, Argentina.

#### RESUMEN

Los granitoides de Brealito y La Paya son plutones de formas elípticas alargadas en dirección N-S emplazados respectivamente en las Formaciones Puncoviscana y La Paya. El estudio de la estructura interna de los plutones se ha abordado aplicando la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM). El plutón de La Paya presenta un carácter paramagnético (K entre 1,9 y 6,7 x10<sup>-5</sup> SI) con una fábrica magnética controlada por la biotita, en cambio el plutón de Brealito muestra un carácter mixto (K entre 22 y 466 x10<sup>-5</sup> SI) con algunas estaciones en las que la contribución ferromagnética (originada por magnetita) es dominante. Las anisotropías totales medidas son coherentes con el carácter magmático de las muestras analizadas. Ambos plutones presentan semejanzas desde el punto de vista estructural. Son cuerpos de forma lenticular, concordantes con el encajante y buzando hacia el Oeste. La lineación magnética presenta buzamientos suaves en dirección N-S.

*Palabras clave:* Estructura. Fábrica magnética. Emplazamiento. Granitos La Paya y Brealito. Basamento. NO Argentina.

#### ABSTRACT

The Brealito and La Paya granitoids are elliptical-shaped plutons with N-S elongation. They intrude into the Puncoviscana and La Paya Formations, respectively. The internal structure of these plutons has been studied by using field structures and applying the Anisotropy of the Magnetic Susceptibility (AMS). The magnetic fabric of the La Paya pluton reflects the orientation of biotite, the main paramagnetic mineral in this granite (K between 1.9 and 6.7 x10<sup>-5</sup> SI). Instead, the magnetic behavior of the Brealito granite is more complex since not only paramagnetic minerals, but also the ferromagnetic contribution (K between 22 and 466 x10<sup>-5</sup> SI) of magnetite

crystals strongly control the magnetic fabric of some samples. Total anisotropy values of the magnetic fabrics are coherent with the magmatic nature of the analyzed samples. From the structural point of view, both plutons display similarities. These granites are lozenge-shaped bodies concordant with the host rocks. Their planar fabrics are mainly NS-trending and West dipping, and magnetic lineations plunge at low angles along the N-S direction.

*Keywords:* Structure. Magnetic fabric. Emplacement. La Paya and Brealito granites. Basement. NW Argentina.

---

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

The Calchaquí Valley basement is constituted by metamorphites covering a wide range of lithologies, from leptometamorphites up to migmatites, and by acidic plutonic rocks (Fig. 1). The structure of this basement is scarcely known especially if the granitic rocks are considered since the only plutons whose structures were studied are those affected by a mylonitic deformation (Willner, 1990; Mon and Hongn, 1996; Hippertt and Hongn, 1998; Hongn and Becchio 1999).

Lately, the Anisotropy of Magnetic Susceptibility becomes a very useful tool for studying granite structures since it permits to know the linear and planar magmatic fabrics in apparently isotropic rocks (Bouchez, 1997).

This paper presents the first results of a project directed to search the magmatic fabric and emplacement structure of Neoproterozoic - Lower Paleozoic granites of the northwestern of Argentina by applying the Anisotropy of Magnetic Susceptibility. The first studied plutons were the La Paya and Brealito granites because they are small ones with easy access in comparison with other ones in the region.

### Geological Setting

A large part of the Calchaquí Valley basement consists of turbidites generally included in the Neoproterozoic Puncoviscana Formation (e.g., Jezek, 1990). These deposits show very low-grade metamorphism and a strong folding as a result of the Neoproterozoic-Lower Cambrian Tilcaric deformation phase (Turner and Méndez, 1975; Toselli, 1990; Mon and Hongn, 1996). A high T-low P metamorphism event superimposes on the metaturbidites and originates La Paya Formation composed of spotted slates and phyllites, schists, gneisses and migmatites (Aceñolaza et al., 1976; Toselli, 1992; Toselli and Rossi, 1990).

The plutonic basement consists of acidic rocks whose compositions vary from granites to trondhjemites. In a simplified way, these plutons can be assigned to two units: The Cachi Formation and the Complejo Eruptivo Oire. The former includes small plutons, among them the La Paya granite, whose compositions correspond to trondhjemites, tonalites and granites. The age of the Cachi Formation is a matter of controversy because several plutons have been dated by different methods and the obtained ages vary from 540 to 460 Ma (Galliski et al., 1990; Toselli, 1992; Lork y Balhburg, 1993). On the other hand, the Complejo Eruptivo Oire (CEO) is made up of coarse-grained porphyritic granitoids with Ordovician ages; the Brealito pluton has a U-Pb age of 472 Ma (Lork and Bahlburg, 1993) and is part of the CEO.

### Structure

The structure, magnetic fabric and emplacement of La Paya and Brealito granites were studied by using field structures and applying the Anisotropy of the Magnetic Susceptibility.

#### *La Paya granite*

La Paya pluton is a medium to coarse-grained granite made up of quartz, microcline, plagioclase (Ab26), muscovite, tourmaline and scarce biotite; garnet is also present (Toselli, 1992). It is a lozenge-shaped pluton concordant with the host

rock with a large/width relation up 2.5 and covers an area nearly 10 km<sup>2</sup>. There is no radiometric age on La Paya itself; zircons from a large xenolith exhibit diffusion in the U-Pb system at 527 Ma (Lork et al., 1990) and this value indicates the age of intrusion according to Toselli (1992).

Host rock shows the superimposition of two deformation events. The former produces a strong folding and the latter originates asymmetric folds and mylonitic zones overprinted on the previous structures. Host rock develops a well-defined foliation that strikes north and dips west (Figs. 2 and 3) as a result of this second deformation event. A stretching lineation generally defined by stretched spots and disposed principally subparallel to the foliation dipping appears on this foliation plane.

The different metamorphic facies included in La Paya Formation are interpreted as a reversed metamorphism on basis to their disposition. So, the lower metamorphic grade lithologies crop out in a lower topographic position than the higher-grade lithologies do. The overturned metamorphism is related to the inverted limb of a synform whose hinge line is toward east of La Paya granite under Quaternary sediments of the Calchaquí Valley. La Paya and Las Cabritas granites are located in the more deformed limb (Figs. 1 and 6) of the synform.

Both host rocks and granitic rocks show ductile shear zones also related to the later deformation although the granitic ones present the better-preserved structures. Shear zones strike N-S and dip nearly 50° W. A strike-slip movement is indicated by a well-defined stretching lineation dipping nearly 10° South. Shear sense indicators are usual as in outcrop as microscope scales especially in the granitic rocks. S-C foliations, mica fishes and quartz shape-grain fabrics are the better-developed structures (Fig. 3). They are all coherent indicators and register the west block moves toward north generally with an inverse component. Conditions of the mylonitic deformation belong to medium-low grade metamorphism.

La Paya pluton is a low magnetic susceptibility granite. K values vary from 1.9 to 6.7 x10<sup>-5</sup> SI, which are in accordance with the magnetic mineralogy. Directional magnetic fabrics show an N-S striking magnetic foliation and a magnetic lineation plunging at low angle in north-south direction (Fig. 2). The scalar fabric parameters indicate the magnetic ellipsoid is related to magmatic fabric. At a glance, a good concordance between magmatic and solid-state deformation fabrics suggests a syntectonic emplacement for La Paya pluton but a more detailed analysis detects an obliquity between deformation and magmatic fabrics and different ages can be assumed for emplacement and mylonitic deformation.

### *Brealito granite*

The Brealito granite (Figs. 1 and 4) is a small body connected to the big Ordovician magmatic event represented by the Complejo Eruptivo Oire. Brealito granite is one of the easternmost plutons included in the CEO. It is a coarse grained porphyritic monzogranite composed of quartz, oligoclase (Ab28) and microcline phenocrysts up to 10 cm long. In spite of having a part of its borders covered by younger sedimentary rocks, the Brealito granite displays an elliptical form with an aspect ratio less than 2 and an exposed area of nearly 25 km<sup>2</sup>. Its age is 472 Ma (U/Pb on monazite, Lork and Bahlburg, 1993)

The host rocks are metaturbidites locally transformed into spotted slates and phyllites. The granite produces a contact metamorphism aureole approximately 500 m wide indicated by the presence of very little mica spots.

The host rock exhibits a strong folding of Neoproterozoic-Lower Cambrian age (Tilcaric deformation phase). Folds strike approximately north south and hinge line plunge is variable although high plunge is more usual (Fig. 5).

A later deformation takes place at approximately 470 Ma, which controls the emplacement of Brealito granite. Both granite and host rock display shear zones (Fig. 4) as a result of the Ordovician deformation. Shear zones strike N-NW and dip nearly 70°-80° W-SW (Figs. 4 and 5). Mylonitic deformation evolves from high temperature to low temperature. Intracrystalline fractures filled mainly by quartz and partially by feldspars, mosaic microstructure in quartz and undulate ex-

tion in feldspars record the high T deformation (Mainprice et al., 1985; Gapais and Barbarin, 1986; Aranguren and Tubia, 1992; Bouchez et al., 1997). High T microstructures appear in the matrix of the granite or as a relict fabric in the low T mylonites. They form at subsolidus stage and during the first stages of granite crystallization. Low T mylonites display quartz deformed by basal slip, well-defined grain-shape fabrics in quartz and an advanced transformation of feldspars into very fine micas (Hongn and Becchio, 1999). Shear sense indicators suggest the W-SW block move up with a minor strike-slip dextral component (Hongn and Becchio, 1999).

The magnetic behavior of the Brealito granite is more complex than the La Paya granite is. K varies from 22 to 466  $\times 10^5$ SI indicating not only paramagnetic mineralogy but also a ferromagnetic contribution related to the presence of magnetite. The scalar fabric parameters indicate a good correlation between magnetic ellipsoid and magmatic fabrics. The highest values of K and P are related to the magnetite contribution and not to solid-state deformation. Magnetic foliation is N-S striking with moderate to high west dipping in both west and east granite borders. In a general sense, foliation shows a concentric distribution. Magnetic lineation plunges in N-NW direction (Fig. 4).

## Discussion

Analyses of primary and secondary fabrics of La Paya and Brealito granites, and of its host rocks, indicate that these plutons are elongated in North-South direction and West dipping. Although La Paya granite exhibits a more planar geometry suggesting an emplacement controlled by deformation, the Brealito pluton contains the better-defined microstructural indicating its syntectonic nature. In fact, microstructures formed at subsolidus and high T conditions are registered only in Brealito granite.

