

# ZONACIÓN COMPOSICIONAL EN GRANATES DE LA SIERRA DE PIE DE PALO, SAN JUAN, ARGENTINA: IMPLICANCIAS EN LA HISTORIA METAMÓRFICA

RAMACCIOTTI, C.\*, BALDO, E.\*, CASQUET, C.\*\*, COLOMBO, F.\*

\* CICTERRA - CONICET - UNC. e-mail: carlosramacciotti@yahoo.com.ar

\*\* Departamento de Petrología y Geoquímica. Instituto de Geociencias (IGEO). Universidad Complutense-CSIC. 28040 Madrid, España.

## ABSTRACT

Compositional zoning of garnet from two domains of the Sierra de Pie de Palo (Western Sierras Pampeanas) evidence contrasting tectono-metamorphic histories. Garnets from Grt-amphibolites of the underlying Grenville-age mafic-ultramafic belt (Complejo de Pie de Palo) on the western side of the Sierra show two discontinuous zones, one internal (core) and one external (rim). These zones are separated by inclusions of quartz and plagioclase arranged concentrically. Each zone shows different composition and also different patterns of variation for each end-member. In contrast, garnets from the Neoproterozoic Ca-metapelites in the overlying southeastern domain of the Sierra de Pie de Palo show a continuous compositional zoning, characteristic of a single stage of growth during the Famatinian orogeny (Ordovician). Alm, Prp and Grs increase regularly outwards while Sps shows a reverse pattern. Garnet chemistry is consistent with the existence of a polymetamorphic basement (Grenvillian + Famatinian metamorphism) on the western side and a younger monometamorphic sedimentary cover.

**Palabras clave:** Orogenia Famatiniana - Polimetamorfismo - Zonación de granate - Sierras Pampeanas Occidentales.

**Key words:** Famatinian Orogeny - Polimetamorphism - Garnet zoning - Western Sierras Pampeanas.

## INTRODUCCIÓN

El margen proto-Andino de Gondwana posee una larga historia de acreción de terrenos acaecidos entre el Neoproterozoico tardío y el Paleozoico medio. La extensión y magnitud de los diferentes terrenos así como la proveniencia y edad de acreción de cada uno es aún motivo de discusión existiendo al presente varias hipótesis alternativas para cada caso (por ej. Ramos, 2010; Rapela *et al.*, 2011; Casquet *et al.*, 2012, entre otros). La acreción del terreno Precordillera al margen proto-Andino de Gondwana es la que ha generado mayor debate científico, especialmente en términos de proveniencia de dicho terreno y edad de la colisión (ver síntesis en Finney, 2007).

La Sierra de Pie de Palo, ubicada al oeste de la falla del Bermejo (Figura 1) posee un basamento de edad grenville (1000-1100 Ma) y ha sido integrada al supuesto terreno alóctono de afinidad Lauréntica (Precordillera Terrane o

Cuyania Terrane, Astini *et al.*, 1995; Ramos, 2004). A pesar de esto, la ubicación de Pie de Palo al momento de la orogénesis famatiniana es aún incierta existiendo dos posturas al respecto. La hipótesis alóctona propone que el bloque estaba anexado al Terreno Precordillera y como tal formó parte de la placa inferior que subdujo bajo el proto-margen continental de Gondwana durante el Ordovícico inferior (Orogenia Famatiniana) (Ramos, 2004; Van Staal *et al.*, 2011). La hipótesis para-autoctona postula que dicho bloque ya se encontraría junto al proto-margen gondwánico para dicha orogenia y por lo tanto sería parte del arco magmático famatiniano (Galindo *et al.*, 2004; Mulcahy *et al.*, 2007, 2011; Casquet *et al.*, 2012). La existencia de granitos de arco de edad ordovícica en la sierra de Pie de Palo (Pankhurst *et al.*, 1998; Baldo *et al.*, 2005) apoyaría esta última hipótesis. Además, la presencia de una cubierta sedimentaria neoproterozoica (Secuencia Metasedimentaria

Difunta Correa) (Baldo *et al.*, 1998; Galindo *et al.*, 2004; Rapela *et al.*, 2005), y la falta de su equivalente lauréntico apoya también la hipótesis para-autóctona. En este trabajo se discuten los patrones de zonación composicional de granates de la Sierra de Pie de Palo con historias termo-báricas diferentes que permiten sugerir la existencia de un basamento polimetamórfico y unidades más jóvenes monometamórficas.