It is difficult to interpret structural data in a regional emplacement model due to the scarce information available about ages of plutonic, metamorphic and deformative events. The syntectonic nature of Brealito pluton and its age (472 Ma, Lork and Bahlburg, 1993) are the most reliable data, from which it is possible to set the age of the deformation that controls the granite emplacement. About the ages of La Paya granite and its mylonites, they may be, i) both granite and deformation are Ordovician (ca 470Ma), ii) the granite is older (ca 527 Ma, Toselli, 1992) than mylonites (ca 470 Ma), and iii) pluton and deformation are old (ca 527 Ma).

La Paya granite is considered older than Brealito one (an Ordovician age for the mylonitic deformation affecting both) is due to the following facts: a) there is no apparent tectonic control on La Paya granite emplacement, b) the available age of La Paya pluton is 527 Ma, c) there are similarities between the moderate-low T deformation zones affecting both La Paya and Brealito granites, and d) the scalar magnetic fabric differences showed by the granites -one paramagnetic and the other partially ferromagnetic- suggest compositional differences and therefore different sources. Then, a high T-low P metamorphism takes place at nearly 520 Ma transforming the metaturbidites of the Puncoviscana Formation into spotted slates and phyllites, schists, gneisses and migmatites of the La Paya Formation. Acidic plutons intruding the metamorphites are related to the same event. Plutons exhibit a laccolithic geometry and intrude into lithological discontinuities at different crust levels. La Paya and Las Cabritas plutons intrude the transition zone between phyllites and schists while Vallecito and El Alto plutons locate in gneisses and migmatites at deeper levels.

Magmatic, metamorphic and tectonic processes of regional distribution occur at Low Ordovician, as a result of a dytrophic phase whose record in the Low Paleozoic sedimentary cover was described by Salfity et al. (1984).

Folding of the La Paya Formation together with laccolithes and the inversion of the metamorphic lithologies, development of shear zones and emplacement of granites, for instance Brealito granite, are related to this regional event. Brealito granite emplacement is controlled by shear zones and microstructures formed at subsolidus and high T temperature conditions appear in consequence of this dynamic intrusion. Low T mylonitic deformation occurs when the granite is cooler and affects both granite and host rock.

This preliminary model must be controlled by new studies since it includes some controversial data, e.g. the age of La Paya granite. Out of this controversial information and as main conclusions of this paper, we may assume that:

- The Brealito and La Paya granites are elliptical-shaped plutons elongated in N-S direction and west dipping.
- La Paya granite is a paramagnetic pluton and Brealito granite exhibits a more complex magnetic behavior due to a ferromagnetic contribution related to magnetite.
- Shear zones control Brealito granite emplacement.
- There is no strong tectonic control on the La Paya granite intrusion. It seems to be a laccolithe. This interpretation could be extended to other plutons of the Calchaquí Valley basement since there are several granites with elliptical forms intruded in metamorphic transitions like those observed in La Paya area.

## INTRODUCCIÓN

El basamento del margen oriental de los Valles Calchaquíes, entre el río Calchaquí y el borde oriental de la Puna austral, está constituido por un conjunto ígneo - metamórfico que muestra una amplia variedad litológica, ya que incluye rocas metamórficas paraderivadas que varían desde pizarras a migmatitas y toda la “suite” de intrusivos ácidos (Toselli, 1992; Toselli y Rossi, 1990).

Los aspectos estructurales de este basamento son escasamente conocidos, y proceden mayoritariamente de trabajos que analizan la estructura de las metamorfitas (Willner, 1990; Mon y Hongn, 1996). La investigación sobre estructuras en granitos está limitada a las fajas miloníticas que contienen los granitoides de la región (Hippert y Hongn, 1998; Hongn y Becchio, 1999).

A los métodos clásicos para investigar la estructura de granitos, en los últimos años se ha agregado la técnica de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) que permite conocer la lineación y foliación magmática a través de la fábrica magnética (Guillet et al., 1983). Dado que con ASM es posible determinar foliación y lineación magmáticas en rocas sin anisotropías apreciables a simple vista, la aplicación de esta técnica se ha convertido en una herramienta de amplio uso entre los estudiosos de la estructura de granitos (Bouchez, 1997).

Este trabajo presenta los resultados iniciales de un proyecto destinado a estudiar la fábrica magmática y los mecanismos de emplazamiento de granitos del basamento del noroeste de Argentina aplicando ASM. Los primeros estudios se llevaron a cabo en los granitos de Brealito y La Paya, que se eligieron porque son cuerpos pequeños y de fácil acceso en comparación con otros intrusivos de la región. Además de los aspectos estructurales de los granitos, también se presentan nuevos datos e interpretaciones sobre la estructura del basamento de los Valles Calchaquíes.

## MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El basamento que constituye las elevaciones que separan las depresiones Calchaquí y de Luracatao entre 25° y 25°30' está constituido por metamorfitas de diferentes grados e intrusivos ácidos (Fig. 1).

Una sucesión de turbiditas con metamorfismo débil generalmente atribuida a la Formación Puncoviscana (Jezek, 1990) constituye gran parte del basamento metamórfico. Las metaturbiditas registran una deformación intensa representada por un plegamiento apretado de rumbo N-S y ejes con buzamiento variable, generalmente alto. A esta deformación se le asigna una edad neoproterozoico-eocámbrica de acuerdo con criterios brindados por la geología regional (Mon y Hongn, 1996), y corresponde a la Fase Tilcárica (Turner y Méndez, 1975) con la que termina el Ciclo Pampeano (Aceñolaza y Toselli, 1976) o Panamericano (Harrington, 1975). Durante la deformación Tilcárica las turbiditas alcanzan modificaciones metamórficas de muy bajo a bajo grado, facies esquistos verdes (Toselli, 1990).

Las metaturbiditas muestran un metamorfismo superpuesto progresivo que genera una zonación litológica representada por pizarras y filitas nodulosas, esquistos, gneises y migmatitas (Galliski, 1983; Toselli, 1992). Aceñolaza et al. (1976) denominan Formación La Paya a este conjunto de rocas originadas por un metamorfismo de presión baja a intermedia y temperatura alta (Toselli y Rossi, 1990), características físicas que sustentan la propuesta de Toselli (1990) sobre domos térmicos con los que se vincularía también parte del magmatismo del basamento.

Los intrusivos del basamento de los Valles Calchaquíes han sido separados en dos unidades. Por un lado hay plutones graníticos asociados al Complejo Eruptivo Oire (Hongn y Seggiaro, 1998). Estos granitos son de grano grueso, contienen biotita, moscovita y generalmente fenocristales de feldespatos potásicos de hasta 10 cm de lon-

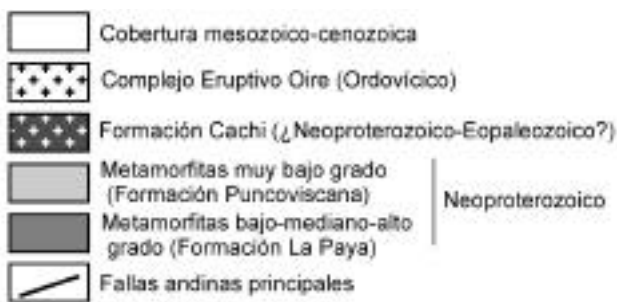
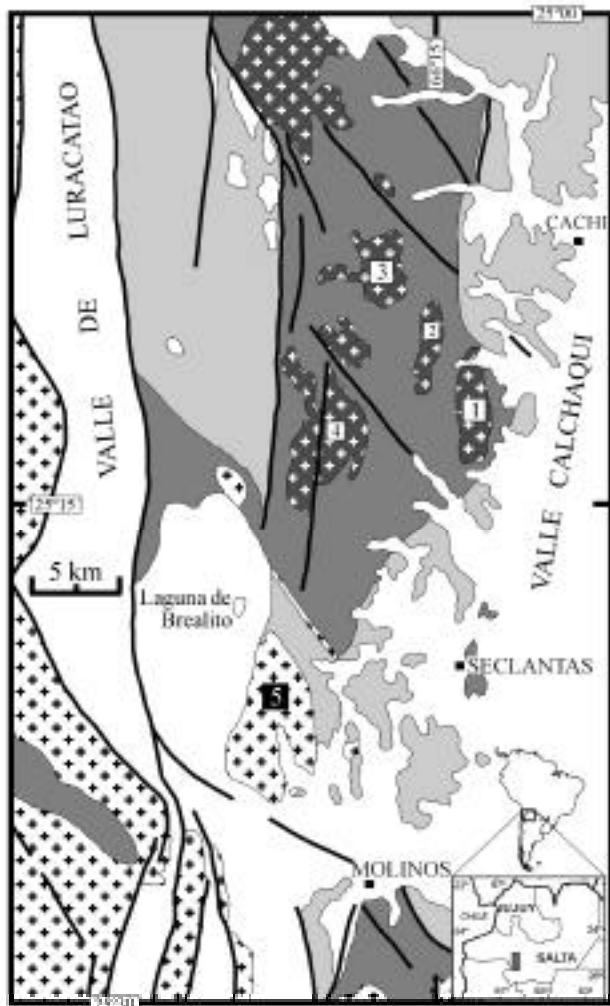


Figura 1. Mapa regional con principales unidades del basamento del Valle Calchaquí entre 25° y 25°30'LS. Los números identifican los plutones mencionados en el texto: 1- La Paya; 2- Las Cabritas; 3- El Alto; 4- Vallecito; 5- Brealito.

Figure 1. Regional map showing the main units of Calchaquí Valley basement between 25° and 25°30'SL. Numbers in boxes identify granites mentioned in text: 1- La Paya; 2- Las Cabritas; 3- El Alto; 4- Vallecito; 5- Brealito.

gitud. Los granitos del Complejo Eruptivo Oire brindan edades ordovícicas (Lork et al., 1989; Lork y Bahlburg, 1993) que son aceptadas por la mayoría de los investigadores de la región. El granito de Brealito pertenece al Complejo Eruptivo Oire. Por otro lado, la Formación Cachi (Turner, 1961) comprende a un grupo de intrusivos pequeños, de composición variable que incluye trondjemitas, tonalitas y granitos, de colores claros, con edades que varían entre 567 y 460 Ma. Esta diversidad de valores absolutos ha generado opiniones encontradas acerca de la edad de la Formación Cachi; para algunos autores todos los plutones son ordovícicos (Lork y Bahlburg 1993), mientras que para otros las trondjemitas son neoproterozoico-eocámbricas (Galliski et al., 1990). Sin embargo, en todas las interpretaciones y discusiones se da lugar a la hipótesis de que dentro de la Formación Cachi existan intrusivos de distintas edades (véase síntesis en Toselli, 1992). El granito de La Paya es parte de los cuerpos que se incluyen en la Formación Cachi.

La estrecha relación entre las Formaciones Cachi y La Paya hace aún más importante la cuestión de la edad debido a que ambas se vinculan a través del mismo evento térmico. En tal sentido, si la edad de los intrusivos de la Formación Cachi fuese ligeramente mayor de 500 Ma el evento térmico estaría parcialmente vinculado con el que describen Becchio et al. (1997) para el Norte de Argentina y Chile, asociado a la etapa final del Ciclo Pampeano según los nuevos límites temporales establecidos por Rapela et al. (1998), y Pankhurst y Rapela (1998). En cambio, si la edad de la Formación Cachi fuese ordovícica, el evento térmico sería parte del Ciclo Famatiniano (Aceñolaza y Toselli, 1976; Pankhurst y Rapela, 1998) y su evolución debería interpretarse en forma conjunta con la del Complejo Eruptivo Oire. Por último, la hipótesis de que entre los plutones incluidos en la Formación Cachi existan de distintas edades debe ser tomada en cuenta debido al lapso de aproximadamente 100 Ma registrado por las edades absolutas que brindan.

Desde el Cretácico la región sufrió distintos episodios de deformación frágil relacionados a la extensión cretácica y al acortamiento andino cenozoico. Como resultado, el basamento está fragmentado en diferentes bloques limitados por fallas.

## METODOLOGÍA

Las rocas ígneas se caracterizan en general por anisotropías débiles y escasa presencia de marcadores estructurales que dificultan la medida sobre afloramiento de las

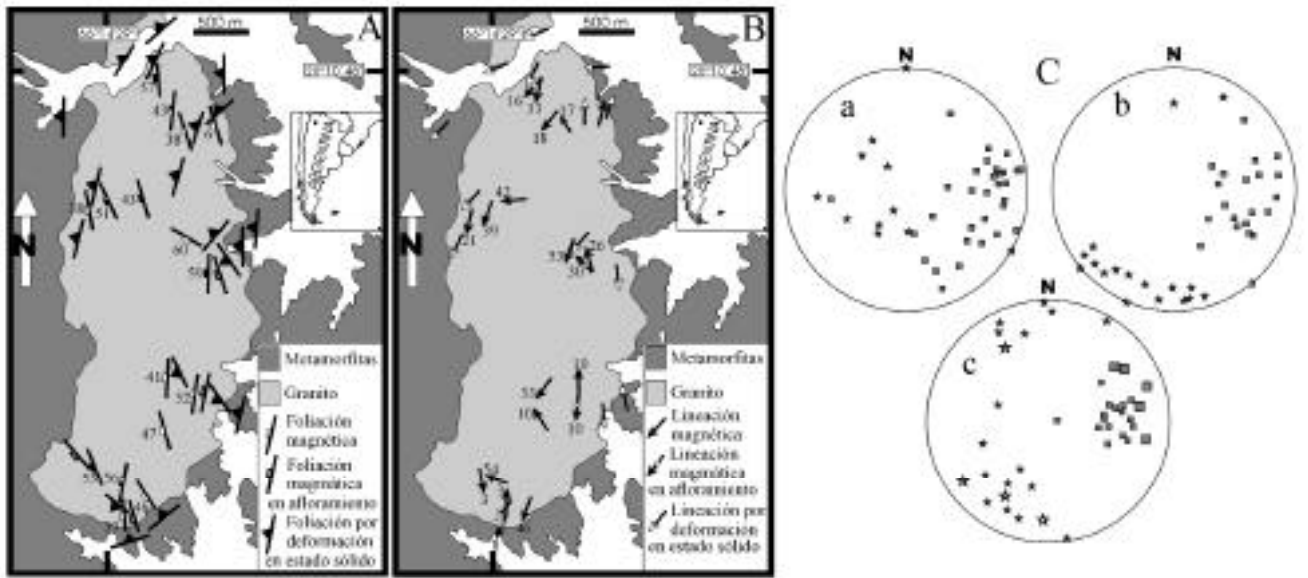


Figura 2. Granito La Paya. A- Foliaciones magnéticas, magmáticas y por deformación en estado sólido. B- Lineaciones magnética, magmática y por deformación en estado sólido. C- Diagramas estereográficos mostrando la orientación de fábricas magmáticas y de deformacionales en estado sólido del granito La Paya y su encajante. Cuadrados representan la foliación y estrellas la lineación. Proyecciones sobre hemisferio inferior, red de Schmidt. a- Foliación y lineación en encajante. La foliación con rumbo NE pertenece a zonas donde la deformación milonítica es suave. b- Foliación y lineación miloníticas en granito. c- Foliación y lineación magnéticas (símbolos más pequeños), y magmáticas medidas en afloramiento (símbolos más grandes).

Figure 2. La Paya granite. A- Magnetic, magmatic and solid-state deformation foliations. B- Magnetic, magmatic and solid-state deformation lineations. C- Stereonet diagrams showing orientation of magmatic and solid state deformation fabrics in La Paya granite and its host rock. Foliation is represented by boxes and lineation by stars. Schmidt net lower hemisphere projection. a- Foliation and lineation in host rock. NE striking foliation belongs to zones where the mylonitic deformation is not intense. b- Mylonitic foliation and lineation in granite, c- Magnetic foliation and lineation (small symbols) and magmatic foliation and lineation observed in outcrops (large symbols).

estructuras planares y lineares que definen la fábrica magmática, especialmente la lineación magmática el indicador cinemático más importante. La anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) ofrece la ventaja de determinar de un modo rápido y sencillo este tipo de fábricas (Bouchez et al., 1997). La medida de la fábrica magnética en campo bajo (ASM) es una técnica con numerosas aplicaciones en el campo de la tectónica (Borradaile, 1988; Borradaile y Henry, 1997) que durante los últimos años se ha aplicado sistemáticamente en rocas ígneas plutónicas, especialmente en las de carácter ácido, debido principalmente a que presentan habitualmente una mineralogía magnética y fábrica simples. De este modo, la ASM se ha convertido en la técnica más adecuada para abordar el análisis estructural y modo de emplazamiento de las rocas plutónicas, que raramente son isótropas y carentes de organización interna (Bouchez, 1997; Olivier et al., 1997).

El fundamento teórico de la ASM se basa en que un cuerpo isótropo sometido a la acción de un campo mag-

nético inductor,  $H$ , adquiere una imantación inducida de intensidad constante,  $M$ , tal que:  $M=[K]xH$ , siendo  $K$  la susceptibilidad magnética. En campo magnético bajo y para un cuerpo anisótropo,  $K$  es un tensor de 2º orden representado geoméricamente por un elipsoide triaxial de ejes  $K1*K2*K3$ : el eje largo del elipsoide magnético,  $K1$ , es la lineación magnética y  $K3$ , el eje corto del elipsoide, es el polo de la foliación magnética. Graham (1954) postuló el potencial de la ASM para el estudio de la fábrica de las rocas tras observar el paralelismo de la fábrica magnética con la fábrica (tectónica, sedimentaria o magmática) de las rocas.

Los dos plutones estudiados presentan grandes áreas en las que se han preservado estructuras formadas en estado magmático y zonas de cizalla dúctil en las que se desarrollan estructuras de deformación en estado sólido. Para obtener la estructura interna de un plutón mediante el análisis de la ASM se parte de una campaña de muestreos, efectuada con una sondeadora portátil provista de un