## MARCO GEOLÓGICO

La Sierra de Pie de Palo, ubicada dentro de las Sierras Pampeanas Occidentales, consiste en un sistema de corrimientos de vergencia oeste. Las láminas de corrimientos están compuestas por un basamento mesoproterozoico (Caminos, R., 1979; Casquet *et al.*, 2001; Vujovich *et al.*, 2004; Baldo *et al.*, 2006; Colombo *et al.*, 2009; Rapela *et al.*, 2010), el cual aflora ampliamente en el sector centro oeste de la sierra; una cobertera

metasedimentaria denominada Secuencia Metasedimentaria Difunta Correa (SMDC) de edad neoproterozoica (Baldo *et al.*, 1998; Galindo *et al.*, 2004; Vujovich *et al.*, 2004; Rapela *et al.*, 2005), cuyos principales afloramientos se encuentran en el sureste de la sierra; y por último, en el sector más occidental afloran rocas correspondientes a una plataforma carbonática-siliciclástica con un metamorfismo de bajo grado sobrepuesto, denominadas Grupo Caucete, el cual ha sido asignado al Cámbrico (por ej.: Galindo *et al.*, 2004; Naipauer *et al.*, 2010). Cabe destacar la presencia de un magmatismo anorogénico de  $774 \pm 6$  Ma (Baldo *et al.*, 2006) (Figura 1).

Todas las unidades de la sierra fueron afectadas por el metamorfismo famatiniano, pudiendo encontrarse, en las rocas más antiguas, un polimetamorfismo grenvilliano-famatiniano (Casquet *et al.*, 2001).