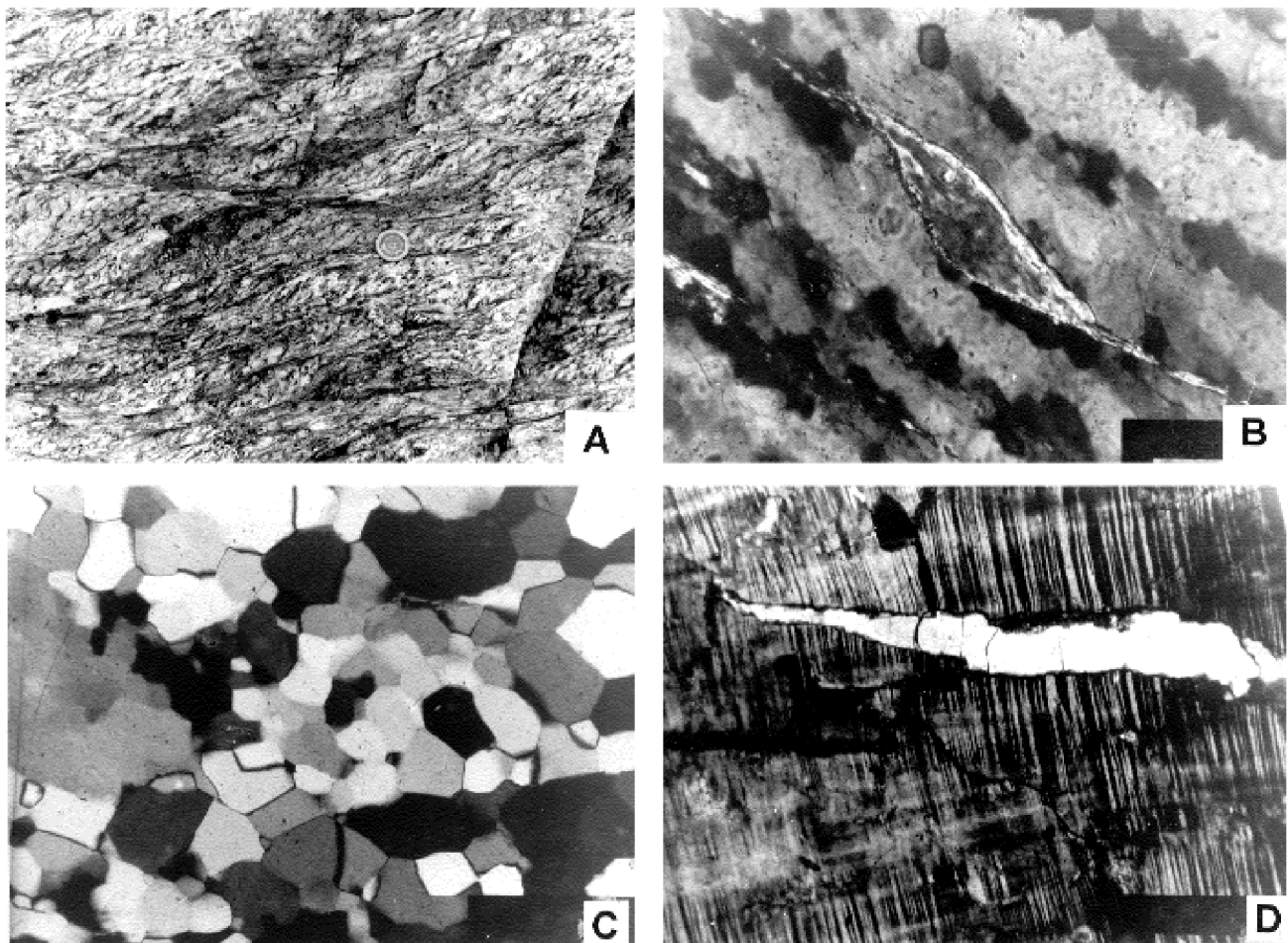


Figura 3. A) Estructura S-C en milonita. Movimiento dextral. Diámetro de la moneda= 2,2 cm; B) “Mica fish” y cuarzo con fábrica morfológica. Movimiento sinistral. Ancho de la vista= 0,25 mm; C) Cuarzo poligonal debido a recristalización estática. Ancho de la vista= 1 mm; D) Microfractura en feldespato rellena con cuarzo. Estructura posiblemente originada en condiciones submagmáticas. Ancho de la vista= 1 mm.

Figure 3. A) Mylonite with S-C structure- Dextral shear sense. Coin diameter =2.2 cm; B) “Mica fish” and quartz grain shape fabric. Sinistral shear sense. Width of view= 0,25 mm; C) Polygonal quartz due to static recrystallization. Width of view= 1 mm; D) Microfracture in feldspar infilled by quartz. Structure possibly formed in submagmatic conditions. Width of view = 1 mm.

trépano amagnético con corona de diamante que es refrigerada con agua. Se han realizado 39 estaciones (23 en Brealito y 16 en La Paya) regularmente espaciadas, en la medida de lo posible, sobre las superficies graníticas. En los dos plutones las campañas de sondeo fueron de alta dificultad, debido a que éstas áreas graníticas presentan un relieve escarpado, a lo que hay que añadir la falta de agua que obliga a transportar cantidades suficientes para el muestreo de toda la jornada y a los grados de deformación y alteración que presentan los granitos, en especial el de La Paya. En total se han obtenido 2 testigos por estación y analizado 156 muestras (dos por testigo) de 25 mm

de diámetro y 22 mm de largo. Una vez talladas las muestras, con el resto del testigo se han realizado láminas delgadas de secciones XZ (magnéticas) para el estudio mineralógico y microestructural. Las medidas se han realizado en un susceptómetro Kappabridge KLY-2 que opera en campo magnético bajo ( $\pm 4 \times 10^{-4}$  T y 920 Hz) con un límite de detección o sensibilidad de aproximadamente  $5 \times 10^{-8}$  SI.

Los datos de ASM se complementan con el estudio petrográfico de las muestras medidas, debido a la conveniencia de identificar los minerales responsables de la



susceptibilidad magnética. Además, el análisis petrográfico permite relacionar los datos magnéticos de las rocas con sus microestructuras, que es indispensable para interpretar la fábrica magnética.

## ESTRUCTURA

### Granito La Paya

El Granito La Paya es un cuerpo de aproximadamente 10 km<sup>2</sup>, constituido por cuarzo, microclina, plagioclasa (oligoclasa, Ab<sub>26</sub>) y moscovita como minerales mayoritarios, con biotita y turmalina en menor cantidad. El granate se presenta como un accesorio ocasional, aunque pueden existir facies más ricas en este mineral (Toselli, 1992). El granito de La Paya es leucocrático y ésta es una de las razones por la que generalmente se incluye en la Formación Cachi.

El granito está encajado en la Formación La Paya; pizarras y filitas con nódulos de biotita y cordierita constituyen la caja en su borde oriental y esquistos con nódulos de cordierita en su borde occidental. Es un cuerpo de forma tabular, elongado en sentido Norte-Sur, y concordante con la roca de caja (Fig. 2). Su relación largo/ancho es aproximadamente 2,5. Debido a que no se observa una aureola de contacto nítida, excepto una delgada faja de corneanas de irregular definición sobre el borde oriental, es posible suponer una vinculación temporal entre el emplazamiento de los plutones de la Formación Cachi, entre ellos el intrusivo de La Paya, y el evento metamórfico de temperatura alta y presión baja a intermedia que caracteriza a la Formación La Paya, tal como lo postula Toselli (1990).

No existen dataciones sobre el granito de La Paya. Toselli (1992) interpreta que la difusión en el sistema U-Pb que registran los circones de un xenolito a los 527 Ma (Lork et al., 1990) indica la edad de la intrusión. Por otra parte, hacia el Oeste de La Paya (Fig. 1) afloran los plutones de Vallecito (tonalita y trondjemita) que posee una edad U/Pb de 453 Ma (Datos de Lork en Toselli, 1992) y El Alto (trondjemita) que ha brindado edades U/Pb de 481 y 532 Ma (Toselli, 1992) y de 466 y 468 Ma (Lork y Bahlburg, 1993).

#### *Estructura del encajante*

La estructura de la roca de caja está caracterizada por una foliación bien desarrollada sobre la que localmente se distingue una lineación de estiramiento de irregular definición, generalmente mejor definida donde es-

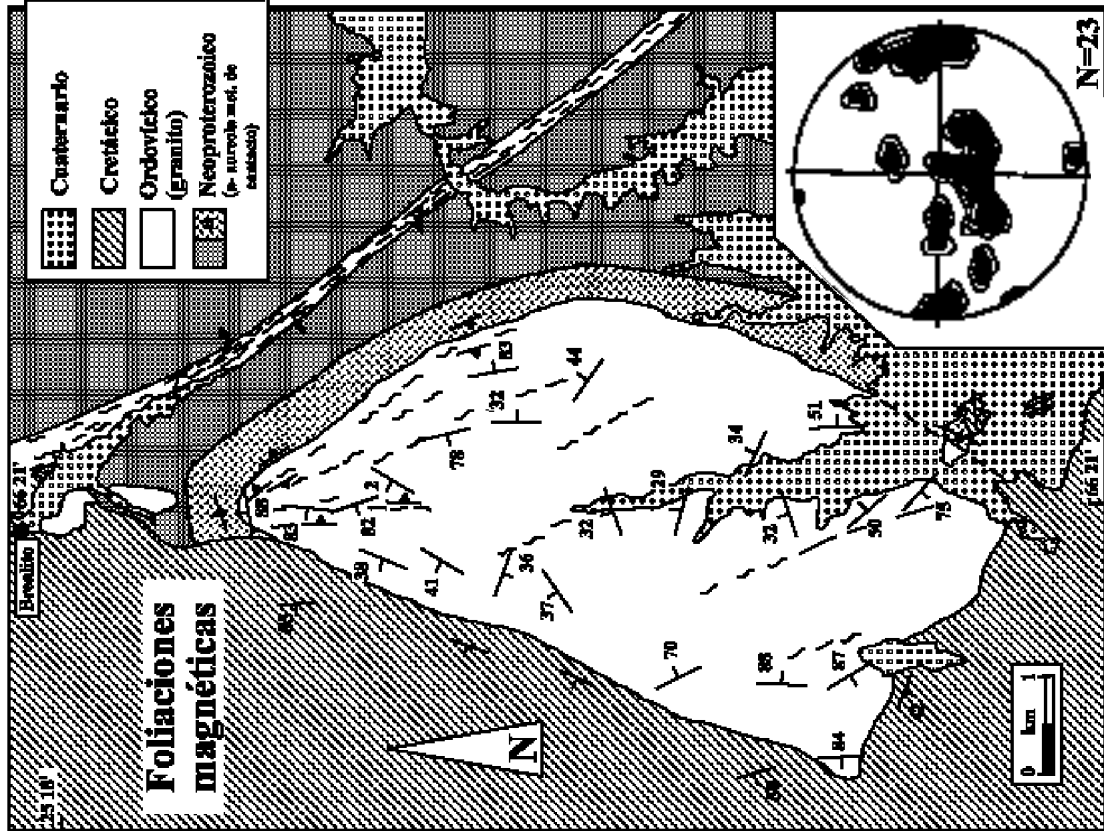
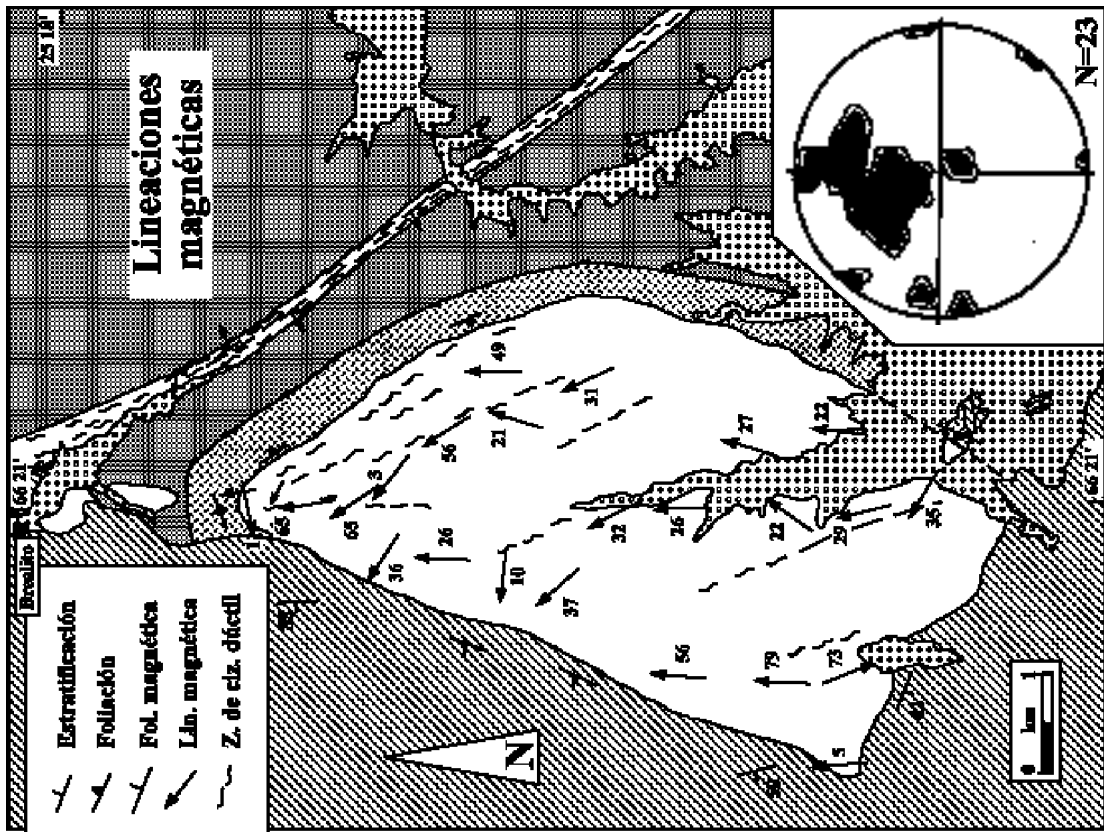
tá asociada a los nódulos de cordierita. La foliación y la lineación son posteriores a las estructuras de ámbito regional, pliegues y clivaje de plano axial asociado, originadas en estas rocas metamórficas durante la deformación tildárica. La foliación tiene rumbo N-S a NE-SO e inclinación hacia el O-SO (Fig. 2A y 2C.a); la lineación muestra distintas orientaciones sobre el plano de foliación, aunque dominan las que son paralelas a la línea de máxima pendiente de la foliación (Fig. 2B y 2C.b). La foliación y la lineación descriptas están generadas durante un episodio de plegamiento tardío, vergente hacia el este, que finaliza con el desarrollo de las zonas de cizalla dúctil transpresivas que se describen en el siguiente apartado.

Un rasgo estructural de particular interés está definido por la distribución regional de las distintas litologías metamórficas de la Formación La Paya. En su borde oriental, el encajante del granito de La Paya está constituido por pizarras y filitas nodulosas, localmente esquistos, mientras que a lo largo de su borde occidental predominan los esquistos. Hacia el Oeste, los plutones Las Cabritas, El Alto y Vallecito (Fig. 1) encajan en esquistos, gneises y migmatitas (Toselli, 1992). La estructura y distribución de estas litologías metamórficas (Figs. 1 y 2) indican que el encajante define una serie con metamorfismo invertido, ya que las rocas más profundas (gneises y migmatitas) están dispuestas sobre las más superficiales (pizarras y filitas). Se interpreta que la disposición invertida de las metamorfitas está relacionada con el flanco tumbado de un pliegue mayor; este pliegue correspondería a una sinforma si se tiene en cuenta que hacia el Este del plutón La Paya se observa que el metamorfismo decrece según lo registran las pizarras y filitas sin nódulos o con nódulos pequeños que afloran en la margen Oeste del río Calchaquí, y que más al Este afloran nuevamente filitas y esquistos con nódulos como los que se observan al Norte de Seclantas (Figs. 1 y 2).

La zona comprendida entre los plutones de La Paya y Las Cabritas (Fig. 1) muestra también mayores evidencias de cizallamiento con una lineación definida por nódulos estirados o por sombras de presión sobre los nódulos.

#### *Zonas de cizalla*

El granito de la Paya está deformado por fajas miloníticas. Se distinguen dos grupos de zonas miloníticas, uno principal de rumbo N a NE e inclinación hacia el SO y otro secundario de rumbo NO e inclinación hacia el SO. El primer grupo está integrado por corredores mi-



lonfíticos de hasta 200 m de potencia que presentan un diseño anastomosado, mientras que el segundo incluye fajas de menor espesor y de menor frecuencia. Las fajas miloníticas muestran foliación y lineación bien definidas, la foliación con rumbo N a NE e inclinación de 40° a 60° hacia el Oeste y la lineación de rumbo N-NE y buzamiento suave generalmente hacia el sur (Fig. 2B y 2C.b).

Las milonitas presentan numerosos indicadores cinemáticos a distintas escalas. Las estructuras S-C son notables en afloramiento (Fig. 3A), mientras que a escala microscópica se distinguen “mica fish”, fábricas de forma en los agregados policristalinos de cuarzo (Fig. 3B), foliaciones S-C y porfiroclastos con colas simétricas. Todos los indicadores son coherentes entre sí e indican que el bloque de techo (occidental) se desplazó hacia el Norte con una componente inversa y sólo localmente se observan componentes normales; es decir, estas fajas miloníticas han funcionado globalmente como una zona de cizalla dúctil transpresiva.

Estas milonitas se formaron a temperaturas medias y bajas. Por un lado se distinguen porfiroclastos de feldespato con extinción ondulante que sugieren una deformación a temperatura próxima a 500°C. El cuarzo con una fuerte recristalización estática indicada por granos poligonales con puntos triples (Fig. 3C) también indica temperatura moderada en el sistema. Por otro lado, se observan feldespatos con deformación frágil rodeados por cintas de cuarzo con una fábrica morfológica bien definida y con una fuerte orientación de los ejes c dispuestos con alto ángulo respecto a la foliación y lineación de las milonitas; estos rasgos son propios de milonitas formadas a menor temperatura. En conclusión, los procesos de milonitización que afectan al granito de La Paya evolucionan desde temperaturas medias a bajas. Las fajas de milonitas afectan también a la roca de caja, aunque allí no están tan bien definidas como en el granito. Las zonas de cizalla en la roca de caja están indicadas por la lineación de estiramiento bien desarrollada. Un rasgo llamativo está dado por el cambio de orientación de la lineación en el encajante y en el granito, de menor buzamiento en este último (Fig. 2C.a y 2C.b). Con los datos disponibles, no es posible explicar en forma detallada esta variación que, por el momento, se atribuye a una modificación en la cinemática de la de-

formación controlada por los distintos comportamientos reológicos del encajante y del intrusivo.

#### *Análisis de la ASM*

El plutón de la Paya presenta valores bajos de susceptibilidad magnética ( $K=1/3(K_1+K_2+K_3)$ ) que varían entre 1,9 y 6,7 x 10<sup>-5</sup>SI. Estos valores son indicativos de un comportamiento típicamente paramagnético (Rochette, 1987; Rochette et al., 1992) y permite afirmar que las fases minerales responsables de este comportamiento son los silicatos ferromagnesianos, especialmente la biotita (± moscovita ± turmalina). Los granitos paramagnéticos se caracterizan por presentar una relación lineal entre el valor de la susceptibilidad, K, y el contenido en Fe de las rocas (Gleizes et al., 1993) de manera que la variación de K refleja fielmente las zonaciones petrográficas establecidas a partir del contenido modal en minerales ferromagnesianos. Atendiendo a esta propiedad de las características magnéticas de las rocas ígneas, el plutón de La Paya presenta una zonación inversa, ya que los valores más altos de K son los de las muestras procedentes del núcleo del plutón, lo que concuerda con el aumento en la proporción de biotita desde el borde hacia el centro del plutón indicado por Toselli (1992).

El parámetro de anisotropía total ( $P=K_1/K_3$ ) caracteriza la geometría del elipsoide magnético y refleja la intensidad de la orientación preferente de los minerales paramagnéticos (biotita fundamentalmente). En rocas con bajos valores de K, este parámetro se recalcula eliminando la contribución diamagnética (debida al cuarzo y feldespato y de valor  $D=-1,4 \times 10^{-5}$ SI) para evitar el aumento artificial de P (al tender  $K_3$  a cero) y se expresa en porcentaje ( $P_{\text{para}}\% = 100 \times [(K_1 - D) / (K_3 - D)]$ ). Los valores de  $P_{\text{para}}\%$  son bajos y varían entre 2,0 y 5,5 (una sola muestra de valor 8,6) con un valor medio de 3,65. Estos valores son característicos de fábricas magmáticas, aunque los valores más altos sugieren una componente de deformación en estado sólido. Para que sirva de referente, se considera de forma aproximada que valores de  $P_{\text{para}}\% < 5$  caracteriza las estructuras magmáticas (valores de  $P_{\text{para}}\% < 3$  corresponde a rocas muy poco orientadas,  $P_{\text{para}}\% > 3$  corresponde a rocas con una estructura planar/lineal bien visible en el campo) y  $P_{\text{para}}\% > 5-7$

---

Figura 4. Granito Brealito. Mapas de fábricas magnéticas y por deformación en estado sólido. Los diagramas estereográficos muestran las fábricas magnéticas planar y lineal.

Figure 4. Brealito granite. Magnetic and solid-state deformation fabrics. Stereonet diagrams show the position of planar and linear magnetic fabrics.

corresponde a rocas fuertemente orientadas, en general por deformación en estado sólido. El análisis de las secciones delgadas muestra que el cuarzo, con formas equidimensionales, presenta extinción ondulante y recristalización dinámica incipiente.

Dado el carácter paramagnético de este plutón, la fábrica magnética de las muestras analizadas refleja, esencialmente, la orientación preferente de forma de los filosilicatos adquirida durante la cristalización final del magma. La foliación magnética es muy regular con direcciones N-S y buzamientos hacia el Oeste (Fig. 2A y 2C.c). La lineación magnética es también de dirección N-S con buzamiento suave (Fig. 2B y 2C.c). Las estructuras magmáticas medidas sobre afloramiento (la foliación mediante biotita-feldespatos y la lineación por la orientación de cristales de turmalina) son coherentes con las determinadas a partir del análisis de la ASM (Fig. 2A, 2B y 2C.c). Como única variación destacable cabe reseñar un grupo de muestras, ubicadas preferentemente en la parte central del cuerpo, con lineaciones magnéticas inclinadas más de 40° al Oeste y de rumbo transversal al de las restantes estaciones (Fig. 2A y 2B); cabe acotar que la foliación magmática no presenta alteraciones con respecto a la media en estos puntos.

Si bien las fábricas magmática y milonítica muestran un alto grado de concordancia, como se aprecia en la figura 2, un análisis más detallado detecta una ligera, aunque regular, oblicuidad entre ellas.