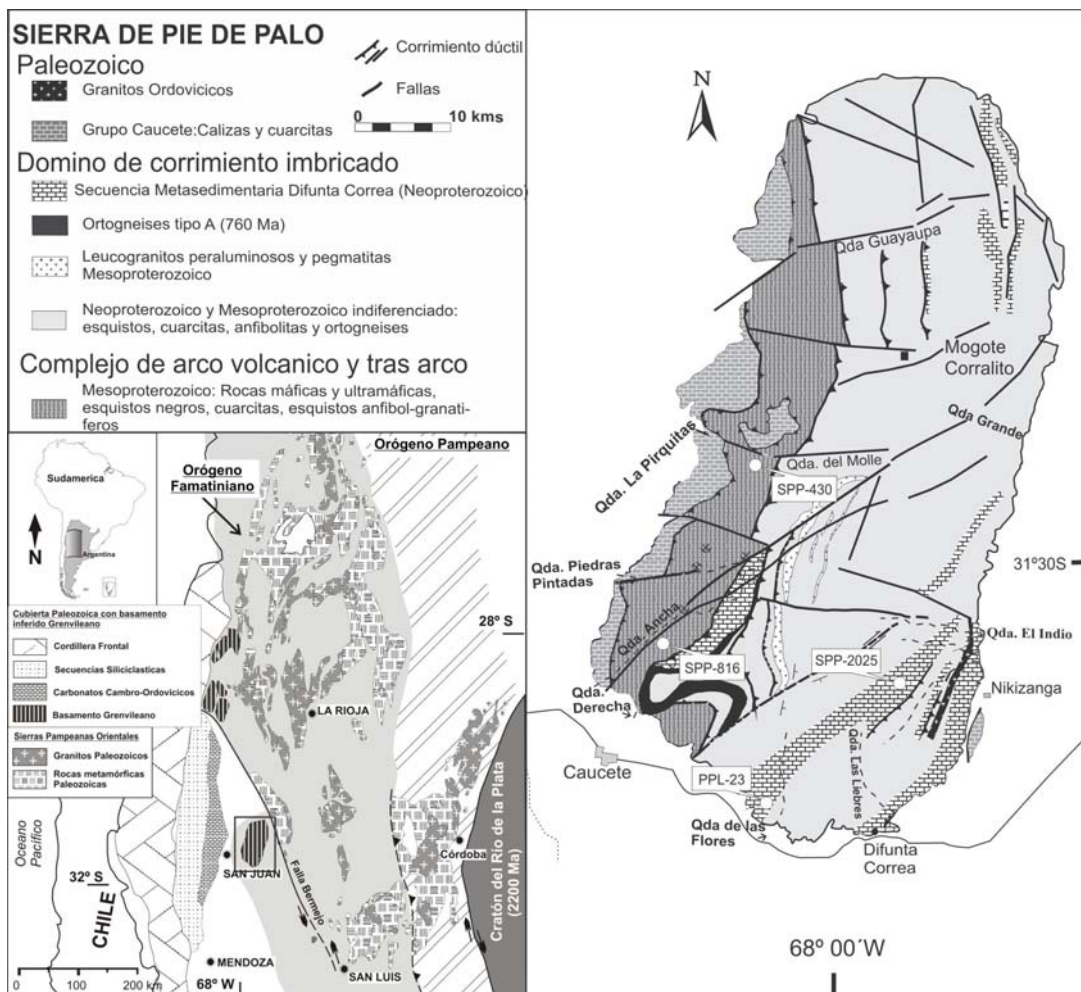


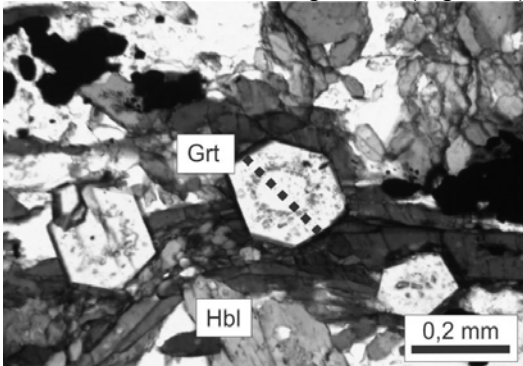
Figura 1: Ubicación y mapa geológico de la Sierra de Pie de Palo. Modificado de Casquet *et al.*, 2001.

## PETROGRAFÍA DE LAS UNIDADES ANALIZADAS

Se realizó el estudio de cuatro muestras (SPP-430, SPP-816, SPP-2025 y PPL-23), en diferentes lugares de la sierra (Figura 1). Las dos primeras son anfibolitas granatíferas correspondientes al basamento mesoproterozoico, en tanto que las dos últimas son metapelitas cálcicas de la SMDC.

### Anfibolitas granatíferas

Estas rocas poseen una asociación mineral compuesta de  $Hbl_{(X_{Mg0,3-0,4})}$  -  $Grt_{(Alm_{42-61})}$  -  $Ep_{(Ps_{17-20})}$  -  $Pl_{(An_{1-5})}$  -  $Qtz$  (abreviaturas según Kretz, 1983) con accesorios de  $Ilm$ - $Ap$ . La textura general de la roca es nematoblástica en SPP-430 y porfiroblástica con matriz nematoblástica en SPP-816 (Figura 2). Los granates de estas muestras son euhedros a subhedros de 0,3 a 1 mm (SPP-430) y de 3 a 4 mm (SPP-816), con inclusiones de cuarzo, plagioclasa y opacos, ordenadas concéntricamente, separando dos zonas texturales dentro del granate (Figura 2).