La preservación de estructuras aparentemente originadas por deformación en estado submagmático (Fig. 3D) apunta hacia un proceso de deformación activo durante los últimos estadios de cristalización de magma, aún en presencia de líquidos residuales (Bouchez et al., 1992). Sin embargo son escasas, aparecen en zonas con mayor deformación en estado sólido y están siempre rellenas por cuarzo, conjunto de observaciones que limita la vinculación de estas estructuras con un proceso magmático sincinemático.

### **Granito de Brealito**

El granito de Brealito es un cuerpo de aproximadamente 25 km<sup>2</sup> de superficie expuesta debido a que parte de sus bordes occidental y sur están cubiertos por sedimentitas cretácicas (Figs. 1 y 4). Es un monzogranito, gris, de grano grueso, compuesto por cuarzo, microclina, plagioclasa (Oligoclasa, Ab<sub>28</sub>), biotita, moscovita y cordierita. Tiene una textura porfirica definida por fenocristales de microclina de hasta 10 cm de longitud inmersos

en una pasta de grano grueso. Otro aspecto petrográfico digno de mención es la presencia de numerosos cristales de cuarzo con golfos de corrosión que indican un emplazamiento muy somero para este plutón, aspecto que está avalado, además, por la existencia de enclaves de rocas subvolcánicas en el granito.

Intruye metamorfitas de muy bajo-bajo grado y produce una aureola delgada (aproximadamente 500 m) de corneanas y rocas nodulosas sobre el encajante. En las inmediaciones del contacto, la roca de caja muestra fenómenos localizados de migmatización. Una edad U/Pb sobre monacita arroja 472±1/-2 Ma (Lork y Bahlburg, 1993).

El granito de Brealito también es un cuerpo elongado en sentido Norte-Sur. Si bien parte de sus contactos occidental y austral están cubiertos por sedimentitas más modernas (Figs. 1 y 4) es posible reconstruir una forma aproximadamente elíptica con una relación largo/ancho inferior a 2 de acuerdo con los contactos cartografiados.

### *Estructura del encajante*

La roca de caja corresponde a metapelitas y metareniscas con un plegamiento apretado de rumbo aproximado Norte-Sur y buzamiento variable, generalmente alto. Asociado al plegamiento se desarrolla un clivaje de plano axial continuo en los niveles pelíticos y espaciado en los psamíticos. Esta deformación es de edad Tiltárica (neoproterozoica) y previa al intrusivo. El contacto tiene distintos grados de concordancia con la estructura de la roca de caja, desde concordante a ligeramente discordante. Los diagramas A, B y C (Fig. 5) muestran la orientación de las principales estructuras tiltáricas.

Donde el encajante está afectado por las zonas de cizalla paleozoicas se distinguen foliación y lineación bien definidas que afectan a las estructuras previas en diferentes grados, desde una rotación suave de las fábricas más antiguas hasta una transposición avanzada. Los diagramas 5D y 5E muestran la orientación de la foliación y lineación en el encajante afectado por la deformación milonítica.

### *Zonas de cizalla*

El granito tiene zonas de deformación ductil desarrolladas en condiciones metamórficas de bajo grado

(Hongn y Becchio, 1999) aunque existen indicios de una deformación previa a mayor temperatura, como lo documentan fenocristales de feldespato con extinción ondulante y bandas *kink*. El granito de Brealito conserva abundantes evidencias microestructurales de deformación en condiciones submagmáticas. Entre ellas destaca la existencia de numerosas fracturas intracristalinas, tanto en cristales de cordierita como de plagioclasa, en las que ha cristalizado cuarzo, incluso feldespato ocasionalmente, carente de deformación interna y en continuidad óptica con el cuarzo que rodea a los porfirocristales de cordierita y plagioclasa. Además, numerosos cristales de cuarzo de la matriz del granito tienen microestructuras en damero, con subgranos de formas cuadradas o rectangulares y con límites de subgranos a 90°; las microestructuras en damero descritas en rocas graníticas se han atribuido a deformación por deslizamiento intracristalino de dirección (c) (Mainprice et al., 1985; Aranguren y Tubía, 1992) y a migración de límites de grano a lo largo del eje c del cuarzo (Gapais y Barbarin, 1986), procesos activados en ambos casos a altas temperaturas, cercanas a condiciones subsolidus. La conservación de estas microestructuras y su sustitución por las zonas de cizalla dúctil y dúctil-frágil sugieren que el emplazamiento del granito de Brealito se produjo en condiciones dinámicas, asociado a una deformación que evolucionó desde altas a bajas temperaturas.

Las zonas de alta deformación dúctil afectan tanto al granito como a la roca de caja. Los espesores varían entre pocos centímetros y 200 m. La foliación y la lineación miloníticas están bien definidas. La foliación tiene rumbo NO e inclinación alta hacia el Oeste (Fig. 5F) y la lineación se dispone en general concordante con la máxima inclinación de la foliación (Fig. 5G).

Las milonitas mejor definidas provienen de los protolitos graníticos dada la ausencia de fábricas deformacionales en estado sólido previas. Los indicadores cinemáticos son abundantes, y determinan un funcionamiento transpresivo de las zonas de cizalla de Brealito, ya que proporcionan un movimiento del bloque de techo hacia arriba y hacia el Norte (Hongn y Becchio, 1999). Las zonas de cizalla afectan localmente el contacto entre el granito y el encajante.

#### Análisis de la ASM

El plutón de Brealito presenta una gran variabilidad en la magnitud de la susceptibilidad magnética ( $K=1/3(K1+K2+K3)$ ), variando ésta entre 22 y  $466 \times 10^{-5} \text{SI}$ . El

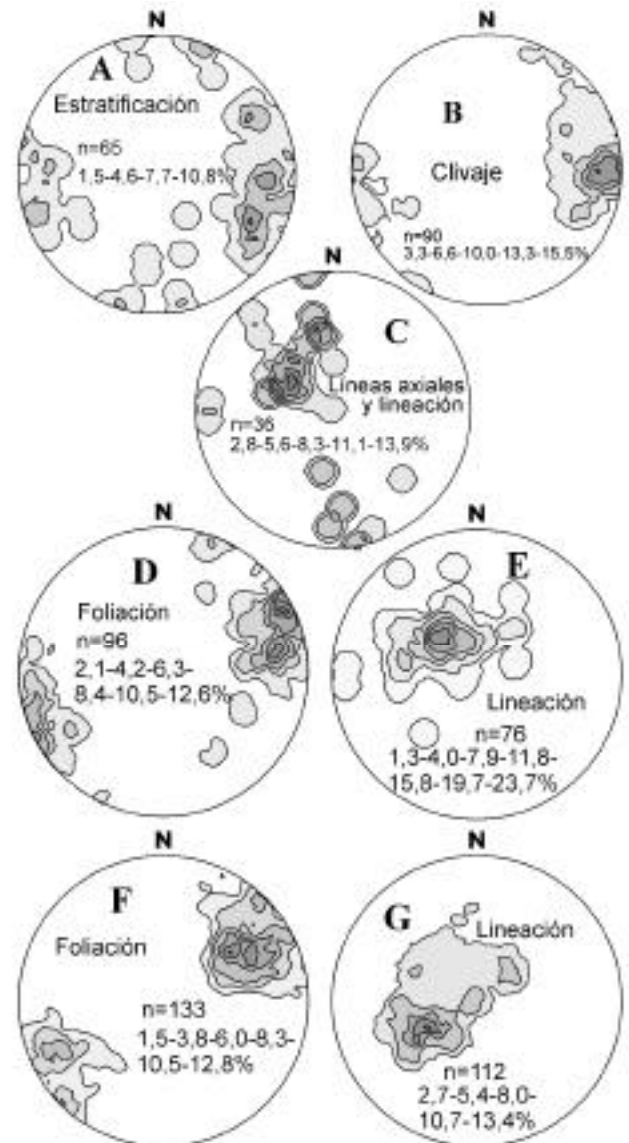


Figura 5. Diagramas estereográficos mostrando la orientación de las fábricas deformacionales en estado sólido del granito de Brealito y de su encajante. 5A, 5B y 5C: Estratificación, clivaje y líneas axiales-lineación de intersección en encajante. Estructuras relacionadas a la deformación más antigua. 5D y 5E: Foliación y lineación miloníticas en encajante con deformación paleozoica. 5F y 5G: Foliación y lineación en milonitas graníticas de baja temperatura.

Figure 5. Stereonet diagrams showing orientation of solid state deformation fabrics in Brealito granite and its host rock. Schmidt lower hemisphere projection. 5A, 5B and 5C: Bedding, cleavage and hinge line-intersection lineation in host rock. Structures related to the oldest deformation. 5D and 5E: Mylonitic foliation and lineation in host rock with paleozoic deformation. 5F and 5G: Foliation and lineation in low temperature granitic mylonites.

52% de las estaciones muestra valores de K menores que  $70 \times 10^{-5} \text{SI}$ , indicativo de un comportamiento paramagnético dominante, mientras que la variabilidad y los altos valores de K del resto de las estaciones se atribuyen a la contribución de la fracción ferromagnética (magnetita) en diferentes proporciones.

No se observa ninguna distribución preferente de K a nivel de plutón, si bien es cierto que eliminando las estaciones con  $K > 70 \times 10^{-5} \text{SI}$ , los valores más altos de K se sitúan hacia el interior del plutón, de modo semejante a como ocurre en La Paya.

Los valores de  $P_{\text{para}}\%$  varían entre 2 y 23. Los valores anormalmente altos de  $P_{\text{para}}\%$  de cinco estaciones ( $P_{\text{para}}\%$  entre 12 y 23) se correlacionan obviamente con el aumento de K y se atribuyen a la distribución preferente de los granos de magnetita. El resto de las estaciones muestra valores de  $P_{\text{para}}\%$  (entre 2,5 y 6,9) coherentes con el carácter magmático de estas fábricas. El análisis microestructural de las secciones delgadas confirma lo dicho anteriormente; el

cuarzo (equidimensional) junto con el resto de los minerales no presenta signos importantes de deformación interna.

La foliación magnética con buzamientos medios a fuertes presenta a grandes rasgos una distribución concéntrica (Fig. 4) con un borde oriental y occidental con buzamientos dominantes hacia el Oeste. La lineación magnética es bastante regular con direcciones aproximadas N-S (Fig. 4) y buzamientos siempre hacia el Norte (media  $K1 = 45/338$ ).