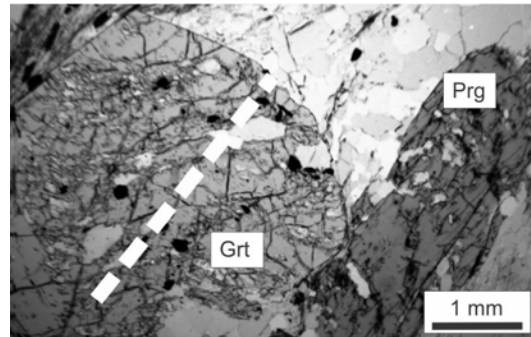


**Figura 2:** fotomicrografía de una anfibolita granatífera (SPP-430). En línea de puntos se muestra la dirección del perfil composicional realizado.

### Metapelitas cálcicas

Estas rocas son esquistos granatíferos-anfibólicos con una asociación mineral compuesta de  $Grt_{(Alm_{56-70})}$  -  $Prg_{(X_{Mg0,34-0,39})}$  -  $Qtz$  -  $Pl_{(An_{1-14})}$  -  $Bt_{(X_{Mg0,44-0,46})}$  -  $Ms$  -  $Chl_{(X_{Mg0,48})}$  -  $Ep_{(Ps_{0,2})}$  -  $Ilm$ . Posee una textura porfiroblástica con porfiroblastos de granate y anfíbol en una matriz lepidoblástica crenulada con superficies de tipo S-C. La foliación es espaciada en la cual se diferencian dominios M y Q.

Los porfiroblastos de granate miden entre 0,5 y 2 mm, son de forma subhedra y presentan abundantes inclusiones de cuarzo y opacos bajo una configuración sigmoidal (Figura 3).



**Figura 3:** fotomicrografía de una metapelita cálcica (SPP-2025). En línea de trazos se muestra la dirección del perfil composicional realizado.

### ZONACIÓN COMPOSICIONAL DE LOS GRANATES

Para el análisis de la química mineral se utilizó la microsonda JEOL JXA8230 del Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X (LAMARX) de la Universidad Nacional de Córdoba, como así también la microsonda JEOL-JXA-8900M en el Centro de microscopía electrónica Luis Brú, Universidad Complutense de Madrid, España.

En cada una de las muestras estudiadas se realizaron mapas de variación composicional de Fe, Mg, Ca y Mn, y a partir de estos, se trazaron perfiles composicionales de borde a borde.

### Granates de las Anfibolitas granatíferas (SPP-430 y SPP-816)

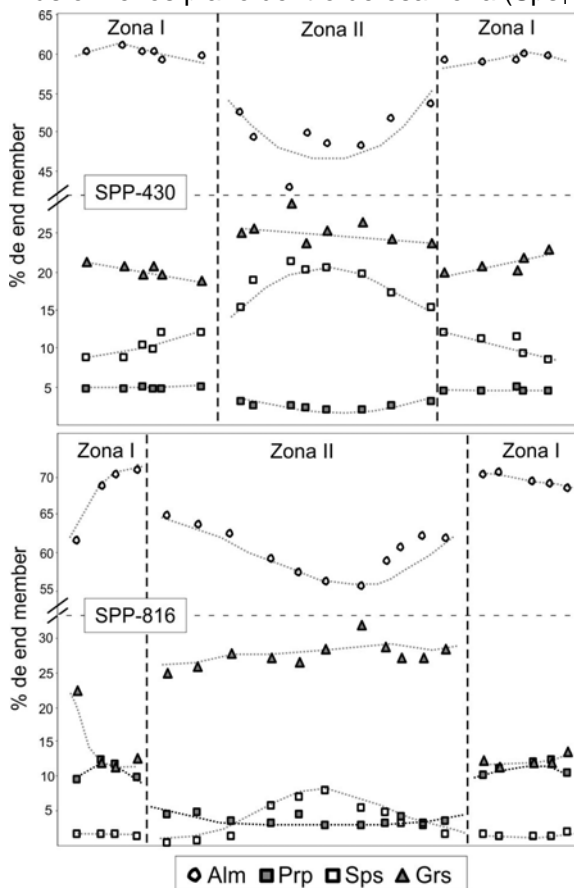
Estos granates están compuestos de  $Alm_{43-61}$ ,  $Grs_{19-29}$ ,  $Prp_{2-5}$ ,  $Sps_{8-21}$  en la muestra SPP-430 y  $Alm_{56-71}$ ,  $Grs_{11-32}$ ,  $Prp_{3-12}$ ,  $Sps_{1-8}$  en la muestra SPP-816.

Los granates de ambas muestras se caracterizan por un resalto composicional muy marcado entre el núcleo (zona I) y el borde (zona II) además de mostrar una variación entre los patrones de cada zona (Figura 4). El límite entre zonas se encuentra marcado texturalmente por las inclusiones concéntricas antes descriptas.

El granate de la muestra SPP-430 posee una zona I con un núcleo deprimido en Fe y Mg y enriquecido en Ca y Mn ( $Alm_{43-54}$ ,  $Grs_{24-29}$ ,  $Sps_{15-21}$ ,  $Prp_{2-3}$ ). A partir del centro se observa un incremento progresivo de Fe y Mg (patrón cóncavo) y, un decrecimiento de Mn (patrón convexo), en tanto que el Ca no posee variaciones importantes en su contenido (patrón plano). Este comportamiento se interrumpe bruscamente en el contacto con la zona II.

La zona II evidencia un salto composicional respecto a la zona I en el cual se observa un incremento de Fe y Mg y una disminución de Ca y Mn. Desde el límite de la zona I hacia el borde del granate, la cantidad de Mn continúa descendiendo ( $\text{Sps}_{12-8}$ ), en tanto que el Fe, Mg y Ca aumentan ( $\text{Alm}_{59-61}$ ,  $\text{Prp}_{4-5}$ ,  $\text{Grs}_{19-23}$ ).

La muestra SPP-816 posee patrones muy similares a SPP-430 (Figura 4) encontrándose las principales diferencias en el comportamiento del Mg, el cual muestra un patrón plano en la zona I ( $\text{Prp}_{3-5}$ ), en vez de cóncavo como en SPP-430, y se invierte en la zona II mostrando un patrón convexo. Otra diferencia que puede marcarse es en el comportamiento del Mn en la zona II, la cual en vez de disminuir, respecto de la zona I, como ocurre en SPP-430, se produce un leve aumento de su contenido, con un patrón más o menos plano dentro de esa zona ( $\text{Sps}_{1-2}$ ).



**Figura 4:** perfiles composicionales en granates de las anfibolitas granatíferas. Ver descripción en el texto.

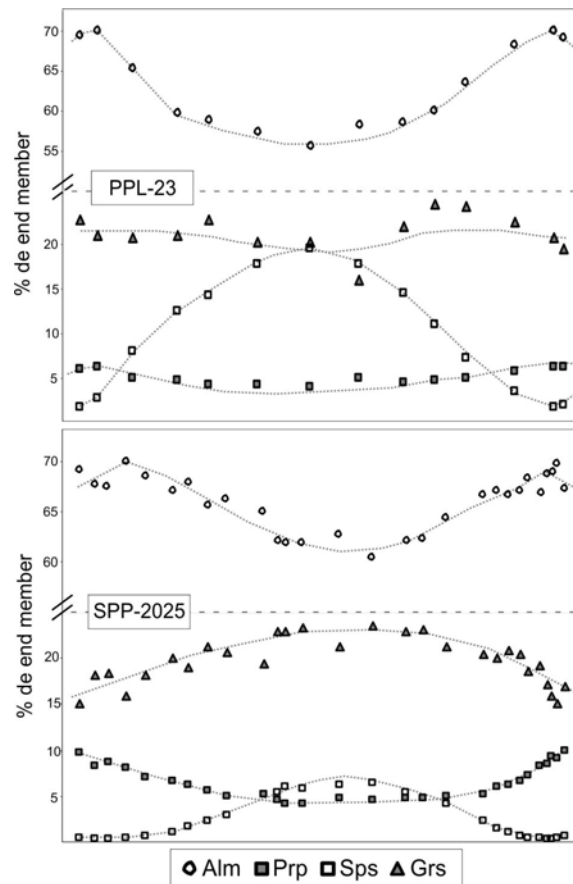
### Granates de las Metapelitas cálcicas (PPL-23 y SPP-2025)