## DISCUSIÓN

Tanto el granito de La Paya como el de Brealito están deformados por zonas de cizalla dúctil transpresivas, con cinemáticas y orientaciones similares. Sin embargo, en el de Brealito la amplia preservación de microestructuras producidas por deformación a alta temperatura, e incluso en condiciones submagmáticas, indica que su emplazamiento es sincinemático con el funcionamiento de las zo-

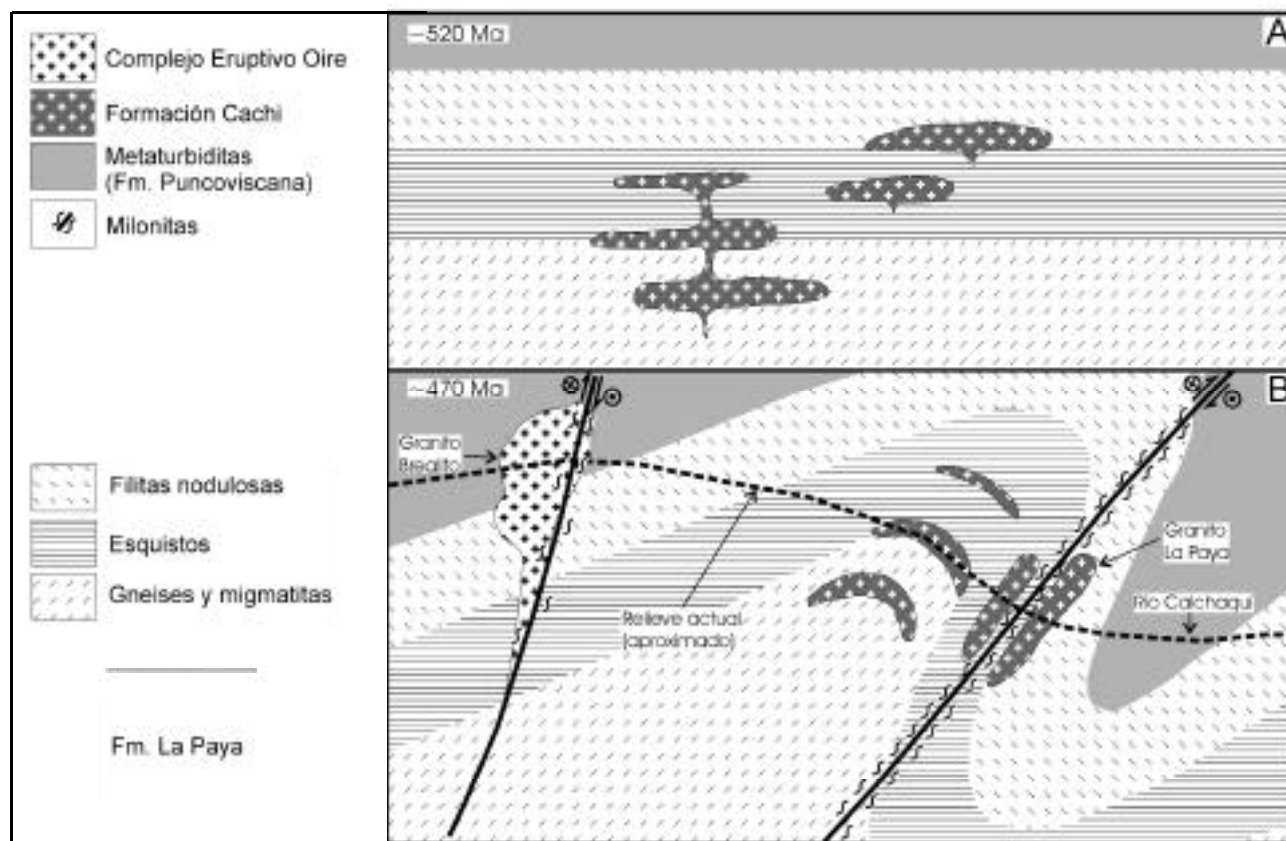


Figura 6. Esquema del emplazamiento de los granitos de la Paya y Brealito (Explicación en el texto).

Figure 6. Sketch of the emplacement of La Paya and Brealito granites (Explanation in text).

nas de cizalla; la ausencia de esos tipos de microestructuras en el de La Paya sugiere, en cambio, que su intrusión es previa al desarrollo de las zonas de cizalla transpresivas. El hecho de que el granito de La Paya exhiba una forma más alargada y mayor concordancia con las estructuras de las rocas de caja que el de Brealito, puede reflejar que la deformación provocada por las zonas de cizalla fue más acusada en el primero que en el segundo, debido tan solo a que el granito de La Paya intruyó en un nivel estructural más bajo que el de Brealito (Fig. 6).

Para interpretar de forma conjunta el emplazamiento de los plutones de La Paya y Brealito en un modelo integrador surgen dificultades provenientes de la falta de información especialmente sobre las edades de los intrusivos y de las fajas de deformación.

El carácter sincinemático del granito de Brealito y su edad de 472 Ma (Lork y Bahlburg, 1993) son los datos más confiables a partir de los cuales es posible atribuir una edad similar a las fajas miloníticas que lo afectan. Por otro lado, las edades del granito de la Paya y de la deformación que posee pueden ser: I) cercanas a la de Brealito, II) el granito más antiguo (527 Ma, Toselli, 1992) y la deformación ordovícica, y III) el plutón y la deformación cercanas a 527 Ma. Dado que 1) las evidencias de una intrusión con un marcado control tectónico no son claras para el granito de la Paya, 2) la edad atribuida a este plutón es de 527 Ma, 3) las fajas miloníticas que lo afectan son de naturaleza comparable, tanto en su cinemática como en las condiciones físicas en que se desarrollaron, con las que exhibe el de Brealito, y 4) los granitos de La Paya y Brealito presentan diferencias composicionales que se manifiestan en sus disímiles características magnéticas, la hipótesis de trabajo que, por el momento, proporciona el mejor encaje de los datos disponibles es considerar que el granito de la Paya es más antiguo que el de Brealito y que las deformaciones que los afectan son contemporáneas.

De acuerdo con esta hipótesis (Fig. 6) aproximadamente a los 520 Ma ocurre un episodio metamórfico que transforma a la Formación Puncoviscana en migmatitas, gneises, esquistos y filitas nodulosas (Formación La Paya). El metamorfismo correspondería al evento descrito por Toselli y Rossi (1990), y Becchio et al. (1997), datado por estos últimos autores entre 500 y 515 Ma. Asociado a este evento se intruyen los plutones de la Formación Cachi, los que se emplazan preferentemente como lacolitos en las zonas de transición entre las distintas litologías metamórficas de la Formación La Paya. Así, los cuerpos de las Cabritas y La Paya se alojan en la transición entre

filitas y esquistos, mientras que los intrusivos El Alto y Vallecito lo hacen en niveles más profundos.

En el Ordovícico inferior, aproximadamente 470 Ma, ocurre un evento que involucra magmatismo, metamorfismo y deformación a escala regional, posiblemente vinculado a una situación geodinámica transpresiva (Hongn et al., 1996; Hongn y Becchio, 1999). Durante este evento la Formación La Paya es plegada, deformación que afecta también a los lacolitos, y ocurre la inversión de las litologías metamórficas. El metamorfismo invertido que se observa en La Paya correspondería al flanco volcado de una sinforma cuya línea axial está sepultada por el relleno del valle del río Calchaquí. Las filitas nodulosas que afloran en las inmediaciones de Seclantas corresponden al flanco occidental de la sinforma. Hacia el Oeste del flanco invertido con los plutones de la Paya y las Cabritas afloran migmatitas y gneises que alojan los plutones del Alto y Vallecito; esta área correspondería al núcleo de una estructura antiformal. Los plutones tienen allí formas más equidimensionales que los alojados en el flanco invertido del pliegue; si estos cuerpos también fueran de geometría lacolítica esta diferencia se debería a que mantienen una posición más próxima a la original y afloran superficies paralelas a la mayor extensión del intrusivo.

Al mismo tiempo (~470 Ma) ocurre la intrusión del granito de Brealito, cuyo emplazamiento es contemporáneo con la deformación, por lo que muestra evidencias microestructurales de un plutón sincinemático. El granito de Brealito se aloja en niveles someros de la corteza, en las metaturbiditas de la Formación Puncoviscana o en las filitas nodulosas de la Formación La Paya. La deformación que afecta al granito de Brealito en condiciones subsolidus y de alta temperatura evoluciona hacia temperaturas decrecientes hasta generar milonitas de baja temperatura (Hongn y Becchio, 1999). Esta misma deformación está registrada en las milonitas de la Paya Las cinemáticas de las fajas miloníticas de Brealito y La Paya son coherentes entre sí, con un movimiento general de ascenso y desplazamiento hacia el Norte del bloque occidental-sudoccidental. Estas zonas de alta deformación corresponden a las manifestaciones más orientales de un sistema regional cuyos componentes muestran una diversidad de orientaciones, cinemáticas y condiciones de formación que permiten asociarlas con una transpresión (Hongn y Becchio, 1999). Por otra parte, Coira et al. (1999) indican una situación transtensiva para explicar parte del magmatismo ordovícico inferior que intercala en sedimentitas aflorantes hacia el Norte de la región analizada en este trabajo.

Los procesos magmáticos, metamórficos y tectónicos de fines del Arenig (~470 Ma) se vinculan con cambios en los comportamientos de las cuencas ordovícicas en el noroeste de Argentina (Salfity et al., 1984).

Como toda interpretación basada en datos parciales y cuestionables, por ejemplo la edad del plutón de La Paya, la aquí presentada tiene una alta dosis de especulación, y está abierta a modificaciones en el curso de futuras investigaciones. No obstante, es necesario destacar la naturaleza sincinemática del granito de Brealito y la necesidad de profundizar las investigaciones sobre los cuerpos con geometría similares a los de La Paya. El basamento del borde occidental del valle del río Calchaquí exhibe numerosos plutones con formas elípticas, desde pequeñas lentes hasta cuerpos con dimensiones regionales, concordantes con la roca de caja y alojados en rocas con transiciones metamórficas como las que presentan las Formaciones Puncoviscana y La Paya.