Estos granates están compuestos de  $\text{Alm}_{55-70}$ ,  $\text{Grs}_{16-24}$ ,  $\text{Prp}_{4-6}$ ,  $\text{Sps}_{2-20}$  en la muestra PPL-23

y  $\text{Alm}_{60-70}$ ,  $\text{Grs}_{15-24}$ ,  $\text{Prp}_{4-10}$ ,  $\text{Sps}_{0.1-6.4}$  en la muestra SPP-2025.

Ambas muestras poseen granates con perfiles composicionales muy similares para todos los elementos excepto para el Ca (Figura 5). A diferencia de los granates de las anfibolitas granatíferas, que muestran dos zonas composicionales y texturales, en las metapelitas cálcicas los perfiles son continuos y suaves, sin cambios bruscos en las curvas. El Fe y el Mg presentan un patrón cóncavo, y el Mn posee un patrón convexo con un núcleo rico en Mn y un empobrecimiento progresivo hacia los bordes ( $\text{Sps}_{3-16}$  en PPL-23 y  $\text{Sps}_{0.1-6.4}$  en SPP-2025).

El Ca muestra un diseño convexo para SPP-2025 ( $\text{Grs}_{15-24}$ ) y plano a cóncavo para PPL-23 ( $\text{Grs}_{11-17}$ ).



**Figura 5:** perfiles composicionales en granates de las metapelitas cálcicas. Ver descripción en el texto.

### DISCUSIÓN

La identificación de granates con dos zonas texturales (núcleo y borde), limitadas por una concentración de inclusiones en disposición

concéntricas, sumado al cambio de patrones composicionales entre una zona y la otra permiten proponer dos etapas de crecimiento para los granates de las anfibolitas granatíferas. La modificación en la tendencia de los patrones entre la zona I y II permite además concluir que estos granates crecieron en momentos distintos y bajo condiciones metamórficas diferentes. De esta manera las anfibolitas granatíferas, pertenecientes al basamento mesoproterozoico, son interpretadas como polimetamórficas.

Casquet *et al.* (2001) describen la zonación de granates almandínicos de una migmatita, al oeste de la sierra, con una deformación milonítica sobreimpuesta. Estos granates poseen una zonación composicional similar a los de las anfibolitas granatíferas aquí descritas, lo que estos autores interpretan también como un polimetamorfismo.

Por el contrario, los granates de las metapelitas cálcicas del sector suroriental de Pie de Palo, muestran perfiles continuos y suaves, con patrones cóncavos del Fe y Mg, y convexo del Mn característicos de los granates de grado medio formados bajo condiciones de aumento de temperatura y presión (Spear, 1998). La continuidad de la zonación composicional del Fe, Mg y Mn de estos granates indica que han crecido en una única etapa blástica (monometamorfismo). Un comportamiento similar ha sido descrito por Casquet *et al.* (2001) para los granates de una pelita cálcica de la Quebrada del Molle, al oeste de la sierra.

La grosularia de la metapelita cálcica de la muestra SPP-2025 posee un patrón convexo, típico de zonación de progrado en rocas de grado medio con aumento de presión y temperatura, en tanto que el granate de la muestra PPL-23, muestra una leve variación en el comportamiento respecto de la SPP-2025. Posee un patrón plano a cóncavo el cual puede deberse a una leve variación en el gradiente P-T, ya que las isopletras de grosularia suelen depender tanto de la presión como de la temperatura; o a una reacción continua con plagioclasa, o discontinua posiblemente con epidoto (Crawford, 1977).

La pequeña disminución de Fe y aumento de Mn en los bordes es interpretado como un reajuste menor por retrometamorfismo.

## CONCLUSIÓN

Las evidencias derivadas de los granates aquí analizados son consistentes con la existencia, en Pie de Palo, de un basamento polimetamórfico y una cubierta sedimentaria más moderna monometamórfica. Conclusiones similares han sido propuesta por otros autores a partir de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en mármoles (Galindo *et al.*, 2004), patrones de herencia en circones detríticos de paranfibolitas (Rapela *et al.*, 2005) y patrones de zonación en granates de migmatitas (Casquet *et al.*, 2001).

## BIBLIOGRAFÍA

Astini, R.A., Benedetto, J.L., Vaccari, N.E., 1995. The Early Paleozoic evolution of the Argentine Precordillera as a Laurentian rifted, drifted and collided terrane: a geodynamic model. *Geological Society of America Bulletin*, 107: 235-273.

Baldo, E.G., Casquet, C., Galindo, C., 1998. Datos preliminares sobre el metamorfismo de la Sierra de Pie de Palo, Sierras Pampeanas Occidentales (Argentina). *Geogaceta*, 24 : 39-42.

Baldo, E.G., Casquet, C., Pankhurst, R.J., Galindo, C., Rapela, C.W., Fanning, C.M., Dahlquist, J.A., Murra, J., 2006. Neoproterozoic A-type magmatism in the Western Sierras Pampeanas (Argentina) : evidence for Rodinia break-up along a proto-lapetus rift ? *Terra Nova*, 18 : 388-394.

Baldo, E.G., Dahlquist J.A., Rapela, C.W., Casquet, C., Pankhurst, R. J., Galindo, C., and Fanning, M. 2005: Early Ordovician peraluminous magmatism in the Sierra de Pie de Palo, (Western Sierras Pampeanas): Geotectonic implications. In: Gondwana 12 Conference, Mendoza 2005. Argentina, Abstract 57.

Caminos, R., 1979. Sierras Pampeanas Noroccidentales. Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. II Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, Vol. I: 41-80.

Casquet, C., Baldo, E.G, Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Galindo, C., Fanning, C.M., Saavedra, J., 2001. Involvement of the Argentine Precordillera terrane in the Famatinian mobile belt: U/Pb SHRIMP and metamorphic evidence from the Sierra de Pie de Palo. *Geology*, 29 : 703-706.

Casquet, C., Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Baldo, E.G, Galindo, C., Fanning, C.M., Dahlquist, J.A., Saavedra, J., 2012. A history of Proterozoic terranes in southern South America: From Rodinia to Gondwana. *Geoscience Frontiers*, 3 : 137-145.

Colombo, F., Baldo, E.G., Casquet, C., Pankhurst, R.J., Galindo, C., Rapela, C.W., Dahlquist, J.A., Fanning, C.J., 2009. A-type magmatism in the sierras of Maz and Espinal: a new record of Rodinia break-up in the Western Sierras

Pampeanas of Argentina. *Precambrian Research*, 175 : 77-86.

Crawford, M.L., 1977. Calcium zoning in almandine garnet, Wissahickon Formation, Philadelphia, Pennsylvania. *Canadian Mineralogist*, 15: 243-429.

Finney, S.C., 2007. The parautochthonous Gondwanan origin of the Cuyania (greater Precordillera) terrane of Argentina: a re-evaluation of evidence used to support an allochthonous Laurentian origin. *Geologica Acta*, 5 : 127-158.

Galindo, C., Casquet, C., Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Baldo, E., Saavedra, J., 2004. Sr, C, and O isotope geochemistry and stratigraphy of Precambrian and lower Paleozoic carbonate sequences from the western Sierras Pampeanas of Argentina: tectonic implications. *Precambrian Research*, 131 : 55-71.

Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68 : 277-279.

Mulcahy, S.R., Roeske, S.M., McClelland, W.C., Jourdan, F., Iriondo, A., Renne, P.R., Vervoort, J.D., Vujovich, G.I., 2011. Structural evolution of a composite middle to lower crustal section: the Sierra de Pie de Palo, northwest Argentina. *Tectonics*, 30 : TC1005. doi:10.1029/2009 TC002656.

Mulcahy, S.R., Roeske, S.M., McClelland, W.C., Normade, S., Renne, P.R., 2007. Cambrian initiation of the Las Pirquitas thrust of the western Sierras Pampeanas, Argentina: implications for the tectonic evolution of the proto-Andean margin of South America. *Geology*, 35: 443-446.

Naipauer, M., Vujovich, G.I., Cingolani, C.A., McClelland, W.C., 2010. Detrital Zircon analysis from de Neoproterozoic-Cambrian sedimentary cover (Cuyania terrane), Sierra de Pie de Palo, Argentina : Evidence of a rift and passive margin system ? *Journal of South American Earth Sciences*, 29: 306-326.

Pankhurst, R., Rapela, C.W., Saavedra, J., Baldo, E., Dahlquist, J.A., Pascua, I., Fanning, C.M., 1998. The Famatinian magmatic arc in the Central Sierras Pampeanas: an early to mid-Ordovician continental arc on the Gondwana margin. In: Pankhurst, R.J. and Rapela, C.W. (Eds.), *The proto-Andean margin of Gondwana*, Geol. SOC., London, Spec. Pub., v. 142, pp. 343-367.

Ramos, V.A., 2004. Cuyania, an exotic block to Gondwana: review of a historical success and the present problems. *Gondwana Research*, 7: 1009-1026.

Ramos, V.A., Vujovich, G., Martino, R., Otamendi, J., 2010. Pampia: a large cratonic block missing in the Rodinia supercontinent. *Journal of Geodynamics*, 50: 243-255.

Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Casquet, C., Fanning, C.M., Galindo, C., Baldo, E.G., 2005. Datación U-Pb SHRIMP de circones detríticos en parafibrolitas neoproterozoicas de las secuencia

Difunta Correa (Sierras Pampeanas Occidentales, Argentina). *Geogaceta*, 38 : 227-230.

Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Casquet, A., Baldo, E., Galindo, C., Fanning, C.M., Dahlquist, J.A., 2010. The Western Sierras Pampeanas: protracted Grenville-age history (1330e1030 Ma) of intra-oceanic arcs, subductioneaccretion at continental-edge and AMCG intraplate magmatism. *Journal of South American Earth Sciences*, 29 : 105-127.

Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Fanning, C.M., Galindo, C., Baldo, E.G., Casquet, C., Colombo, F., Dahlquist, J.A., 2011. Hf and O Isotopic Signature of 840-730 Ma A-type Granitic and Felsic Igneous Rocks in Southern South America. VII Hutton Symposium on Granites and Related Rocks, Avila, Spain. Abstract 121.

Spear, F.S., 1998. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineralogical Society of America, Washington, D. C. 799 pp.

van Staal, C.R., Vujovich, G.I., Currie, K.L., 2011. An Alpine-style Ordovician collision complex in the Sierra de Pie de Palo, Argentina: Record of subduction of Cuyania beneath the Famatina arc. *Journal of Structural Geology*, 33: 343-361.

Vujovich, G.I., van Staal, C.R., Davis, W., 2004. Age constraints on the tectonic evolution and provenance of the Pie de Palo Complex, Cuyania composite terrane, and the Famatinian Orogeny in the Sierra de Pie de Palo, San Juan, Argentina. *Gondwana Research*, 7: 1041-1056.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al proyecto SECyT-UNC 2012-2013 y al proyecto CGL2005-02065/BTE del Ministerio de Educación y Ciencia de España.