## CONCLUSIONES

- Los plutones de Brealito y La Paya tienen formas elípticas alargadas en sentido Norte-Sur e inclinadas hacia el Oeste, este último rasgo mejor definido en el de La Paya. La lineación magmática es de buzamiento suave en dirección Norte-Sur.
- El granito de la Paya es un plutón de naturaleza paramagnética mientras que el de Brealito tiene un carácter mixto, con porciones paramagnéticas y otras ferromagnéticas, estas últimas definidas por la presencia de magnetita.
- El granito de Brealito es un granito sincinemático de acuerdo con las evidencias obtenidas del estudio de su estructura y microestructura. Por otra parte, el análisis del granito de La Paya indica que el control tectónico no es significativo durante su emplazamiento, por lo que se atribuye su marcada elipticidad y su concordancia con el encajante a una geometría lacólfica.

Actualmente el granito de la Paya aflora encajado en el flanco de un pliegue que produce una disposición invertida de las litologías metamórficas representadas por las Formaciones Puncoviscana y La Paya.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos ICI 1996 (Programa de Cooperación con Iberoamérica), UPV 001.310-

EB003/95, CONICET (PIP- 5020; PEI-427/97) y CIUNSA. Se agradece al Dr. F. Bea, al Dr. A. Cuesta y a un tercer revisor anónimo, los comentarios y sugerencias que permitieron mejorar la versión original del manuscrito.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aceñolaza, F., Toselli, A., 1976. Consideraciones estratigráficas y tectónicas sobre el Paleozoico inferior del Noroeste Argentino. II Congr. Latinoam. Geol. Mem., 2, 755-764.
- Aceñolaza, F., Durand, F., Díaz Taddei, R., 1976. Geología y contenido paleontológico del basamento de la región de Cachi, Provincia de Salta, República Argentina. VI Congr. Geol. Arg., Actas, 1, 319-332.
- Aranguren, A., Tubía, J.M., 1992. Structural evidence for the relationship between thrusts, extensional faults and granitic intrusions in the Variscan Belt of Galicia (Spain). Jour. Struct. Geol., 14, 1229-1237.
- Becchio, R., Lucassen, F., Franz, G., Viramonte, J., 1997. Condiciones de P-T del basamento metamórfico de alto grado. Borde oriental de la Puna austral argentina. VIII Congr. Geol. Chileno. Actas, 2, 1220-1224.
- Borradaile, G.J., 1988. Magnetic susceptibility, petrofabric and strain. Tectonophysics, 156, 1-20.
- Borradaile, G.J., Henry, B., 1997. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. Earth Science Reviews, 42, 49-93.
- Bouchez, J.L., 1997. Granite is never isotropic. In J.L. Bouchez, D.H. Hutton, W.E. Stephens (eds.). Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics. Kluwer Academic Pub., 95-112.
- Bouchez, J.L., Delas, C., Gleizes, G., Nédélec, A., Cuney, M., 1992. Submagmatic microfractures in granites. Geology, 20(1), 35-38.
- Bouchez, J.L., Hutton, D.H., Stephens, W.E. (eds.), 1997. Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics. Petrology and Structural Geology. Kluwer Academic Pub., 8, 358 pp.
- Coira, B., Kay, S., Pérez, B., Wolf, B., Hanning, M., Flores, P., 1999. Magmatic Sources and Tectonic Setting of Gondwana Margin Ordovician Magmas, Northern Puna of Argentina and Chile. In V. Ramos, D. Keppie, D. (eds.). Laurentia-Gondwana connections before Pangea. Geol. Soc. Am., Spec. Paper (en prensa).
- Galliski, M., 1983. Distrito minero El Quemado, departamentos La Poma y Cachi, provincia de Salta. I: El basamento del tramo septentrional de la sierra de Cachi. Rev. Asoc. Geol. Arg., 38(2), 209-224.
- Galliski, M., Toselli, A., Saavedra, J., 1990. Petrology and geochemistry of the Cachi high-alumina trondjemites, north-western Argentina. In S. Kay, C.W. Rapela, (eds.). Pluto-



- nism from Antarctica to Alaska. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* 241, 91-100.
- Gapais, D., Barbarin, B., 1986. Quartz fabric transition in a cooling syntectonic granite (Hermitage Massif, France). *Tectonophysics*, 125, 357-370.
- Gleizes, G., Nédélec, A., Bouchez, J.L., Autran, A., Rochette, P., 1993. Magnetic susceptibility of the Mont-Louis Andorra ilmenite-type granite (Pyrenees): A new tool for the petrographic characterization and regional mapping of zoned granite plutons. *Jour. Geophys. Res.*, 98(B3), 4317-4331.
- Graham, J.W., 1954. Magnetic susceptibility anisotropy: an unexploited petrofabric element. *Geol. Soc. Am., Abstr. Progr.*, 65, 1257-1258.
- Guillet, Ph., Bouchez, J.L., Wagner, J.J., 1983. Anisotropy of Magnetic Susceptibility and magmatic structures in the Guérande granite massif (France). *Tectonics*, 2(5), 419-429.
- Harrington, H., 1975. South America. In R. Fairbridge (ed.). *The Encyclopedia of World Regional Geology*, 1, New York, Reinhold Book Co., 456-465.
- Hippertt, J.F., Hongn, F.D., 1998. Deformation mechanisms in the mylonite-ultramylonite transition. *Jour. Struct. Geol.*, 20(11), 1435-1448.
- Hongn, F., Becchio, R., 1999. Las fajas miloníticas de Brealito, Basamento del Valle Calchaquí, Salta, Argentina. *Rev. Asoc. Geol. Arg.*, 54(1), 74-87
- Hongn, F., Seggiaro, R., 1998. Hoja 2566-III, Cachi, 1:250.000. Mapa Geológico. Servicio Geológico Minero Argentino.
- Hongn, F.D., Mon, R., Cuevas, J., Tubía, J.M., 1996. Esquisse structurel et cinématique de zones de cisaillement calédoniennes à haute température dans la Quebrada Barranquilla, Puna Oriental (Argentina). *Comp. Rend. Acad. Sci., París*. 323 (IIa), 809-815.
- Jezek, P., 1990. Análisis sedimentológico de la Formación Puncoviscana entre Tucumán y Salta. In F. G. Aceñolaza, F.G., H. Miller, A. Toselli (eds.). *El Ciclo Pampeano en el Noroeste Argentino*. Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica, 4, 9-35.
- Lork, A., Bahlburg, H., 1993. Precise U-Pb ages of monazites from the Faja Eruptiva de la Faja Eruptiva de la Puna Oriental, NW Argentina. XII Congr. Geol. Arg. y II Congr. Exploración de Hidrocarburos, Actas, 4, 1-6.
- Lork, A., Miller, H., Kramm, U., 1989. U-Pb zircon and monazite ages of the La Angostura granite and the orogenic history of the northwest Argentina basement. *Jour. South Amer. Earth Sci.*, 2, 147-153.
- Lork, A., Miller, H., Kramm, U., Grauert, B., 1990. Sistemática U-Pb de circones detríticos de la Fm Puncoviscana y su significado para la edad máxima de sedimentación en la Sierra de Cachi (Prov. de Salta, Argentina). In F.G. Aceñolaza, H. Miller, A.J. Toselli, (eds.). *El Ciclo Pampeano en el Noroeste Argentino*. Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica 4, 199-208.
- Mainprice, D., Bouchez, J.L., Blumefield, P., Tubía, J.M., 1985. Dominant c-slip in naturally deformed quartz: implications for dramatic plastic softening at high temperature. *Geology*, 14, 819-822.
- Mon, R., Hongn, F.D., 1996. Estructura del basamento proterozoico y paleozoico inferior del norte argentino. *Rev. Asoc. Geol. Arg.*, 51(1), 1-10.
- Olivier, P., de Sain-Blanquat, M., Gleizes, G., Leblanc, D., 1997. Homogeneity of granite fabrics at the metre and dekametre scales. In J.L. Bouchez, D.H. Hutton, W.E. Stephens (eds.). *Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics*. Kluwer Academic Pub., 113-128.
- Pankhurst, R., Rapela, C., 1998. The proto-Andean margin of Gondwana: an introduction. In R. Pankhurst, C. Rapela (eds.). *The Proto-Andean Margin of Gondwana*. Geol. Soc. London, Spec. Pub., 142, 1-9.
- Rapela, C., Pankhurst, R., Casquet, C., Baldo, E., Saavedra, J., Galindo, C., 1998. Early evolution of the Proto-Andean margin of South America. *Geology*, 26(8), 707-710.
- Rochette, P., 1987. Magnetic susceptibility of the rock matrix related to magnetic fabric studies. *Jour. Struct. Geol.*, 9, 1015-1020.
- Rochette, P., Jackson, M., Aubourg, C., 1992. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Rev. Geophys.*, 30, 209-226.
- Salfity, J., Malanca, S., Brandan, E., Monaldi, C., Moya, C., 1984. La fase Guandacol (Ordovícico) en el Norte Argentino. IX Congr. Geol. Arg., Actas, 1, 555-567.
- Toselli, A., 1990. Metamorfismo del Ciclo Pampeano. In F.G. Aceñolaza, H. Miller, A.J. Toselli (eds.). *El Ciclo Pampeano en el Noroeste Argentino*. Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica 4, 181-197.
- Toselli, A., 1992. El magmatismo del noroeste argentino. *Reseña sistemática e interpretación*. Universidad Nacional de Tucumán. Serie Correlación Geológica, 8, 243 pp.
- Toselli, A., Rossi, J., 1990. Metamorfismo de baja presión en las Sierras Pampeanas y Cordillera Oriental en el NW de Argentina. Relaciones con el plutonismo granítico. XI Congr. Geol. Arg., Actas, 1, 174-177.
- Turner, J.C., 1961. Estratigrafía del Nevado de Cachi y adyacencias. *Acta Geol. Lilloana*, 3, 191-226.
- Turner, J.C., Méndez, V., 1975. Geología del sector oriental de los departamentos de Santa Victoria e Iruya, Provincia de Salta. República Argentina. *Acad. Nac. Cien. Córdoba. Bol.*, 51(1-2), 11-24.
- Willner, A., 1990. División Tectonometamórfica del basamento del noroeste argentino. In F.G. Aceñolaza, H. Miller, A.J. Toselli (eds.). *El Ciclo Pampeano en el Noroeste Argentino*. Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica 4, 113-159.